



**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské  
techniky**

**NÁVRH AERAČNÍHO ELEMENTU PRO DESKOVÝ  
FOTOBIOREAKTOR**

**DESIGN OF AERATION ELEMENT FOR FLAT  
PANEL PHOTOBIREACTOR**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE  
2021**

**VOJTĚCH  
KLIMOVÍČ**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Klimovič Jméno: Vojtěch Osobní číslo: 457540  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávací katedra/ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky  
Studijní program: Energetika a procesní inženýrství  
Specializace: Procesní inženýrství

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh aeračního elementu pro deskový fotobioreaktor

Název diplomové práce anglicky:

Design of aeration element for flat panel photobioreactor

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte aerační element pro aeraci kultivačního média v poloprovodním deskovém fotobioreaktoru. Na základě kritické literární, průmyslové a patentové rešerše navrhněte systém pro homogenní aeraci kultivačního média v poloprovodním deskovém fotobioreaktoru. Vytvořte výkresovou dokumentaci navrženého aeračního elementu. Ověřte možnosti použití navržené konstrukční varianty na základě optimálních provozních podmínek.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: 21.04.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 04.06.2021

Platnost zadání diplomové práce: 19.09.2021

Ing. Mgr. Vojtěch Bělohlav  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci s názvem Návrh aeračního elementu pro deskový fotobioreaktor jsem vykonal samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s uvedením všech použitých zdrojů a literatury.

V Praze dne .....

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Mgr. Vojtěchu Bělohlovovi, za obětavou práci, odborné konzultace a podnětné připomínky při jejím vypracování. Déle děkuji zástupcům firem Vodní energie, spol. s. r. o. a Kunst, spol. s. r. o. za bezplatné poskytnutí vzorků porézní membrány pro laboratorní experiment.

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Vojtěch
<b>Příjmení autora:</b>	KLIMOVÍČ
<b>Název práce česky:</b>	Návrh aeračního elementu pro deskový fotobioreaktor
<b>Název práce anglicky:</b>	Design of aeration element for flat panel photobioreactor
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 88 počet obrázků: 37 počet tabulek: 13 počet příloh: 17
<b>Akademický rok:</b>	2020/2021
<b>Jazyk práce:</b>	český
<b>Ústav:</b>	Ústav procesní a zpracovatelské techniky – U12118
<b>Studijní program:</b>	(NEPI) Energetika a procesní inženýrství
<b>Obor / Specializace:</b>	(N071TPRI) Procesní inženýrství
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav
<b>Oponent:</b>	
<b>Zadavatel práce:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky

### **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena na homogenní aeraci fotobioreaktorů a zajištění optimálních kultivačních podmínek mikrořas. Hlavním cílem této práce je návrh a konstrukce aeračního elementu včetně technické dokumentace. V rámci práce je vypracována rešerše, která se zabývá optimálními podmínkami kultivace a způsoby aerace různých kultivačních systémů, se zaměřením na mikrořasu *Chlorella vulgaris*. Na základě literární rešerše jsou navrženy varianty dvou aeračních elementů pro deskový fotobioreaktor. Dle konstrukčního návrhu jsou elementy vyrobeny a odzkoušeny v testovacím reaktoru. V návaznosti na výrobu jsou aerační elementy experimentálně testovány a vzájemně porovnány. V rámci experimentu byly měřeny kritické parametry pro kultivaci, tzn. doba zdržení plynu, velikost a rychlost proudících bublin a jemnobublinná homogenní aerace. Celkem byly měřeny 4 různé porézní membrány. Výsledky měření jsou vzájemně diskutovány a porovnány s literaturou. Následuje kritické zhodnocení celého experimentu a možnosti využití aeračních elementů včetně porézních membrán pro „scale-up“.

**Klíčová slova:** biomasa, mikrořasy, kultivace, kultivační médium, aerace, aerační element, porézní membrána, oxid uhličitý, deskový fotobioreaktor

### **Annotation**

This master thesis is focused on homogeneous aeration of photobioreactors and ensuring optimal culture conditions of microalgae. Main focus of the thesis is the design and construction of an aeration element, including technical documentation. As part of the thesis is a research prepared, which deals with optimal cultivation conditions and methods of aeration of various cultivation systems, focusing on the microalgae *Chlorella vulgaris*. Based on the literature search, variants of two aeration elements for a plate photobioreactor are proposed. According to the design, the elements are manufactured and tested in a test reactor. Following the production, the aeration elements are experimentally tested and compared with each other. In the experiment, critical parameters for cultivation were measured, ie gas residence time, size and velocity of flowing bubbles and fine-bubble homogeneous aeration. A total of 4 different porous membranes were measured. The measurement results are mutually discussed and

compared with the literature. The following is a critical evaluation of the entire experiment and the possibility of using aeration elements, including porous membranes for "scale-up".

**Key words:** biomass, microalgae, cultivation, culture medium, aeration, aeration element, carbon dioxide, flat panel photobioreactor

## Obsah

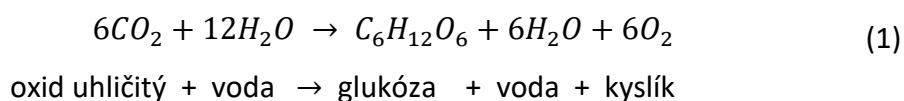
<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>1.1</b>	<b>Kultivace mikrořas .....</b>	<b>- 11 -</b>
1.1.1	Princip kultivace.....	- 12 -
1.1.2	Možnosti kultivace.....	- 13 -
<b>1.2</b>	<b>Oxid uhličitý CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>- 20 -</b>
<b>1.3</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část .....</b>	<b>- 24 -</b>
<b>2.1</b>	<b>Způsoby provzdušňování.....</b>	<b>- 24 -</b>
2.1.1	Pneumatická aerace .....	- 24 -
2.1.2	Mechanická aerace .....	- 28 -
2.1.3	Hydropneumatická aerace.....	- 29 -
2.1.4	Kombinovaná aerace více systémů.....	- 30 -
2.1.5	Porovnání jednotlivých druhů aerace .....	- 30 -
<b>2.2</b>	<b>Rozbor problematiky provzdušňování .....</b>	<b>- 31 -</b>
2.2.1	Teorie vzniku bublin.....	- 31 -
2.2.2	Dvoufázové proudění .....	- 35 -
2.2.3	Fixace CO <sub>2</sub> v kultivačním médiu.....	- 37 -
2.2.4	Mechanické namáhání.....	- 39 -
<b>2.3</b>	<b>Aerační elementy pro pneumatické provzdušňování.....</b>	<b>- 40 -</b>
2.3.1	Aerační membrána PUM68 .....	- 40 -
2.3.2	Porézní trubka (HDPE) .....	- 41 -
2.3.3	Porézní membrána JetFlex Jaeger .....	- 43 -
2.3.4	Diskový element FlexAir .....	- 44 -
<b>2.4</b>	<b>Návrh aeračního elementu .....</b>	<b>- 45 -</b>
2.4.1	Vybrané membrány pro experiment .....	- 46 -
<b>3</b>	<b>Praktická část.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>3.1</b>	<b>Konstrukční návrh elementu .....</b>	<b>- 47 -</b>
3.1.1	Výkresová dokumentace .....	- 49 -
<b>3.2</b>	<b>Souhrn materiálu .....</b>	<b>- 50 -</b>
<b>3.3</b>	<b>Výroba a montáž.....</b>	<b>- 50 -</b>
	Návrh aeračního elementu pro deskový fotobioreaktor .....	- 8 -



<b>3.4</b>	<b>Sestava experimentu.....</b>	<b>- 52 -</b>
3.4.1	Uspořádání zařízení .....	- 53 -
<b>3.5</b>	<b>Metodika měření .....</b>	<b>- 54 -</b>
<b>3.6</b>	<b>Vyhodnocení měření .....</b>	<b>- 55 -</b>
<b>3.7</b>	<b>Výsledky naměřených dat .....</b>	<b>- 56 -</b>
3.7.1	Vyhodnocení velikosti bublin.....	- 56 -
3.7.2	Vyhodnocení rychlosti bublin .....	- 58 -
3.7.3	Vyhodnocení doby zdržení plynu.....	- 59 -
3.7.4	Vyhodnocení homogenní aerace .....	- 60 -
3.7.5	Pozorování průměru póru .....	- 61 -
3.7.6	Pozorování smykové rychlosti a napětí .....	- 62 -
<b>3.8</b>	<b>Porovnání optimalizace aeračního členu.....</b>	<b>- 63 -</b>
<b>4</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>- 65 -</b>
<b>5</b>	<b>Seznam zdrojů a literatury .....</b>	<b>- 67 -</b>
<b>6</b>	<b>Seznam symbolů.....</b>	<b>- 70 -</b>
<b>7</b>	<b>Seznam řeckých symbolů .....</b>	<b>- 71 -</b>
<b>8</b>	<b>Zkratky.....</b>	<b>- 71 -</b>
<b>9</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>- 72 -</b>
<b>10</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>- 74 -</b>
<b>11</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>- 75 -</b>
<b>12</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>- 76 -</b>

## 1 Úvod

Jedny z prvních organismů na Zemi byly mikrořasy. Jsou součástí naší planety miliony let, stály na počátku celého ekosystému. Mikrořasy mají velice důležitou vlastnost, stejně jako povrchové rostliny, využívají fotosyntézu, která slouží k přeměně vody, oxidu uhličitého a světelné energie. Chemická reakce fotosyntézy ukládá energii do buněk a tím tvoří biomasu (glukózu) s kyslíkem. Základní chemická rovnice (1) oxygení fotosyntézy je následující [1] :



První experimenty s kultivací řas v biotechnologii proběhly v polovině 20. století pro potravinářský průmysl z důvodu většího množství nutričních hodnot. V posledních letech se velice rozšířil zájem o mikrořasy, staly se tak předmětem hlubšího zkoumání. V dnešní době se řasy používají jako doplněk stravy nejen pro lidi, ale také pro zvířata. Mikrořasy se také využívají ve farmaceutickém a zemědělském průmyslu, významnou roli hrají i v technologiích pro čištění odpadních vod. S myšlenkou využití mikrořas v energetice a procesní technologii jako zdrojem energie přišli vědci teprve nedávno.

V současnosti probíhá velká debata na téma globální oteplování a klimatické změny v důsledku produkce skleníkových plynů. Z této debaty vyplývá, že vyspělé země vychází ze současného trendu snižování emisí a skleníkových plynů. Nové metody pro zachycení a následné využití CO<sub>2</sub> produkovaného při spalování fosilních paliv a průmyslové výrobě mají za úkol snižovat množství produkovaného CO<sub>2</sub> do atmosféry. Nová tendence společnosti přinesla nové metody tzv. Carbon Capture and Storage (CCS) a Carbon Capture and Utilization (CCU). Do nových procesů, resp. nových zařízení, které dokážou zachytit, vyčistit a uložit nově vzniklý oxid uhličitý pro další využití, se investují veliké finanční prostředky. Jeden ze způsobů následného využití CO<sub>2</sub>, je právě produkce biomasy v reaktorech neboli kultivace mikrořas. Při využití zachyceného oxidu uhličitého, který je odpadním produktem při spalování (např. teplárny, spalovny apod.) pro opětovanou výrobu paliva. Palivo vzniklé touto cestou označujeme jako biopalivo 3. generace. Zájem o tento produkt celosvětově roste a hledá se vhodná schopná alternativa k palivům fosilním [2].

Mikrořasy žijí ve vodě, která jim zajišťuje dobré prostředí pro množení. Při zajištění kvalitních podmínek pro kultivaci, tzn. dostatečný kontakt s oxidem uhličitým, dodání živin a světelného záření, dosahují kultury mikrořas koncentrace až  $10 \text{ g liter}^{-1}$  vody. Nicméně vždy záleží na druhu mikrořas, fázi kultivace a daném bioreaktoru [3].

V biologii, pod pojmem mikrořasy, rozlišujeme prokaryotní sinice a eukaryotní řasy, které se dále dělí na jedno a mnohobuněčné organismy. Na světě je velmi mnoho druhů mikrořas, přesto se pro laboratorní a průmyslovou kultivaci používá jen několik kmenů. Mezi nejznámější a nejvíce rozšířené ve světové biotechnologické produkci biomasy patří *Chlorella spirulina*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Arthrospira (Spirulina)*, *Nannochloropsis*. Nutriční hodnoty vybraných druhů mikrořas jsou uvedeny v Tab. 1 [4].

**Tab. 1** Nutriční hodnoty v procentech různých druhů mikrořas [4]

Mikrořasa	Proteiny [%]	Polysacharidy [%]	Lipidy [%]
<i>Chlorella spirulina</i>	30-50	15-35	5-15
<i>Chlorella vulgaris</i>	40-55	10-25	15-25
<i>Dunaliella salina</i>	40-60	15-20	15-20
<i>Haematococcus pluvialis</i>	50	25	15
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7

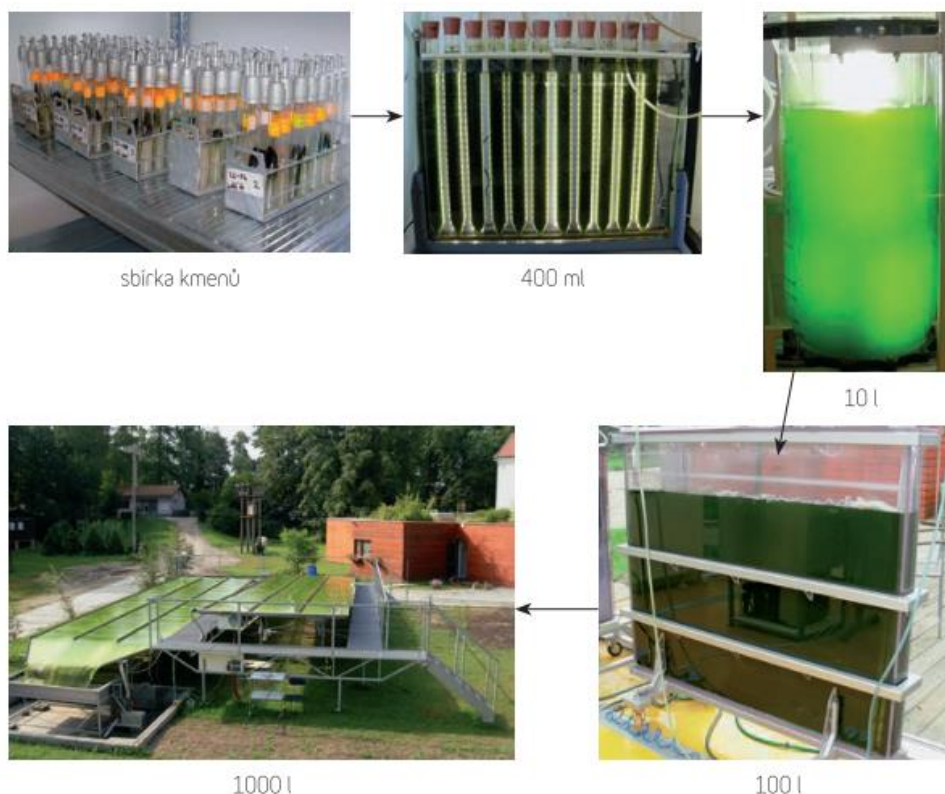
Výběr určitého druhu pro kultivaci za daným účelem závisí na mnoho faktorech. Mezi hlavní rozhodující činitele patří například skutečnost, zda chceme složku z dané mikrořasy těžit jako primární produkt. Dále při jakých podmínkách se daný druh řas nejvíce rozmnožuje, tzn. kolik optimálního množství světla a oxidu uhličitého potřebuje. S tím jsou spojeny také další parametry: jaký je vhodný rozsah teplot pro život a kultivaci, jak jsou mikrořasy odolné vůči mechanickému či chemickému poškození nebo množství celkové produkce v závislosti na ekonomické bilanci celého řešení. Všechny tyto základní faktory rozhodují o volbě kultivačního média [4].

## 1.1 Kultivace mikrořas

V této části je primárním cílem ukázat zásadní podmínky růstu řas a vytvořit přehled jednotlivých kultivačních systémů.

### 1.1.1 Princip kultivace

Jak již bylo zmíněno výše, rozmnožování závisí především na množství dopadajícího světla a přístupu oxidu uhličitého. Tyto základní podmínky pro život mikrořas a jejich množení se vyskytují ve volné přírodě téměř všude, ale v laboratořích a biotechnologických zařízeních je však také možné zajistit optimální podmínky pro jejich existenci. V laboratoři se uchovávají kmeny jednotlivých druhů mikrořas ve zkumavkách. Z jedné této zkumavky se připraví počáteční kultura neboli tzv. „násada“. Ta se následně v několika krocích dále rozmnožuje, než ji je možné nasadit do biotechnologického zařízení. Celý tento proces trvá několik týdnů. Řasy jsou choulostivé na změnu prostředí a vždy trvá dlouhou dobu, než se nasazená kultura v novém prostředí opět začne kultivovat. Celý postup kultivace – od počátečního kmene až po kontinuální kultivaci je zobrazen na Obr. 1.



**Obr. 1** Postup inokulace startovní kultury buněk mikrořas. Ze sbírky přes laboratorní válcové a panelové fotobioreaktory až k otevřené venkovní kultivaci [2]

Pro pěstování bohatých kultur, se používají tři základní režimy: periodické (vsádkové), semikontinuální a kontinuální. Pro rozmnožování kultury existuje celá řada jednotlivých druhů systémů a zařízení, které využívají jak přirozených, tak i uměle vytvořených podmínek. Každé technologické zařízení má své výhody a .

Výběr kultivačního zařízení pro každý druh a účel kultivace řas musí být proveden samostatně, jelikož neexistuje žádné optimální univerzální řešení.

Pro tuto práci a experiment byla vybrána mikrořasa *Chlorella vulgaris*. Tento kmen mikrořasy je fototrofní (světlo využívají jako zdroj energie). Buňka má sférický tvar, její průměr nabývá 2 až 10  $\mu\text{m}$ . Buněčná stěna dosahuje šířky 17 až 21 nm. Rozmnožování probíhá buněčným dělením, tzn., že z jedné mateřské buňky vzniknou 2 dceřiné. Doba rozmnožení jedné buňky *Chlorella vulgaris* trvá za ideálních podmínek přibližně 19 hodin [5].

### 1.1.2 Možnosti kultivace

Většina druhů mikrořas je fototrofní, tedy energii získávají ze světelného záření. Nicméně některé kmeny mohou růst i heterotrofně (bez světelného záření). Zdrojem energie tvoří rozpuštěné živiny v kapalném prostředí. Tato práce se především vztahuje k fototrofní metodě rozmnožování.

Fototrofní způsob kultivace se dělí na tři hlavní skupiny. První možností jsou mikrořasy, které lze nechat rozmnožovat ve velkých otevřených nádržích, jež svou plochou zabírají až stovky  $\text{m}^2$ . Druhý způsob zajišťují uzavřené probublávané reaktory, které tvoří kompaktní systém o výrazně menší rozloze, v řádech jednotek  $\text{m}^2$ . Tyto kompaktní kultivační systémy se nazývají fotobioreaktory. Třetí skupinu tvoří hybridní reaktory, které kombinují výhody otevřených a uzavřených systémů [2].

### Otevřené kultivační systémy

Velké otevřené systémy jsou nejstarším a osvědčeným způsobem pěstování mikroorganismů. Tyto systémy mohou být přírodní nebo umělé mělké nádrže, kaskádovité kanály či šikmé plochy (Obr. 6) nebo oběžná koryta. Společným faktorem těchto systémů je kontakt organismů s okolní atmosférou. Tato varianta je konstrukčně i provozně jednoduchá. Promíchávání zpravidla zajišťují oběžná lopatková kola nebo rotující ramena, která čeří povrchovou vodu různými elementy. Velké hloubky otevřených systémů jsou nežádoucí kvůli horšímu průsvitu ozáření jednotlivých buněk a provzdušňování. U otevřených systémů může hrozit kontaminace celé kultury vnikem nežádoucích či toxických látek. K hlavním výhodám těchto systémů patří nízké provozní i investiční náklady,

jednoduchá údržba a snadný odvod kyslíku do okolí. Avšak účinnost výtěžnosti je velmi nízká, neboť produktivita biomasy dosahuje maximálně  $1 \text{ g m}^{-2}$  za den [2].



**Obr. 2** Kaskádovitá otevřená kultivační plošina v AV ČR v Třeboni [6]

Otevřených kultivačních zařízení existuje mnoho. Nejčastějším zástupcem této kategorie je traťový kanál, kde kultivační médium je poháněno zpravidla lopatkovými koly či oběžnými čerpadly. Díky nucenému oběhu v kanálu je médium mícháno a provzdušňováno. Obvyklá hloubka kanálu je 30 cm.

Alternativou k hlubokému kanálu je kaskádový systém s tenkým filmem (Obr. 3). Takové zařízení zajišťuje větší kontakt se světelnou energií a okolní atmosférou. Oběh je zajišťován čerpadly, ve kterých dochází k intenzivnějšímu promíchání kultivujících se mikrořas. Produktivita kaskády nakloněných ploch bývá výrazně vyšší než u hlubokého kanálu. Nevýhodou je však relativně malé množství kultivačního média vztahované na zastavěnou plochu. Zejména v porovnání s traťovým kanálem.



**Obr. 3** Kaskády nakloněných ploch s filmovou vrstvou média [2]

### Uzavřené kultivační systémy

Uzavřené nebo polouzavřené kultivační systémy, které využívají světelnou energii nazýváme fotobioreaktor. Pro pěstování lze využít přirozené (sluneční) nebo umělé světlo. Na světě existuje mnoho různých typů fotobioreaktorů s odlišným geometrickým uspořádáním či pracujícím v jiném provozním režimu.

Výběr vhodného reaktoru pro danou aplikaci se obvykle řídí typem kmenu řas a účelem rozmnožování. Hlavní výhodou uzavřeného systému je zajištění stále stejných kultivačních podmínek v celém svém objemu a průběžnou kontrolou všech provozních parametrů (průtok média, pH, teplota, koncentrace  $\text{CO}_2$ ). V tomto kompaktním systému nehrozí vnik jiné nežádoucí látky, takže nedochází k nechtěné kontaminaci. [7]

Základními typy geometrických tvarů kultivačních reaktorů a jejich uspořádání jsou průhledné válce, trubice, ploché deskové komory a případně jejich různé modifikace. Dále jsou tyto nádoby propojeny potrubím do série či mohou tvořit cirkulační smyčku. V takových případech se v hydraulické trati též vyskytuje malá vyrovnávací nádrž. Stěny kultivačních nádob musí být vyrobeny z průhledného, ale pevného materiálu (sklo, plexisklo, plast). Proudění v hydraulické trati zajišťují peristaltická, případně membránová čerpadla, která méně zatěžují mikroorganismy v kultivačním médiu. Při použití jiných oběžných čerpadel by docházelo k příliš velkému smykovému napětí na povrchu buněk, což je nežádoucí [2].

Uzavřené kultivační systémy mají také své limity. Kvůli špatné propustnosti světla průtočným médiiem je doporučená tloušťka komory pouze 50 mm [7]. Ve vzdálenějším prostoru od světlo propustné stěny nedochází k dostatečné aktivitě záření vhodné pro další rozmnožování mikroorganismů. Při vhodném rozmístění nádrží je dáno, že dochází k vyšší výtěžnosti řas na zastavěnou plochu než u otevřených systémů. Pro otevřené systémy se uvádí velikost využitelné ozářené plochy 10 000 m<sup>2</sup> na 1 ha zastavěné plochy. Kdežto pro deskový reaktor se uvádí využitelná ozářená plocha o velikosti téměř 40 000 m<sup>2</sup> na 1 ha. Investiční i provozní náklady jsou vyšší oproti otevřeným kultivačním nádržím zejména kvůli drahé konstrukci samotných reaktorů, vyšším nákladům na provoz čerpadel, kompresorů a osvětlení. [8]

Mezi uzavřené fotobioreaktory se řadí válcový, trubkový, deskový a lamelový. Válcový reaktor je uveden na Obr. 4. Tento typ nádoby je základním zařízením především pro laboratorní a výzkumné účely vzhledem ke své jednoduché konstrukci. Nádoba je osvětlována ze svého vnějšího povrchu. Jak již bylo zmíněno výše, pro tento typ reaktoru jsou doporučeny menší průměry nádoby, aby byla zajištěna dostatečná propustnost světla do celého objemu. Tímto parametrem je tento reaktor velmi limitován. Zpravidla ve spodní části se nachází distributor pro zajištění homogenního toku plynu prostupující skrz kultivační roztok. K přestupu hmoty mezi bublinami a mikroorganismy pak dochází v celém objemu nádoby. Díky proudění vzduchu pak také dochází k pneumatickému míchání vsádky a tím je zabráněno úsadám na povrchu.





**Obr. 4** Válcový fotobioreaktor [9]

Dalším zástupcem uzavřených systémů je trubkový fotobioreaktor na Obr. 5. V průmyslové praxi je jeho využití velmi časté. Trubky jsou zapojeny za sebou do série a jejich průměr bývá kolem 50 mm. Směr trubek může být vodorovný nebo svislý, v ojedinělých případech mohou být trubky v určitém úhlu oproti základní rovině nebo mohou být různě zatočené. Tok kultivačního média včetně plynu celou hydraulickou tratí obvykle zajišťuje peristaltické čerpadlo. Trubkový fotobioreaktor má však také své limity. Největším problémem je usazování řas na vnitřním povrchu trubek. Čistění těchto úsad je problematické.



**Obr. 5** Horizontální trubkový fotobioreaktor [10]

Deskový fotobioreaktor na Obr. 6 tvoří dva průhledné panely, mezi kterými je úzká komora, ve které dochází k rozmnožování řas. Cirkulaci kultivačního roztoku mezi reaktorem a vyrovnávací nádrží zajišťuje čerpadlo. K nátoku média do komory dochází ve spodní části reaktoru a z horní části komory teče roztok zpět do vyrovnávací nádrže. Ve štěrbině dochází k aeraci a promíchávání řas. Odvod vyprodukovaného kyslíku procesem rozmnožování se nachází v horní části komory.



**Obr. 6** Deskový fotobioreaktor v laboratořích FS ČVUT v Praze.

Vylepšenou verzí deskového výměníku je tzv. „airlift panel“ fotobioreaktor na Obr. 7. V komoře jsou kanálky tvořené záhyby, jež slouží k lepší cirkulaci kultivačního média. Tuto konstrukci uvedla na trh zahraniční firma Subitec.



***Obr. 7 Airlift panel photobioreactor [11]***

Uvedená tabulka 2 shrnuje důležité vlastnosti jednotlivých zařízení. V posledním sloupci tabulky jsou uvedeny omezující či limitující parametry jednotlivých systémů.

**Tab. 2** Porovnání jednotlivých typů kultivačních systémů [12]

Kultivační systém	Výhody	Limitující vlastnosti
<b>Otevřená zařízení</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nízké investiční a provozní náklady</li> <li>• snadná údržba a čištění</li> <li>• využití nezemědělské půdy</li> <li>• snadná obsluha</li> <li>• nízká energetická náročnost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nízká výtěžnost</li> <li>• velká zastavěná plocha</li> <li>• kultivace odolných kmenů</li> <li>• špatná aerace a využití CO<sub>2</sub></li> <li>• hrozí kontaminace</li> </ul>
<b>Válcovitý fotobioreaktor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dobrý přenosu hmoty</li> <li>• nízká energetická náročnost</li> <li>• dobré míchání s nízkým hydrodynamickým napětím</li> <li>• snížená fotoinhibice a fotooxidace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neefektivní osvětlování média</li> <li>• vyšší ekonomické náklady</li> <li>• složitost konstrukce</li> </ul>
<b>Horizontální trubkový fotobioreaktor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• osvětlení velké plochy</li> <li>• vhodné i pro venkovní provoz</li> <li>• jednoduché konstrukční řešení</li> <li>• produkce biomasy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tvorba biofilmu</li> <li>• nerovnoměrná rychlost růstu buněk</li> <li>• velká zastavěná plocha</li> <li>• nerovnoměrnost koncentrace plynu</li> </ul>
<b>Deskový fotobioreaktor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vysoká produktivita biomasy</li> <li>• efektivní přenos hmoty</li> <li>• osvětlení velké plochy</li> <li>• vhodné i pro venkovní druhy mikrořas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kontrola teploty</li> <li>• problematická konstrukce</li> <li>• problém se s „scale-up“ řešením</li> </ul>

Důležitým rozhodovacím kritériem je samozřejmě finanční náročnost kultivačního systému jak z pohledu investičního zatížení, tak i z hlediska provozních a údržbových nákladů. Dle parametru produkce mikrořas na zastavěnou plochu jsou otevřené systémy nejhorsí. Ale z ekonomickém porovnání s ostatními jsou nejméně náročné na provoz i investici. Z hlediska produkce a výtěžnosti se v průmyslovém měřítku preferuje systém trubkového fotobioreaktoru.

## 1.2 Oxid uhličitý CO<sub>2</sub>

Přívod plynu obohaceného o oxid uhličitý do prostoru probublávaného reaktoru je zásadní, protože CO<sub>2</sub> je nezbytný zdroj živin pro život a rozmnožování mikrořas. Od okamžiku kontaktu dodávaného plynu s kultivačním médiem dochází ke dvěma paralelně probíhajícím procesům. Jedním z procesů je fixace CO<sub>2</sub>, který se zachytává přímo na povrchu buněk mikrořas. Zatímco při druhém ději se část plynu rozpouští v kultivačním médiu [8].

Základním stavebním prvkem buněk řas je uhlík, který získávají ze zmíněného oxidu uhličitého. Hmotnostní koncentrace uhlíku v buňce řas dosahuje až 50 %. Pomocí

zjednodušené metody (2) lze popsat průběh chemické reakce fotosyntézy. Z tohoto vztahu vyplývá, že k produkci glukózy (biomasy) je potřeba šest molů  $H_2O$  a šest molů  $CO_2$ . Rovnice (2) též uvádí, že pro rozmnožení 1 g mikrořas (sušiny) je potřeba dodat 1,833 g čistého  $CO_2$  do reaktoru za předpokladu stoprocentní konverze do kultivačního média.

$$\frac{44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} CO_2}{12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} C} \cdot \frac{0,5 \text{ kg C}}{1 \text{ kg glukóza}} = 1,83 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg glukóza}} \quad (2)$$

Produktem procesu fotosyntézy, jak je patrné z rovnice (1), je kyslík a voda. Při kultivaci řas je též nezbytné dbát na přenos produkovaného kyslíku z kultivačního média a jeho odvodu z prostoru celého zařízení. Příliš vysoká koncentrace  $O_2$  v kultivačním médiu by mohla způsobit inhibici vyprodukovaných buněk mikrořas. Ostatní proudící plyn komorou lze využít pro stripování  $O_2$  a jeho odvod z pracovního prostoru. V kultivačních kolonách, které jsou probublávány, se proces přenosu hmoty intenzifikuje právě díky proudícím bublinám plynu [7].

Nízká koncentrace  $CO_2$  v plynu dodávaného do probublávané kolony může mít za následek inhibici buněk. Atmosférický vzduch obsahuje cca 0,039 % obj.  $CO_2$ . Tato hodnota je výrazně menší, než je uváděná doporučená hodnota 8 % (obj.) pro kultivační podmínky [13]. Atmosférický plyn jako zdroj oxidu uhličitého pro optimální kultivaci není příliš vhodný právě kvůli nízké koncentraci. Množství oxidu uhličitého v dodávaném plynu je tedy třeba zvýšit.

Nicméně příliš vysoké hodnoty koncentrace mají za následek snížení pH kultivačního média a též to může vést k zástavě množení kultury. Při vyšší kyselosti mohou řasy začít inhibovat. Dále je důležité přihlédnout k ekonomickému aspektu, protože čistý oxid uhličitý je příliš drahý pro kontinuální provoz. Proto je tedy nezbytné zajistit optimální kultivační a ekonomické podmínky kultivace mikrořas [13].

### 1.3 Cíl práce

Tématem aerace kultivačního média se po celém světě zabývá mnoho výzkumných laboratoří i soukromých firem. Ve farmaceutickém, potravinářském a vodohospodářském průmyslu se aerační systémy pro kultivaci řas úspěšně využívají, avšak pro výrobu biopaliv z této biomasy jsou provozní náklady zatím stále nerentabilní. Podstatnou výhodou

produkce biopaliv třetí generace je spotřeba oxidu uhličitého jakožto odpadního produktu, kterého je v oblasti energetiky a průmyslu velký přebytek.

Aerace fotobioreaktorů je velice důležitá pro přenos hmoty během fotosyntézy při kultivaci mikrořas. Deskové fotobioreaktory mají vysokou výtěžnost produktu. Avšak v současné době je provoz aerace velice nákladný proces a tvoří velkou část provozních nákladů. Zajištění optimální aerace v provozních podmínkách povede zajiště ke zvýšení produkce mikrořas a zároveň ke snížení nákladů na stlačený plyn. Nalezení ekonomicky výhodného systému provzdušňování z odpadního CO<sub>2</sub>, který by sloužil k rozmnožování mikrořas, by vedlo ke snížení uhlíkové stopy na Zemi.

Současné provozní podmínky laboratorního deskového fotobioreaktoru nejsou vhodně nastavené ať už z hlediska kultivačních podmínek, tak i z pohledu provozních nákladů a efektivnosti využití aeračního plynu. Hlavní příčinou takového provozu je nevhodně řešená konstrukce aeračního elementu. To má za následek příliš velký průtok plynu komorou, tedy výrazně nehomogenní režim probublávání. Tyto aerační podmínky nejsou vhodné pro trvalý provoz. Současný stav provozních podmínek je zachycen na Obr. 8.



**Obr. 8** Současný provoz deskového fotobioreaktoru

Cílem této práce je návrh aeračního členu pro deskový fotobioreaktor, který zajistí homogenní aeraci. Dále také poskytnout vhodné aerační prostředí přizpůsobené kritickým podmínkám pro kultivaci mikrořas. Chronologický postup dílčích cílů této práce jsou následně vypsány v bodech:

- průmyslová řešení používaných aeračních elementů,
- analytický rozbor aerace a definování kritických provozních parametrů pro kultivaci mikrořas,
- návrh a konstrukce aeračního elementu dle kritických parametrů,
- testování vyrobených aeračních elementů při provozních podmínkách a kritické zhodnocení experimentu.

## 2 Teoretická část

Provzdušňování neboli aerace kultivačního média je velice důležitý proces pro zajištění kvalitních podmínek pro množení mikrořas. Aerace je děj, při kterém dochází k přenosu hmoty mezi přiváděným plynem a kultivačním roztokem. K přenosu  $\text{CO}_2$  mezi bublinami a mikroorganismy dochází na rozhraní mezi jednotlivými fázemi. Zde hraje roli velikost bublin, resp. její smáčený povrch, a koncentrace  $\text{CO}_2$  v probublávaném plynu. Provzdušňovacích systémů existuje na trhu veliké množství. V následující kapitole jsou vyjmenované a porovnané vybrané systémy, které se v této oblasti průmyslu vyskytují nejčastěji.

Pro úspěšný návrh aeračního elementu je nutné zajistit doporučené výstupní hodnoty parametrů. Mezi hlavní parametry patří tvorba, velikost a rychlost proudících bublin a režim proudění v celém objemu kultivačního aparátu, ve kterém je systém provozován. Dalšími aspekty pro návrh elementu je požadavek na homogenitu probublávání, tj. stejná objemová koncentrace  $\text{CO}_2$  v celém objemu reprodukčního aparátu. Další výhodou homogenního probublávání po celém objemu komory je skutečnost, že proud bublin udržuje mikrořasy ve vznosu a brání jejich sedimentaci a usazování na stěnách aparátu. Při zarůstání celého systému by docházelo ke zhoršení kultivačních podmínek a výtěžnosti celého procesu. Zanesení průsvitných stěn by mělo za následek horší propustnost světla do celého pracovního objemu [14].

### 2.1 Způsoby provzdušňování

V následujících podkapitolách jsou vyjmenované a porovnané vybrané systémy, které se v této oblasti průmyslu vyskytují nejčastěji. Pro tyto účely se využívá základních tří principů. Podle způsobu fungování se dělí na pneumatické, mechanické a hydro-pneumatické systémy. Případně se používá vzájemná kombinace zmíněných způsobů [15].

#### 2.1.1 Pneumatická aerace

Stlačený plyn proudí do prostoru kultivačního reaktoru pomocí dmychadel, ventilátorů či kompresorů. Přivedený plyn do pracovní komory musí být dále roz distribuován tak, aby docházelo ke správnému kontaktu mezi roztokem a směsí plynů. Právě tento distribuční element je klíčový prvek ke správné funkci celého kultivačního



systemu. Celý aerační systém obsahuje zařízení pro pohon plynu, filtr nasávaného vzduchu, rozvodné potrubí či hadice, distribuční element a zařízení pro odvodnění

Distributorů plynu pro pneumatickou aeraci v nádržích či reaktorech existuje celá řada. Elementy se dělí do jednotlivých kategorií podle typu geometrie, konstrukčního uspořádání, pórovitosti či velikost otvorů. Nejčastějšími zástupci jsou např. porézní trubky, perforované desky, membránové a diskové elementy. Vzduchová aerace se rozděluje do skupin (Tab. 3) podle velikosti bublin, který distributor poskytuje [15].

**Tab. 3** Rozdělení typů aerace

<i>Typ aerace</i>	<i>Charakteristický rozměr bubliny (mm)</i>	<i>Typický distributor</i>
Jemnobublinná	1 - 5	Porézní hadice/membrána
Středobublinná	5 - 10	Děrovaná trubka
Hrubobublinná	>10	Otevřené hadice/trubky

### **Jemnobublinná aerace**

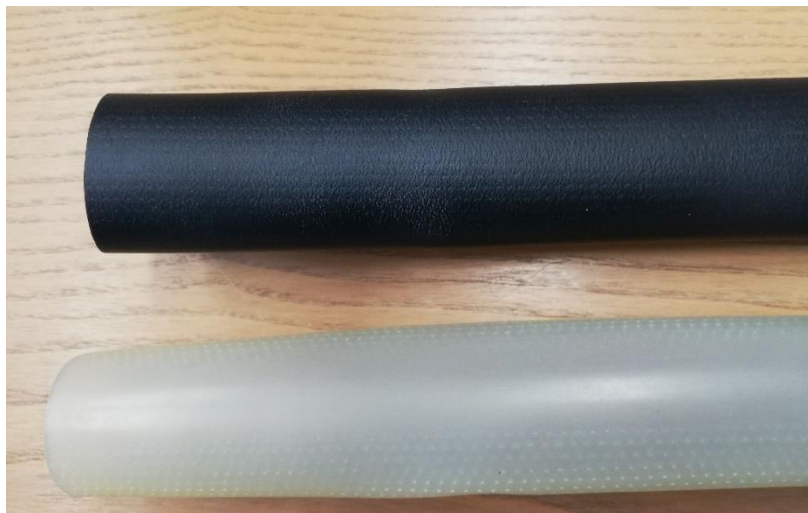
Tento typ aerace je fenoménem dnešní doby, jelikož kladen větší důraz na efektivitu a účinnost přenosu plynu do kapalné vsádky. Díky menším bublinám dochází ke zvětšení mezifázové plochy. Větší plocha vede k lepšímu přestupu hmoty na mezifázovém rozhraní (kapalina-plyn) Menší průměr bubliny zajišťuje její nižší proudící rychlost, tedy delší dobu zdržení v nádobě. Další výhodou je možné zajištění homogenního proudu bublin v celém objemu reaktoru. Jemnobublinné elementy se dále rozlišují podle geometrického uspořádání na bodové, potrubní a velkoplošné. [15]

Typickými zástupci bodových elementů kruhové jsou disky a desky obdélníkového tvaru. Typický diskový element je na Obr. 9.



**Obr. 9** Diskový element iDISC společnosti INVENT [16]

Skupina potrubních elementů je tvořena hadicemi či membránami válcovitého tvaru různých průměrů a velikostí. Hadice (Obr. 10) mohou být připojené na přívodní potrubí samostatně nebo mohou být navléknuty na nosné děrované trubky a tvořit tzv. difuzor. Membrány musí být vždy navléknuty na nosnou trubku, jinak nastane její deformace pod tlakem proudícího plynu.



**Obr. 10** Aerační membrána E-FLEX společnosti Invent

Velkoplošné aerační systémy jsou tvořeny jednotlivými aeračními distributory (hadice, disky), které jsou spojeny konstrukcí do kompaktních celků. Tyto velkokapacitní systémy bývají zapojeny paralelně do kolon a usazeny na dně velkých nádrží.



**Obr. 11** Provdzušňovací systém E-FLEX společnosti INVENT

S příchodem polyuretanových pružných membrán na trh se tato skupina stala dominantní. Výhody těchto membrán oproti korozním materiálům při běžném provozu jsou značné. Jednou z výhod je, že při poklesu tlaku na straně plynu (např. výpadek dmychadla) póry membrány zafungují jako zpětný ventil, uzavřou se.

#### **Středobublinná aerace**

Tato skupina je nejrozšířenější v oblasti zpracování průmyslových vod a ČOV. Zejména se využívá v hlubokých aktivačních nádržích nebo pro stabilizaci kalu. Pro středobublinnou aeraci se využívá ponorných roštů (Obr.12), které jsou tvořeny z páteřní přívodní trubky a následně je plyn rozveden do jednotlivých trubic. Trubice mohou být děrované či potažené středobublinnou polyesterovou membránou. Pokud je dobře navržena rozteč a průměr jednotlivých otvorů, dochází poté k rovnoměrnému rozdělení plynu po celé délce aeračního systému. Provdzušňovací rošty mohou být ukotveny ke dnu nádrže nebo mohou být jen plovoucí. Jejich pracovní výška se pro standardní využití doporučuje 0,25 m od dna nádrže. Průměry děr v trubkách či membránách dosahují hodnot od 5 do 8 mm.



**Obr. 12** Středobublinný systém TEX-FLEX společnosti KUNST [16]

### Hrubobublinná aerace

Typickým konstrukčním řešením pro hrubobublinnou aeraci je trubkový rošt. Trubky mají po své délce navrtané větší otvory. Konce jednotlivých trubek jsou zpravidla otevřené. Předností této skupiny je velký průměr, resp. rychlost bubliny proudící k hladině. Tato skutečnost se využívá v nádrži pro zabránění sedimentace větších shluků biomasy či kalu.

#### 2.1.2 Mechanická aerace

Mechanické provzdušňování je prováděno pomocí rotátorů nebo oběžných kol. Nádrž lze provzdušňovat pomocí vertikálních nebo horizontálních zařízení. Zpravidla je do rotačního aerátoru též přiveden přívod plynu. Přivedený plyn se rozdělí do bublinek díky vzniklému víru od rotačního elementu. Rotační míchadla se dále dělí podle umístění v nádrži na vertikální nebo horizontální [15].

Vertikální míchadla mohou být umístěna na povrchu, kde čeří hladinu a vzniklé síly zajišťují vertikální proudění v dané nádrži. V takovém případě není nutno instalovat přívod plynu do rotačního elementu, ale okolní vzduch se vhání do objemu vsádky. Pro hloubkovou aeraci se používají hyperboloidní míchadla s lopatkami na spodní straně, kam je přiveden dodávaný vzduch. Pomocí lopatek vznikají malé bublinky, které jsou unášeny vsádkou vzniklými víry od míchadla. Tyto rotační aerátory se mohou lišit konstrukčním uspořádáním. Nejčastějším případem je rotační míchadlo spojeno přes hřídel s motorem, který je zavěšen nad hladinou nádrže. Existují i řešení, v nichž jsou míchadla v rámci celého aeračního systému včetně jejich pohonu zcela ponorná. Hlavní výhodou takového řešení je absence pomocných konstrukcí pro zavěšení celého systému. Různá konstrukční uspořádání ponorných rotačních aerátorů lze vidět na Obr. 13.



**Obr. 13** Různá provedení rotačních aerátorů společnosti KUNST [16]

Horizontální aerátory jsou obvykle umístěny na hladině a pomocí speciálních lopatek na rotačním válci čeří vsádku na povrchu. Tím se zamíchává vzduch, který je hladině, do proudícího média. Tento typ aerátoru se obvykle používá v náhonech a oběžných korytech. Rotační element je zároveň horizontálním proudem míchaného média.

K hlavním výhodám mechanické aerace patří konstrukční jednoduchost a spolehlivost. I přestože je možnost regulace velmi omezená (možnost tvorby aerosolu) a energetická účinnost aerace není tak vysoká. Pro míchání kultivačního média není mechanická aerace vhodná kvůli vysokým otáčkám rotačních míchadel a může docházet k mechanickému poškození buněk. Většina druhů mikrořas je velmi labilní vůči působení hydromechanického napětí vzniklého mechanickou aerací.

### 2.1.3 Hydropneumatická aerace

Hydropneumatická aerace pracuje na principu vodní vývěvy, kdy vháněný proud média pomocí čerpadla proudí skrz speciální trysku na dně nádrže. Při průtoku vháněného proudu tryskou dochází k podtlaku. Před touto tryskou je umístěn směšovač, kde též ústí potrubí pro přívod plynu, který je díky vzniklému podtlaku nasáván do proudnice. Celý systém je složen z přívodu kapalného média, ponorného čerpadla, směšovače, sacího potrubí a speciální trysky, v níž vzniká podtlak. Řešení hydropneumatické aerace není komplikované a jednoduché na údržbu. Mezi hlavní nevýhodu patří relativně vysoká energetická náročnost, horší účinnost provzdušnění a omezený směr proudu. Tímto samotným systémem nelze zajistit homogenitu probublávání v celém objemu vsádky [15].

#### 2.1.4 Kombinovaná aerace více systémů

Výše uvedené systémy lze navzájem kombinovat a využít jejich hlavní výhody aerace v rámci komplexního provzdušňovacího řešení (Obr. 14). Příkladem kombinovaného řešení je oběhová aktivační nádrž, v níž lze vidět kombinaci horizontálního ponorného míchadla neboli akceleratoru proudění a jemnobublinného aeračního roštu, případně povrchového aerátoru. Kombinovaný systém je velmi dobře regulovatelný s vysokou aerační účinností. Avšak nevýhodou komplexního systému je jeho složitost a individuální přístup ke každému řešení. Počáteční investice takového řešení jsou značně nákladná.



**Obr. 14** Kombinovaný systém pomocí akceleratoru a povrchové aerace [16]

#### 2.1.5 Porovnání jednotlivých druhů aerace

Tabulka 4 porovnává jednotlivé druhy aerace z pohledu využití pro různé aplikace.

**Tab. 4** Porovnání jednotlivých druhů aerace [17]

parametr	druh aerace		
	pneumatická	mechanická	hydropneumatická
jemnobublinné proudění	+	0	∅
středobublinné proudění	+	+	+
hrubobublinné proudění	+	+	+
regulace	+	+	0
laminární režim	+	0	∅
turbulentní režim	+	+	+
homogenní v celém objemu	+	∅	∅
heterogenní proudění	+	+	+
povrchová aerace	∅	+	∅
malá tlaková ztráta	+	+	0
přítomnost čerpadla/motoru	∅	+	+
<b>legenda</b>	<i>vhodné</i>	<i>lze použít</i>	<i>nevhodné</i>
	+	0	∅

Z výše uvedené tabulky je patrné, že pneumatická aerace je v porovnání s ostatními metodami nejvíce univerzální. Široká nabídka na trhu s pneumatickými aeračními elementy zajišťuje velké množství konstrukčních variant a způsobu řešení. Ale použití pneumatického systému pro každou aplikaci není vždy vhodné, ani ekonomicky výhodné. Pro správný návrh aeračního systému je vždy nezbytné prověřit veškeré parametry individuálně.

## 2.2 Rozbor problematiky provzdušňování

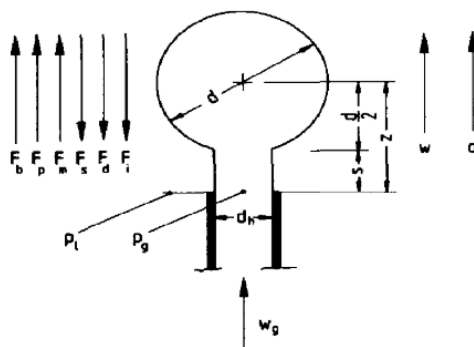
Důležité parametry pro správný návrh aeračního systému se týkají velikosti a tvorby bublin, homogenního proudění bublin a jejich rychlosti, resp. smykového napětí na povrchu bublin. Cílem této kapitoly je nalezení závislosti mezi průměry pórů a velikosti vznikajících bublin v potřebném rozsahu platnosti.

### 2.2.1 Teorie vzniku bublin

Disperze plynu do bublin je klíčový děj pro přenos hmoty. Celý proces aerace kultivačního média závisí na tvorbě bublin potřebné velikosti a tvaru. Za účelem predikce tvorby bublin vzniklo mnoho výpočetních modelů a rovnic podložené řadou experimentů. Avšak všechny výpočetní modely a rovnice pro predikci bublin mají své rozmezí platnosti. Tato práce vychází z řady experimentů se zaměřením na konstantní průtok plynu

reaktorem a kruhovým otvorem průtočného póru. Přesná predikce průměru bubliny je velice důležitá pro návrh aeračního elementu, resp. celého aeračního systému [18].

Velikost vzniklé bubliny závisí na mnoha faktorech, jimiž jsou různé síly, geometrie póru a fyzikální vlastnosti plynu a kapaliny. Podstatu vzniku bubliny shrnuje Obr. 15. Proces od vzniku až po odtrhnutí bubliny od hrdla je dělen do více fází. Na počátku je bublina připojena k hrdlu až do chvíle, kdy výslednice vztlakových sil převýší odporové síly. Tato fáze se nazývá expanzí. Dále bublina zvětšuje svůj objem a bublina se zvedá, zatím co okraje jsou stále připojeny k hrdlu. Pak nastává oddělovací fáze, kdy se bublina odtrhne od póru membrány. Bezprostředně po oddělení dochází k deformaci bubliny. V tento okamžik nastává problém určení objemu odtrhované bubliny, protože nelze vycházet ze sférického modelu, resp. průměru. Je tedy nutné brát v úvahu nejen rovnováhu sil (12), ale i geometrii daného póru (hrdla).



**Obr. 15** Tvorba bublin závisí na mnoha parametrech [18]

Jak již bylo zmíněno, průběh vzniku bubliny a její výsledná velikost závisí na vzájemné bilanci jednotlivých sil. Účinky jednotlivých sil jsou rozepsány následovně.

Vztlakovou sílu  $F_b$  [N] je možné určit ze vztahu (3)

$$F_b = \frac{\pi}{6} d_b^3 (\rho_L - \rho_g) g \quad (3)$$

kde  $d_b$  [m] je průměr bubliny,  $\rho_L$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] je hustota kapaliny,  $\rho_g$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] je hustota aeračního plynu a  $g$  [ $\text{m s}^{-2}$ ] je gravitační zrychlení.

Tlaková síla  $F_p$  [N] může být určena rovnicí (4)



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

kde  $d_h$  [m] je průměr póru,  $p_l$  [Pa] je tlak kapaliny v reaktoru,  $p_g$  [Pa] je tlak přiváděného aeračního plynu.

Sílu od povrchového napětí  $F_m$  [N] je popsána v rovnici (5)

$$F_m = \frac{\pi}{4} d_h^2 \rho_g u_g^2 \quad (5)$$

kde  $d_h$  [m] je průměr póru,  $\rho_g$  [kg m<sup>-3</sup>] je hustota aeračního plynu a  $u_g$  [m s<sup>-1</sup>] je mimovrstvová rychlost plynu.

Sílu od povrchového napětí  $F_s$  [N] je možné určit z rovnice (6)

$$F_s = \pi d_h \sigma \quad (6)$$

kde  $d_h$  [m] je průměr póru a  $\sigma$  [N m] je povrchové napětí mezi fázemi kapaliny a plynu.

Odporová síla  $F_d$  [N] může být určena z rovnic (7) až (9)

$$F_d = \frac{\pi}{4} d_b^2 c_d \frac{u_b^2}{2} \quad (7)$$

$$Re = \frac{u_b d_b \rho_L}{\mu_L} \quad (8)$$

$$c_d = \frac{24}{Re} \quad (9)$$

kde  $d_b$  [m] je průměr bubliny,  $c_d$  [-] je odporový součinitel prostředí a  $u_b$  [m s<sup>-1</sup>] je rychlost bubliny plynu. Pro výpočet odporového součinitele  $c_d$  [-] z rovnice (9) je nejprve potřeba zjistit Reynoldsovo číslo  $Re$  z rovnice (8) a potvrdit předpoklad proudění v Stokesově oblasti ( $Re < 2$ ). Reynoldsovo číslo je možné určit pomocí rychlosti bubliny plynu  $u_b$  [m s<sup>-1</sup>], průměru bubliny  $d_b$  [m], hustoty kapaliny  $\rho_L$  [kg m<sup>-3</sup>] a dynamické viskozity  $\mu_L$  [Pa s] [18].

Setrvačná síla  $F_i$  [N] může být určena z rovnic (10) až (11)

$$F_i = (\rho_g V_b + \rho_L V_1) \quad (10)$$

$$V_1 = \frac{11}{16} V \quad (11)$$

Kde  $V_b$  [m<sup>3</sup>] je výsledný objem bubliny a  $V_1$  [m<sup>3</sup>] je objem kapaliny spojený se vznikem bubliny. Parametr  $V$  [m<sup>3</sup>] je výsledný objem bublin při jejím odtržení od póru.

Rovnováha sil působících na výslednou velikost bublin je zapsána rovnicí (12)

$$F_b + F_m = F_s + F_d + F_i \quad (12)$$

Úprava rovnice (12) a následné vyjádření parametru velikosti bublin  $d_b$  [m] včetně dosazení parametrů substituce (14) až (16) lze zapsat v následném vztahu (13)

$$d_b^3 = S + \frac{L}{d} + \frac{T}{d_b^2} \quad (13)$$

Odvození obecného vztahu (13) slouží pro výpočet průměru vznikajících bublin prouděním plynu. Zjednodušené členy substituce S, L a T lze pro malý až střední tlak plynu následně vyjádřit rovnicemi (14) až (16) [18].

$$S = \frac{6 d_h \sigma}{\rho_L g} \quad (14)$$

$$L = \frac{81 v_L \dot{V}}{\pi g} \quad (15)$$

$$T = \frac{135 \dot{V}^2}{4 \pi^2 g} \quad (16)$$

kde  $v_L$  [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ] je dynamická viskozita kapaliny a  $\dot{V}$  [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] je průtok plynu.

Velké množství experimentů s různými provozními podmínkami bylo porovnáno s teorií. Výsledky tohoto porovnání potvrzují, že při menších hodnotách průtoku plynu je rozdíl marginální. Při hodnotách průtoku odpovídající přechodovému a heterogennímu režimu proudění dochází k odchylce až  $\pm 10$  %. Pro větší rozmezí platnosti odvozeného vztahu (větší rozmezí viskozity a průtoku plynu) je zavedena korelace do předchozí rovnice (13) podle experimentů za různých provozních podmínek. Výsledný tvar odvozeného vztahu se zavedenou korelací je popsán rovnicí (17) [18].

$$d_b = \left[ (S)^{\frac{4}{3}} + L + (T)^{\frac{4}{5}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (17)$$

Koncový tvar rovnice (18) pro výpočet průměru bubliny po dosazení substituce (14) až (16)

$$d_b = \left[ \left( \frac{6 d_h \sigma}{\rho_L g} \right)^{\frac{4}{3}} + \left( \frac{81 v_L \dot{V}}{\pi g} \right) + \left( \frac{135 \dot{V}^2}{4 \pi^2 g} \right)^{\frac{4}{5}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

Rozsah platnosti rovnice (18) v homogenním a přechodovém režimu proudění je ověřený mnoha experimenty [18].

Odvezených rovnic pro určení velikosti bublin existuje celá řada, avšak většina z nich má menší rozsah platnosti. Například následující vztah v rovnici (19) je jednodušší, ale je platná pouze pro homogenní režim proudění. Zde je patrné, že výsledný průměr bublin závisí především na velikosti póru porézní membrány [19]

$$d_b = \left[ \frac{6 d_h \sigma}{g (\rho_L - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

kde  $d_h$  [m] je průměr póru,  $\sigma$  [N m] je povrchové napětí mezi fází kapaliny a plynu,  $g$  [ $\text{m s}^{-2}$ ] je gravitační zrychlení,  $\rho_g$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] je hustota aeračního plynu a  $\rho_L$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] je hustota kapaliny.

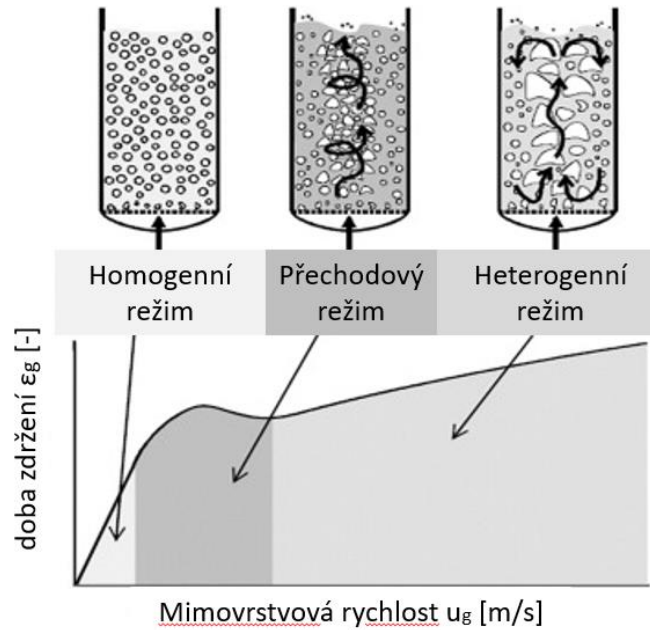
### 2.2.2 Dvofázové proudění

V uzavřených fotobioreaktorech zpravidla dochází k proudění dodávaného plynu skrz kultivační médium. Proudící plyn v kapalině společně tvoří dvofázovou vsádku. Podle dodávaného množství plynu, resp. průtoku, lze rozlišovat typ režimu proudění. Doba zdržení plynu a rychlost proudících bublin v aparátu spolu tvoří charakteristiku režimu proudění (Obr. 16). Doba zdržení  $\varepsilon_g$  [-] je bezrozměrná veličina a lze jí stanovit pomocí změny výšky hladiny popsané v rovnici (20). Změna výšky hladiny kapaliny je rovná objemu plynné fáze v kapalině [20].

$$\varepsilon_g = \frac{(H - H_0)}{H} \quad (20)$$

kde je  $H$  [m] je aktuální výška hladiny a  $H_0$  [m] je počáteční výška hladiny bez přiváděného aeračního plynu.

Režimy proudění se dělí na homogenní, přechodové a heterogenní.



**Obr. 16** Závislost doby zdržení plynu na jeho rychlosti [21]

Homogenní režim nastává při nízkých rychlostech proudícího plynu. Charakteristická velikost bublin je do velikosti 5 mm a jejich distribuce je rovnoměrná po celém objemu reaktoru. Malé bubliny poskytují velký kontaktní povrch obou fází. Tento režim je zpravidla vyžadován z důvodu nejvyšší účinnosti přenosu hmoty. Prahová hodnota rychlosti bubliny plynu pro přechod z homogenního do přechodového režimu činí  $0,04 \text{ m s}^{-1}$  (platí pro rozhraní vzduch/voda,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [22].

Při vyšší rychlosti vzniká přechodový režim. Zde se objevují znaky nepravidelného proudění, tvoří se místy větší bubliny a vznikají malé víry. V tomto případě zpravidla mírně klesá doba zdržení i přes vyšší rychlost. Důvodem je spojování malých bublin do větších, tedy dochází ke zmenšení měrného objemu. Počáteční hodnota rychlosti pro plně vyvinutý heterogenní režim činí  $0,125 \text{ m s}^{-1}$  (platí pro rozhraní vzduch/voda,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Heterogenní režim disponuje velkými bublinami, velkou rychlostí proudícího plynu a nerovnoměrnou distribucí [20].

Pro stanovení doby zádrže plynu existuje v literatuře mnoho korelací. Vybrané korelace rovnice (22) až (25) pro homogenní režim proudění jsou uvedeny v tabulce 5. Kde  $u_g$  [ $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ] je mimovrstvová rychlost plynu a  $\mu_L$  [Pa s] je dynamická viskozita kapaliny. Vztah pro výpočet mimovrstvové rychlosti (rovnice (21)) je dán podílem objemového průtoku plynu  $\dot{V}$  [ $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ] komorou a průtočnou plochou testovacího reaktoru  $A$  [ $\text{m}^2$ ] [14]

$$u_g = \frac{\dot{V}}{A} \quad (21)$$

**Tab. 5** Vybrané korelace pro stanovení doby zdržení  $\varepsilon_g$  [14]

Autor	korelace	rozsah platnosti
Bouafi a kol.	$\varepsilon_g = 3,66 u_g^{0,83}$ (22)	homogenní režim proudění
Uysal a kol.	$\varepsilon_g = 0,877 u_g^{0,67}$ (23)	homogenní režim proudění
Zedníková a kol.	$\varepsilon_g = 0,765 u_g^{0,603}$ (24)	homogenní režim proudění
Godbole a kol.	$\varepsilon_g = 0,319 u_g^{0,476} \mu_L^{-0,058}$ (25)	homogenní režim proudění

### 2.2.3 Fixace CO<sub>2</sub> v kultivačním médiu

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, oxid uhličitý je důležitý nutrient a zdroj uhlíku pro kultivaci mikrořas. Tato kapitola obsahuje souhrn měřitelných parametrů procesu kultivačního roztoku a rozbor metod určující množství zachyceného uhlíku na povrchu řas.

Zjednodušená metoda výpočtu zachytu oxidu uhličitého je popsána v kapitole 1.2 a vyjádřena rovnicí bilancí hmoty fotosyntézy (2). Tato jednoduchá metoda není zcela přesná a uvádí pouze orientační množství spotřeby oxidu uhličitého při kultivaci. Vždy je však třeba brát v úvahu konkrétní druh pěstovaných řas a podmínky, za jakých rozmnožování probíhá.

Přesnější metodu výpočtu množství zachytu CO<sub>2</sub> na povrchu řas představuje rovnice (26), v níž je ale zapotřebí znát hodnoty koncentrace  $C$  [g l<sup>-1</sup>] a produktivity  $P$  [g l<sup>-1</sup> den<sup>-1</sup>] biomasy.  $M_C$ ,  $M_{CO_2}$  značí molární hmotnost dané molekuly uhlíku, resp. molekuly oxidu uhličitého [g mol<sup>-1</sup>] [13].

$$CO_{2,fix} = C P \left( \frac{M_{CO_2}}{M_C} \right) \quad (26)$$

Platnost předchozí rovnice byla potvrzena experimentem [13]. Závěr zmiňovaného experimentu přinesl velice zajímavé výsledky (Tab. 6, 7) uvedené níže. Předmětem měření byly 2 stejné reaktory se stejnou vsádkou *Chlorella Vulgaris*. Aeračním plynem byl smíchaný vzduch s CO<sub>2</sub> o koncentraci 4 % (obj.), resp. 8 % (obj.). Jedná se o záznam koncentrace a produktivity řas obou reaktorů během deseti dnů. Z tabulky dat je patrné, že nejvyšší

koncentrace řas při desátém dnu experimentu dosáhla hodnoty 3,33 [g l<sup>-1</sup>], při koncentraci 8 % CO<sub>2</sub>.

**Tab. 6** Srovnání koncentrace a produktivity *Chlorella vulgaris* při různé koncentraci CO<sub>2</sub> ve vstupním plynu [13]

Den	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Koncentrace CO <sub>2</sub>					4 %					
Koncentrace řas [g l <sup>-1</sup> ]	0,40	0,60	0,70	0,80	1,30	1,81	2,58	2,89	3,00	3,15
Produkce řas [g l <sup>-1</sup> den <sup>-1</sup> ]	0,00	0,20	0,10	0,10	0,50	0,51	0,77	0,31	0,11	0,15
Koncentrace CO <sub>2</sub>					8 %					
Koncentrace řas [g l <sup>-1</sup> ]	0,33	0,93	1,13	1,55	1,68	2,20	2,56	3,12	3,25	3,33
Produkce řas [g l <sup>-1</sup> den <sup>-1</sup> ]	0,00	0,60	0,19	0,40	0,16	0,56	0,36	0,56	0,13	0,08

Výše zmíněný experiment ukazuje rozdíl v hodnotách spotřeby CO<sub>2</sub> pro kultivaci biomasy pro jednotlivé metody výpočtu. M1 označuje zjednodušený výpočet (kapitola 1.2), M2 náleží pokročilé přesnější experimentální metodě (26). Výsledný rozdíl uvedených metod je značný (Tab. 7). Z této skutečnosti vyplývá, že záchyt oxidu uhličitého je ve skutečnosti téměř poloviční oproti zjednodušené metodě.

**Tab. 7** Porovnání teoretického a naměřeného množství záchytu CO<sub>2</sub> v kultivačním médiu obsahující *Chlorella vulgaris* při různých hodnotách koncentrace CO<sub>2</sub> v dodávaném plynu [13]

Výpočet M1 [g <sub>CO2</sub> l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]		Výpočet M2 [g <sub>CO2</sub> l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	
4 %	8 %	4 %	8 %
0,0	0,0	0,00	0,00
0,4	1,1	0,18	0,55
0,2	0,3	0,09	0,17
0,2	0,7	0,09	0,37
0,9	0,3	0,46	0,15
0,9	0,9	0,47	0,48
1,4	0,6	0,71	0,33
0,6	1,0	0,28	0,51
0,2	0,2	0,10	0,12
0,3	0,1	0,14	0,07

Doporučená hodnota koncentrace CO<sub>2</sub> v dodávaném plynu pro kultivaci *Chlorella vulgaris* je 8 % (obj.). Pro většinu studií je stanovení spotřeby oxidu uhličitého dostatečný

parametr pro návrh aeračního systému. Při podrobnějším pohledu na proces přenosu hmoty v bioreaktorech je třeba hlubšího rozboru. Přenos hmoty v bioreaktorech je klíčový proces všech aeračních systémů. Rychlost přenosu hmoty na jednotku objemu reaktoru na mezifázovém rozhraní se řídí především koeficientem přenosu hmoty  $k_L a$ . V případě aeračních kolon je zásadně proměnný parametr mezifázový povrch  $a$ . Za předpokladu kulového tvaru a Sauterova středního průměru bubliny  $d_{32}$  lze spočítat mezifázový povrch dle následujícího vztahu (27).

$$a = \frac{6 \varepsilon_g}{d_{32}(1 - \varepsilon_g)} \quad (27)$$

kde  $\varepsilon_g$  [-] doba zdržení proudícího plynu a  $d_{32}$  [m] je Sauterův střední průměr bubliny, který může být určen následujícím vztahem (28) [23]

$$d_{32} = \frac{\sum_i^N n_i d_b^3}{\sum_i^N n_i d_b^2} \quad (28)$$

de  $n_i$  je počet bublin a  $d_b$  [m] průměr bubliny

Samotný parametr  $k$  se však určuje velmi zřídka a této problematice se mnoho vědců nevěnuje. Cílem většiny experimentů je stanovení celého koeficientu přenosu hmoty, nikoliv jeho dílčích parametrů. Pro získání koeficientu přenosu hmoty bylo odvozeno mnoho korelací [14].

#### 2.2.4 Mechanické namáhání

Mikrořasy jsou velice citlivé organismy. Vysoké hodnoty tečného napětí na povrchu řas způsobené intenzivním mícháním či aerací může vést k jejich mechanickému poškození. Při navrhování aeračního zařízení je třeba kontrolovat kritické hodnoty tečného napětí pro daný provoz a konkrétní kmen mikrořas. Hodnoty tečného napětí lze vypočítat pomocí Newtonova zákona viskozity (29). Zákon stanovuje vztah mezi tečným napětím  $\tau$  [Pa] v tekutině a smykovou rychlostí  $\gamma_{aeration}$  [ $s^{-1}$ ] v newtonské tekutině [24].

$$\tau = \mu_L \gamma_{aeration} \quad (29)$$

Hodnotu smykové rychlosti  $\gamma_{aeration}$  [ $s^{-1}$ ] lze spočítat pomocí rychlosti proudící bubliny  $u_b$  [ $m s^{-1}$ ] a jejího průměru  $d_b$  [m]

$$\gamma_{aeration} = \frac{2 u_b}{d_b} \quad (30)$$

Na tomto vztahu lze pozorovat, že čím je průměr bubliny menší, tím je větší smyková rychlost [7][24]. Kritickou hodnotu tečného napětí  $\tau_{crit}$  pro *Chlorella Vulgaris* lze vyhledat v příloze 1, která shrnuje přehled experimentálně získaných hodnot z mnoha výzkumů. Lze též vidět, že kritické hodnoty jednotlivých druhů řas se výrazně liší. Proto je důležité při návrhu aeračního elementu přihlídnout ke konkrétnímu druhu mikroorganismu [24].

### 2.3 Aerační elementy pro pneumtické provzdušňování

Tato kapitola předkládá souhrn aeračních elementů používaných v průmyslu a testovaných v laboratorních podmínkách se zaměřením na jemnobublinnou aeraci. Nejvhodnější volba pro provzdušňování kultivačního média v bioreaktorech se jeví pneumtická aerace z důvodu šetrnosti k buňkám mikrořas. Následně jsou popsány jednotlivá zařízení ze skupiny pneumtické aerace, jejich konstrukční řešení a dominantní výhody.

#### 2.3.1 Aerační membrána PUM68

Polyuretanová membrána PUM68 (Obr. 17) je výrobek společností Vodní energie, s.r.o. Jemná perforace této membrány zajišťuje tvorbu malých bublin odpovídající jemnobublinné aeraci. Díky vlastnostem konstrukčního materiálu je membrána velice pružná a odolná vůči chemickému a mikrobiálnímu složení kultivačního média.



**Obr. 17** Aerační membrána PUM 68 společnosti Vodní energie, s.r.o. [25]

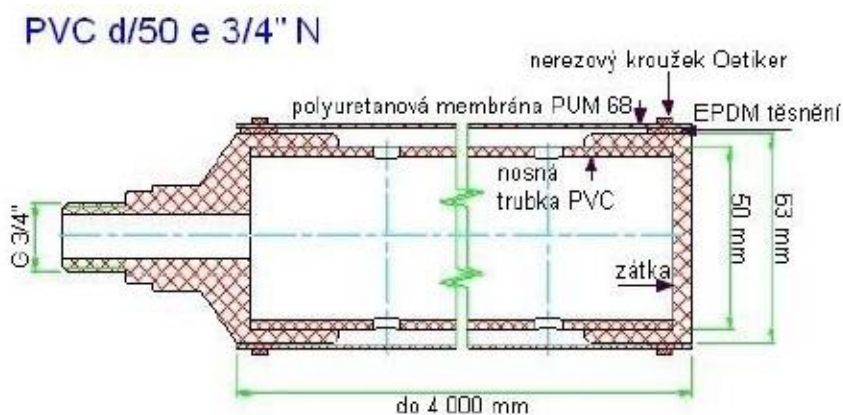


### Doporučené provozní podmínky

Při doporučeném průtoku vzduchu  $2,5 - 8,0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (objem proudícího plynu na 1 metr délky membrány za 1 hodinu) a rovnoměrném pokrytí dna nádrže zajišťuje membrána rovnoměrnou distribuci bublin v reaktoru. Doporučená teplota vsádky v reaktoru se pohybuje do  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Teplota proudícího plynu skrz membránu by neměla překročit hranici  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výrobce nedoporučuje dlouhodobé vystavení membrány UV záření, které značně snižuje její životnost.

### Konstrukční provedení

Zkrácená membrána tvoří tzv. rukáv, který je navléknutý na nosnou děrovanou trubku z PVC nebo PP. Konce rukávu jsou utěsněny k nosné trubce nerezovými těsnícími kroužky. Přívodní trubka je na jednom konci opatřena přípojným konektorem a druhý konec je zaslepen zátkou. Konektor je obvykle opatřen závitovým připojením podle potřeb cílového zákazníka. Tyto elementy jsou montovány na páteřní rozvodné potrubí, které spolu tvoří aerační rošt. Typické konstrukční řešení je na Obr. 18.



**Obr. 18** Konstrukce elementu s membránou PUM68 [25]

Hlavní výhodou polyuretanové membrány je jednoduchá instalace, snadná údržba a dlouhá životnost při správném používání. Pořizovací cena membrány se pohybuje cca  $350 \text{ Kč m}^{-1}$ .

### 2.3.2 Porézní trubka (HDPE)

Porézní trubka (Obr. 19) je vyrobena z vysoko hustotního polyethylenu (HDPE) americkou společností Alita Industries, Inc. Ve struktuře materiálu mohou být velmi malé póry o průměrné velikosti až  $1 \text{ }\mu\text{m}$ , které zajišťují distribuování plynu do velmi jemných

bublinek. Velikost průměrných pórů se liší podle potřeb koncového zákazníka. Porézní trubky z HDPE jsou velmi pevné a jejich využití v průmyslu je velice široké, zejména v hospodářském, potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Především díky vysoké chemické odolnosti. Jemná pórovitost trubek může zastávat i funkci filtrace.



**Obr. 19** HDPE porézní trubka společnosti Alita Industries, Inc. [26]

#### Doporučené provozní podmínky

Provozní teplota může být až 82 °C, v krátkých intervalech dokonce až 116 °C. Pevnější materiál, než mají membrány, poskytuje možnost pracovat za vyššího přetlaku. Tlaková ztráta při doporučených podmínkách je 3 – 8 kPa.

#### Konstrukční provedení

Společnost Alita Industries vyrábí HDPE trubky ve standartních velikostech podle normy ASME. Trubky se dále mohou připojit na pátevní potrubí v libovolném geometrickém uspořádání. Přehled standartně dodávaných trubek je v tabulce 8 níže.

**Tab. 8** Přehled HDPE trubek firmy Alita Industries, Inc [26]

MODEL	VELIKOST	VNĚJŠÍ PRŮMĚR	VNITŘNÍ PRŮMĚR	DĚLKA	MATERIÁL	PRŮMĚRNÁ VELIKOST PÓRU
HPT-050	1/2" Schedule 40	0.830" / 0.860"	0.605" / 0.635"	48"	HDPE	20 – 40 μm
HPT-075	3/4" Schedule 40	1.030" / 1.070"	0.790" / 0.830"	48"	HDPE	20 – 40 μm
HPT-100	1" Schedule 40	1.260" / 1.320"	0.940" / 0.980"	48"	HDPE	20 – 40 μm
HPT-200	2" Schedule 40	2.325" / 2.405"	1.850" / 1.895"	48"	HDPE	20 – 40 μm
HPT-D50	1/2"	1/2"	1/4"	36"	UHMW-PE	20 μm
HPT-D75	3/4"	3/4"	1/2"	36"	UHMW-PE	20 μm

Materiálové a chemické vlastnosti porézních HDPE trubek zajišťují jejich velkou popularitu mezi zákazníky napříč mnoha obory průmyslu. Ale pořizovací cena těchto trubek je velmi vysoká cca 1 200 Kč m<sup>-1</sup>.

### 2.3.3 Porézní membrána JetFlex Jaeger

Membrána JetFlex je produkt německé společnosti Jaeger Umwelt-Technik. Doporučený provozní tlak zajišťuje tvorbu malých bublin odpovídající jemnobublinné aeraci. Membrána v provedení se speciálním konektorem k rozvodnému potrubí je vidět na Obr. 20.



**Obr. 20** Porézní hadice JetFlex společnosti Jaeger [27]

#### **Doporučené provozní podmínky**

Doporučený průtok plynu skrz porézní membránu se pohybuje v rozsahu 1 - 1,5 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Tlaková ztráta činí 3 - 5 kPa při doporučeném průtoku. Materiál ethylen-propylen-dimeruretathan (EPDM) je vhodný pro velký rozsah pracovních teplot, jeho chemická odolnost je velmi dobrá.

#### **Konstrukční provedení**

Výrobce používá jako konstrukční materiál syntetickou gumu EPDM, případně také dodává membrány ze silikonu. Membrána se může navléknout na nosnou děrovanou trubku, stejně jako v případě polyuretanové membrány. Díky větší pevnosti materiálu lze též membránu natáhnout mezi rozvodné potrubí a v místě připojení řádně utěsnit. Společnost dodává na trh membrány o vnějším průměru 63 mm, v limitované sérii pak s průměrem 34,5 mm (Obr. 21).

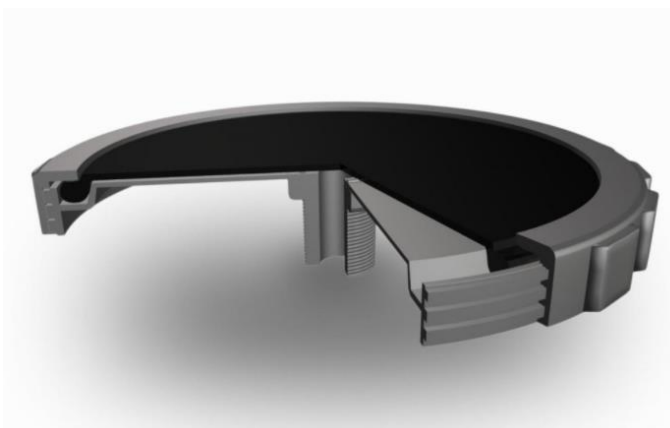


**Obr. 21** JetFlex EPDM membrána společnosti Jaeger

Hlavní výhodou perforované hadice JetFlex je dlouhá životnost při různých provozních podmínkách a také její pořizovací cena 235 Kč m<sup>-1</sup>.

#### 2.3.4 Diskový element FlexAir

Pneumatický aerační element vyráběný společností Envi-Pur je vhodný pro použití jemnobublinné aerace. Využití diskového elementu je velmi časté v oblasti ČOV, při aeraci chovatelských nádrží či k pneumatické flotaci. Diskový element s EPDM (ethylen-propylen-dimeruretathan) membránou je zobrazen na Obr. 22.



**Obr. 22** Aerační element společnosti ENVI-PUR [28]

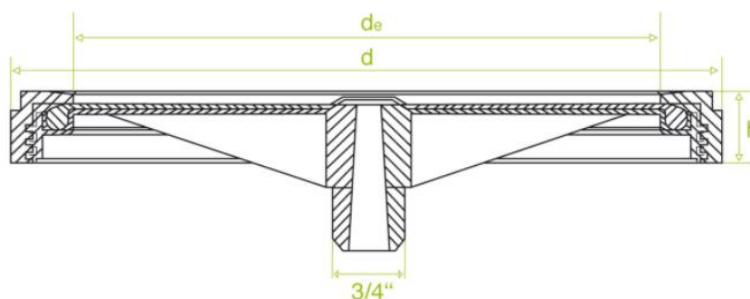
#### Doporučené provozní podmínky

Konstrukční materiál (EPDM, případně EPDM s teflonovým povrchem) porézní membrány v horní části element zaručuje použití v různorodých extrémních podmínkách. Element je možné umístit do hloubky až 8 metrů. Specifický průtok plynu se pohybuje v rozmezí od 0,9 – 22,1 Nm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, podle voleného průměru elementu. Výrobce zaručuje nízké

tlakové ztráty při průtoku dodávaného plynu. Nejvyšší ztráty tlaku garantuje výrobce do hodnoty 6 kPa při dodržení doporučených provozních podmínek.

### Konstrukční provedení

Aerační systém tvořený elementy a rozvodným potrubím se pevně kotví ke dnu nádrže. Standartní instalace je taková, že aerační deskové elementy jsou osázené rovnoměrně na rozvodném potrubí po celém dnu. Elementy se standartně vyrábí o průměru 220 – 330 mm. Tělo je standartně opatřeno připojovacím závitem o velikosti 3/4". Aerační prvek má integrovanou zpětnou klapku pro zamezení vtoku média při poklesu tlaku dodávaného plynu. Průřez diskového elementu je na Obr. 21.



**Obr. 23** Diskový element společnosti Envi-Pur [28]

Výhodou elementu je téměř bezúdržbový provoz a velice snadná instalace na připravené rozvodné potrubí. Orientační pořizovací cena je 1 500 Kč.

## 2.4 Návrh aeračního elementu

V odborné literatuře lze najít doporučené a kritické hodnoty parametrů pro dosažení optimálních hodnot kultivace mikrořas. Limitními parametry pro návrh jsou průtok aeračního plynu a tečné napětí vznikající na povrchu proudících bublin. Hodnoty parametrů pro zajištění optimálních podmínek kultivace pro jednotlivé druhy řas byly stanoveny empiricky. Na základě mnoha provedených experimentů vědců z celého světa je vytvořen souhrn vyhodnocených dat v příloze 1. Jak již bylo zmíněno, pro tuto práci byl zvolen druh mikrořas *Chlorella vulgaris*. Pro tento druh je navrhován aerační element. Limitní hodnotou průtoku dle přílohy je 0,16 vvm a kritická hodnota tečného napětí činí 0,9 Pa.

Pro deskové fotobioreaktory není na trhu žádný konvenční element, který by zajišťoval homogenní probublávání kolony v celém jejím průřezu. Největším limitem v této

oblasti je vzdálenost průsvitných desek kultivační komory, která standartně bývá 50 mm. Používané elementy v průmyslu mají větší rozměry. Žádný výrobce porézních membrán neposkytuje informace o velikosti pórů vlastní membrány. Poddajný konstrukční materiál zajišťuje postupné otevírání pórů v závislosti na průtoku dodávaného vzduchu do aeračního systému. Za tímto účelem je nutno navrhnout takový element, který bude geometricky vhodný k použití v deskovém reaktoru.

#### 2.4.1 Vybrané membrány pro experiment

Výběr používaných distribučních membrán pro experimentální část práce, včetně základních parametrů, je uveden v tabulce 9.

**Tab. 9** Výběr trubkových aeračních membrán pro experimentální část práce

Název	Rozměr [mm]	Počet pórů/m	Materiál
Membrána JetFlex - Jaeger (EPDM)	34,5 x 2,2	13 500	EDPM
Membrána PUM68 - Vodní energie	68 x 0,3	15 600	polyuretan
Membrána E-Flex - Invent (EPDM)	34,5 x 2,2	10 800	EPDM
Membrána E-Flex - Invent (Silicone)	34,5 x 2,2	8 360	silikon

Výsledky z experimentálního testování jednotlivých membrán bude následně sloužit pro jejich vzájemné porovnání.

### 3 Praktická část

Cílem praktické části této práce je návrh a konstrukce takových aeračních elementů, které budou vyhovovat všem kritickým parametrům dle teoretické analýzy a využití vybraných porézních membrán k experimentálnímu měření. Dílčím cílem je vyhodnocení experimentálně naměřených dat a jejich porovnání s vybranými korelacemi dle literární rešerše.

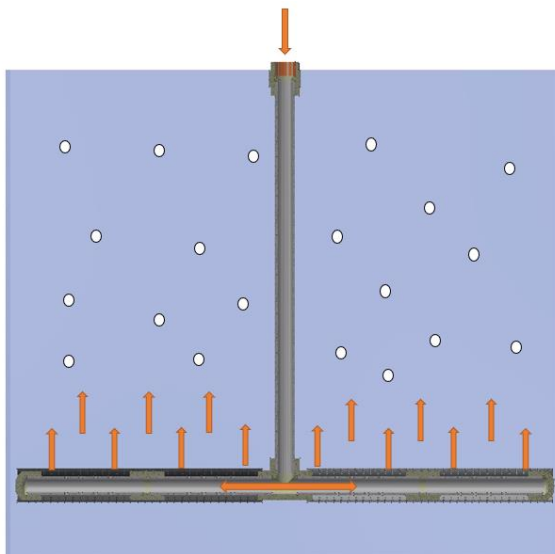
Základní požadované provozní parametry zkušebního aeračního systému vychází z kapitoly 2.4 v teoretické části a z velikosti testovacího reaktoru. Objem aerační komory je 20 litrů a doporučená hodnota průtoku dle literatury je 0,16 vvm, tedy 3,2 L h<sup>-1</sup>. Průtokoměr je volen dle požadovaného rozsahu a přesnosti měření. Stanovené parametry pro experiment jsou shrnuty v následující tabulce 10.

**Tab. 10** Základní parametry pro experimentálního měření.

Název	Hodnoty
Objem testovací reaktoru	20 litrů
Vnitřní rozměry probublávané komory	(šířka x výška x hloubka) 0,6 x 0,52 x 0,065 m
Rozsah průtoku plynu	0 – 5,33 l min <sup>-1</sup>
Doporučená hodnota průtoku	3,2 l min <sup>-1</sup> / 0,16 vvm

#### 3.1 Konstrukční návrh elementu

Při konstrukčním návrhu aeračního elementu deskového FBR je žádoucí vycházet z doporučených provozních hodnot dle teoretického rozboru. Dalším požadavkem na nový aerační člen je využití doporučených porézních membrán, které zajistí rovnoměrnou distribuci průtoku plynu komorou a tvorbu homogenního proudění. Obr. 24 zobrazuje ilustrační návrh konstrukčního řešení, který splňuje výše zmíněné požadavky.



**Obr. 24** Ilustrační obrázek koncepce řešení aerace v deskovém reaktoru

Na základě předchozí koncepce byly navrženy 2 varianty aeračního členu, včetně 3D modelu.

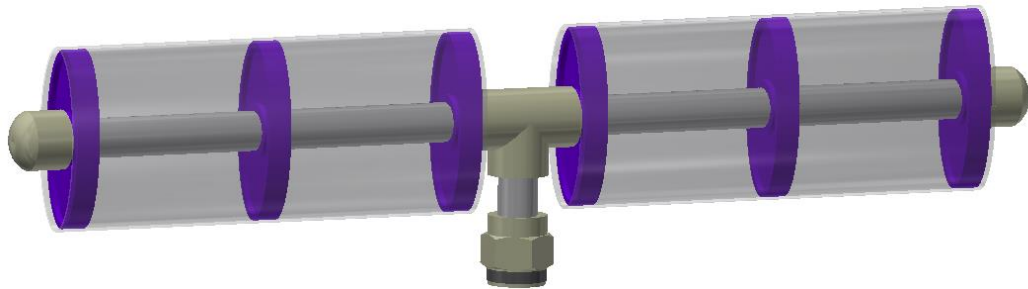
První variantou aeračního elementu je svařovaná sestava z PPR trubek a armatur v rozměru DN20 PN16. Přívod plynu do elementu zajišťuje šroubení se vnějším závitem G1/2". Dále plyn pokračuje kusem trubky do T kusu, v němž je rovnoměrně rozdělen do dvou větví. Obě větve jsou tvořeny navrtnou trubicí a zakončeny koncovkami. Obě trubky mají navrtných 10 děr o průměru 4 mm. Porézní membrána je navléknuta přes vnější rozměry armatur, které tvoří kontaktní plochu s membránou, mají průměr 30 mm. Mezi vnější plochou vrtané trubky a vnitřní stranou membrány je dostatečný prostor pro rovnoměrnou distribuci plynu k jednotlivým pórům. V tomto prostoru nejdříve musí dojít k mírnému přetlaku, aby došlo k otevření pórů. Aby nedocházelo k nežádoucímu úniku plynu mezi membránou a jednotlivými kusy armatur, jsou tyto spoje opatřeny stahovacími potrubními objímkami. Tato varianta sestavy (Obr. 25) vyhovuje třem vybraným doporučeným membránám, konkrétně membráně JetFlex společnosti Jaeger a oběma membránám E-Flex společnosti Invent.





**Obr. 25** Varianta 1 sestavy pro porézní membránu o průměru 34,5 mm  
(JetFlex/E-Flex)

Druhá varianta aeračního členu (Obr. 26) je uspořádáním armatur velice podobná té předchozí sestavě, avšak kvůli většímu průměru čtvrté aerační membrány je potřeba navrhnout jinou konstrukci pro její napínání. Za tímto účelem byly navrženy oválné napínací držáky. Napínák ve tvaru elipsy umožňuje napnutí membrány do stejného tvaru. V případě, že hlavní osa elipsy bude směřovat kolmo k podstavě komory, je možné tento element do reaktoru umístit. Pro nežádoucí únik plynu z vnitřního prostoru membrány, musí být kontaktní plocha utěsněna stahovacími objímkami. Tento element je určen pro experiment porézní membrány PUM68 společnosti Vodní energie, s.r.o.



**Obr. 26** Varianta 2 sestavy pro porézní membránu PUM68

### 3.1.1 Výkresová dokumentace

Kompletní výkresová dokumentace obsahuje výkresy sestav dvou aeračních elementů a výrobní výkres pro napínací držáky membrány PUM68, které lze vyrobit pomocí 3D tisku. Celá výkresová dokumentace je umístěna v příloze 15 až 17 diplomové práce.

### 3.2 Souhrn materiálu

Seznam použitého materiálu pro výrobu a montáž aeračních elementů sloužící pro experimentální měření je uveden v tabulce 11 níže.

**Tab. 11** *Soupis použitého materiálu pro experiment*

<b>Soupis použitého materiálu</b>	
<b>Položka</b>	<b>Množství</b>
PPR trubka DN20 PN16	2 m
PPR T-kus DN20 PN16	2 ks
PPR koncovka DN20 PN16	4 ks
PPR nátrubek DN20 PN16	2 ks
PPR šroubení DN20 PN16 vnější závit G1/2"	2 ks
Porézní membrána JetFlex - Jaeger (EPDM)	1 m
Porézní membrána PUM68 - Vodní energie	1 m
Porézní membrána E-Flex - Invent (EPDM)	1 m
Porézní membrána E-Flex - Invent (Silicone)	1 m
Potrubní stahovací objímka DN32-40	4 ks
Napínací držák membrány (3D tisk)	6 ks

### 3.3 Výroba a montáž

Výrobní postup se skládá z dvou hlavních částí. První část popisuje výrobu nosné konstrukce elementů. Následující část popisuje kompletaci aeračních členů. Všechny potřebné díly jsou uvedeny v tab. 10. K výrobě je dále potřeba vrtačka, stříhací kleště, svářečka pro PPR trubky, svěrák, šroubovák, měřicí pásma, nůžky a kompresor.

a) Postup výroby nosné konstrukce je následovný:

- příprava, rozměření a řezání PPR trubek dle výkresu sestavy,
- \*nasazení napínacích držáků membrány a utěsnění kontaktních ploch (platí pouze pro výrobu druhé varianty aeračního elementu),
- sváření jednotlivých armatur a trubek dle výkresu sestavy,
- upnutí připravené konstrukce do svěráku,
- navrtání děr do trubek (vrták č. 4), rozteč děr dle výkresu.

b) Postup kompletace elementu je následovný:

- příprava, rozměření a nastříhání membrány dle délky konstrukce,
- navléknutí membrány přes armatury či napínací držáky,
- nasazení a stažení potrubních objímek,
- připojení elementu na stlačený vzduch, kontrola netěsností a případná korekce,

- vyzkoušení vyrobených elementů ponořených do testovací komory.

Podle výše uvedeného výrobního postupu byly sestaveny dvě varianty aeračních elementů. Fotky z výroby a montáže jsou uvedeny na Obr. 27.



**Obr. 27** Fotky z výroby a montáže dvou variant aeračních elementů

### 3.4 Sestava experimentu

#### Průtokoměr

Plováчковý průtokoměr společnosti ABB, Ltd zajišťuje přesnou regulaci průtoku plynu pro přesné měření. Maximální kapacita  $320 \text{ l h}^{-1}$  vzduchu (105 kPa, 20 °C). Maximální dovolený tlak 1 400 kPa při 38 °C.



**Obr. 28** Průtokoměr s regulačním ventilem

#### Kamera GoPro HERO 5 Black

Kamera GoPro HERO 5 Black (Obr 29) s možností video záznamu až 240 fps (snímků za vteřinu) při rozlišení 720p pro záchyt proudících bublin a následného rozboru videa.



**Obr. 29** Kamera GoPro HERO 5 při spuštění experimentu

### Kompresorová stanice

Kompaktní kompresorová stanice Mattei modelu Blade SE 4H (Obr. 30) je umístěna ve školní laboratoři pro zajištění dodávky stlačeného vzduchu pro všechna laboratorní zařízení. Štítkový výkon motoru je 4 kW. Maximální provozní tlak je 10 bar(g) a průtok dodávaného vzduchu  $600 \text{ l min}^{-1}$ . Stanice obsahuje zásobník stlačeného vzduchu o objemu 270 litrů a externí kondenzační sušič stlačeného vzduchu [31].



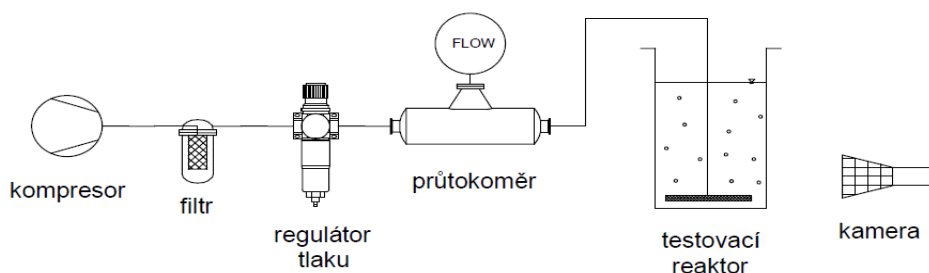
**Obr. 30** Kompresorová stanice společnosti Mattei ve školní laboratoři [29]

### Testovací reaktor

Testovací nádoba má tvar kvádra s průhlednými stěnami o vnitřních rozměrech (šířka x výška x hloubka): 590 x 600 x 65,2 mm. Horní strana komory je otevřená a umožňuje tak snadný přístup a manipulaci s testovacími elementy.

#### 3.4.1 Uspořádání zařízení

Stlačený vzduch pro experiment je dodáván kompresní stanicí. Vzduch dále proudí přes filtr, regulátor tlaku a regulační průtokoměr do aeračního členu umístěného v testovacím reaktoru. Stlačený vzduch je porézní membránou distribuován do malých bublinek, které proudí vsádkou v testovací koloně. Do komory je umístěn pásmový metr, který umožňuje odečítání velikosti bublin, rychlost pohybu bublin a změnu výšky hladiny při experimentu. Video záznam probublávání zachycuje připravená kamera. Uspořádání testovacích aparátů v laboratoři odpovídá schématu zapojení (Obr. 31).



**Obr. 31** Schéma zapojení testovacího zařízení pro měření

### 3.5 Metodika měření

Během testování budou měřeny základní tři parametry v závislosti na měnícím se průtoku: rychlost proudících bublin, velikost proudících bublin a doba zdržení plynu. Průtok plynu bude měřen pro celý rozsah průtokoměru. V následující tabulce (Tab. 12) je uveden souhrn provozních parametrů aeračního systému.

**Tab. 12** Souhrn provozních parametrů experimentu

parametr	název parametru	označení parametru	základní jednotka
konstantní proměnný (nastavovaný)	objem vsádky	$V_r$	$m^3$
	průtok plynu	$\dot{V}$ ; vvm	$m^3 s^{-1}$ ; $m^3 m^{-3} min^{-1}$
měřený	doba zdržení plynu (gas holdup)	$\epsilon_g$	-
	rychlost bubliny	$u_b$	$m s^{-1}$
	velikost bubliny	$d_b$	m

Každý aerační element bude měřen zvlášť za předpokladu totožných testovacích podmínek. Pro každé měření je připravený protokol (příloha 2, 3) pro záznam naměřených hodnot pro dané hodnoty průtoku. Pro sestavený a připravený experiment je pracovní postup měření následující:

- příprava testovaného aeračního členu a připojení dodávaného vzduchu,
- uzavření průtokoměru,
- odečtení počáteční hodnoty výšky hladiny,
- nastavení průtokoměru na hodnotu průtoku dle protokolu,
- vyčkání na ustálení proudění,
- pořízení detailního video záznamu ve třech různých místech podél výšky komory pro daný průtok,
- odečtení stávající výšky hladiny.

Opakování bodů D – G pro všechny měřené hodnoty průtoku.

### 3.6 Vyhodnocení měření

Stanovení doby zdržení plynu  $\varepsilon_g$  [-] je pro každý záznam měření vyhodnocen vztahem (20) z počáteční  $H_0$  [m] a aktuální výšky hladiny  $H$  [m].

Hodnoty průměrné rychlosti bubliny  $u_b$  [ $\text{m s}^{-1}$ ], aritmetického průměru bubliny  $d_b$  [m] a Sauterova středního průměru bubliny  $d_{32}$  [m] byly stanoveny z pořízeného záznamu jednotlivých měření. Tyto parametry byly vyhodnoceny pro každý průtok ze třech různých záznamů jiného sledovaného místa testovaného podél výšky reaktoru.

Průměrná rychlost bubliny byla stanovena z měření dráhy bubliny za 3 vteřiny. Změřeno bylo 10 různých bublin z každého záznamu, tedy celkem 30 bublin pro každou hodnotu průtoku.

Průměr bubliny  $d_b$  byl stanoven z celkového počtu bublin o různém průměru ve výseku plochy 10 x 10 cm v každém záznamu. Z parametru  $d_b$  byl následně stanoven Sauterův střední průměr bubliny  $d_{32}$ , dle vztahu (28).

Celkem byly testovány 4 různé porézní membrány - JetFlex (EPDM), E-Flex (Silicone), E-Flex (EPDM) a PUM68 (polyuretan). Protokoly naměřených hodnot jsou zaznamenané v příloze práce (příloha 2, 3) včetně provozních podmínek měření.

Následující fotografie (Obr. 32) je pořízena z video záznamu během měření membrány JetFlex (EPDM) při doporučené kultivační hodnotě průtoku plynu komorou  $3,2 \text{ l min}^{-1}$  (0,16 vvm). Fotografické záznamy všech měřených hodnot průtoku pro každou testovací membránu jsou umístěné v příloze práce (příloha 4 až 7).



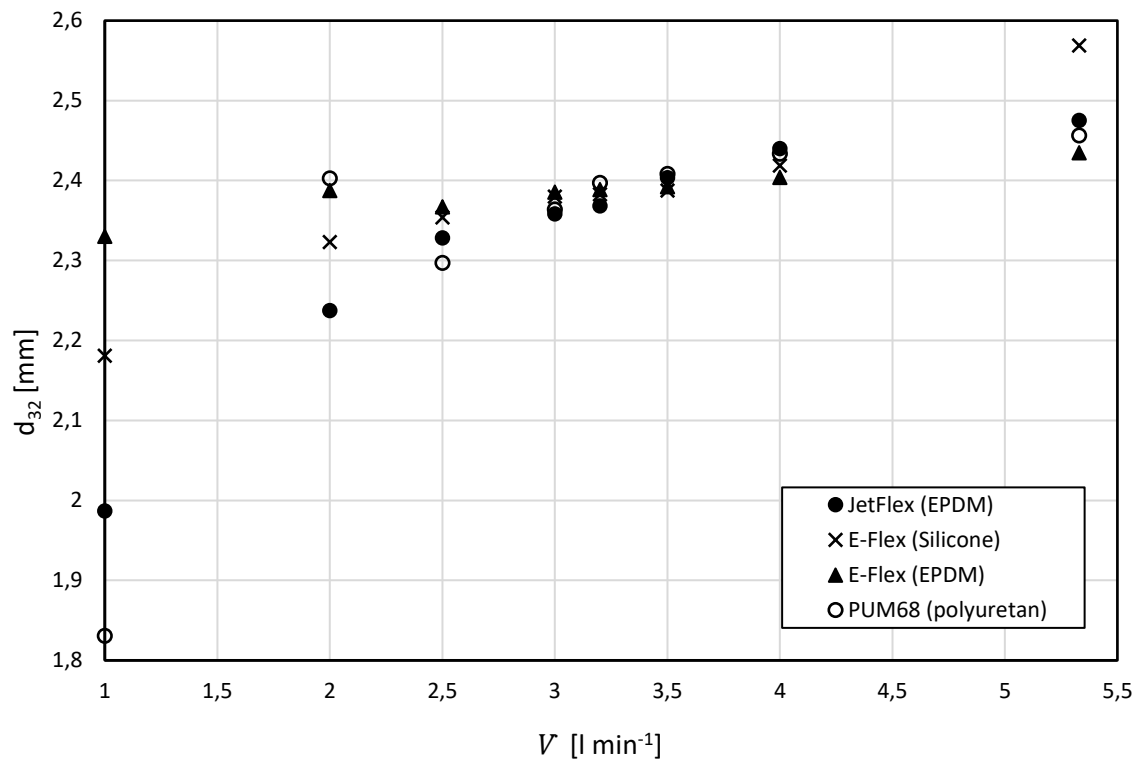
**Obr. 32** Fotografie ze záznamu experimentálního měření.

### 3.7 Výsledky naměřených dat

#### 3.7.1 Vyhodnocení velikosti bublin

Z naměřených hodnot velikosti bubliny byl stanoven její Sauterův střední průměr  $d_{32}$ . Výsledky jsou uvedeny v tabulce (příloha 8). Ze zpracovaných dat lze pozorovat závislost průměru vzniklých bublin na průtoku plynu (Obr. 33). Na tomto grafu lze pozorovat, že při malé hodnotě průtoku plynu porézní membránou, se výsledné velikosti bublin liší. Při následném zvyšování průtoku plynu aeračním systémem lze konstatovat, že velikosti bublin jednotlivých membrán se téměř shodují. Průběh této závislosti je téměř konstantní. Naproti tomu největší rozdíl průměru bubliny je u membrány PUM68. Při optimální hodnotě průtoku  $3,2 \text{ l min}^{-1}$  je průměr všech bublin velice podobný  $2,38 \text{ mm}$ .

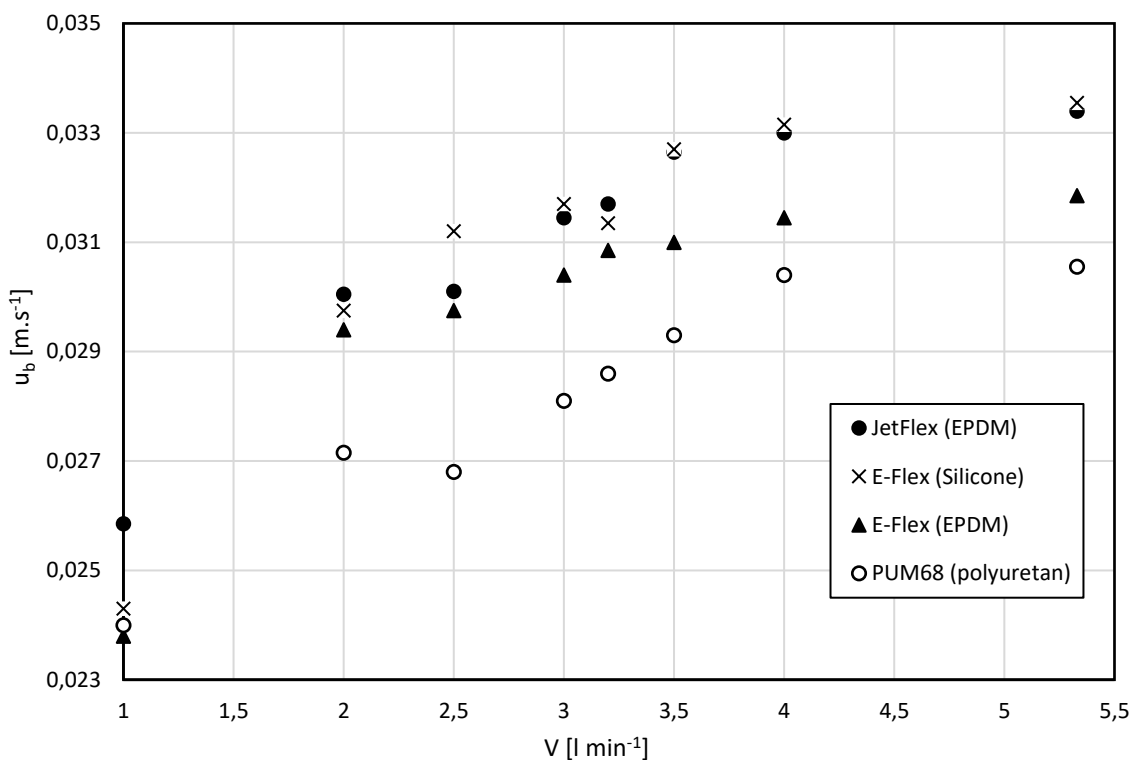




**Obr. 33** Vyhodnocení velikosti bublin v závislosti na průtoku plynu

### 3.7.2 Vyhodnocení rychlosti bublin

Měření rychlosti bublin  $u_b$  bylo provedeno na základě video záznamu z různých míst testovacího reaktoru pro každou hodnotu průtoku. Z těchto dat byla následně stanovena průměrná hodnota rychlosti bubliny pro daný průtok. Vyhodnocená data jsou k dispozici v příloze práce (příloha 9). Při porovnání jednotlivých hodnot rychlostí bublin pro měřené membrány lze vidět, že průběh je velice podobný. Při pozorování grafu (Obr. 34) v oblasti hodnot průtoku od  $2,5 \text{ l min}^{-1}$  až  $4 \text{ l min}^{-1}$  lze vidět, že trend naměřených bodů je téměř lineární. V oblasti hodnoty průtoku  $3,2 \text{ l min}^{-1}$  ( $0,16 \text{ vvm}$ ) se kromě membrány PUM68 hodnoty rychlostí bublin shodují. Pohybují se kolem hodnoty  $0,031 \text{ m s}^{-1}$ .

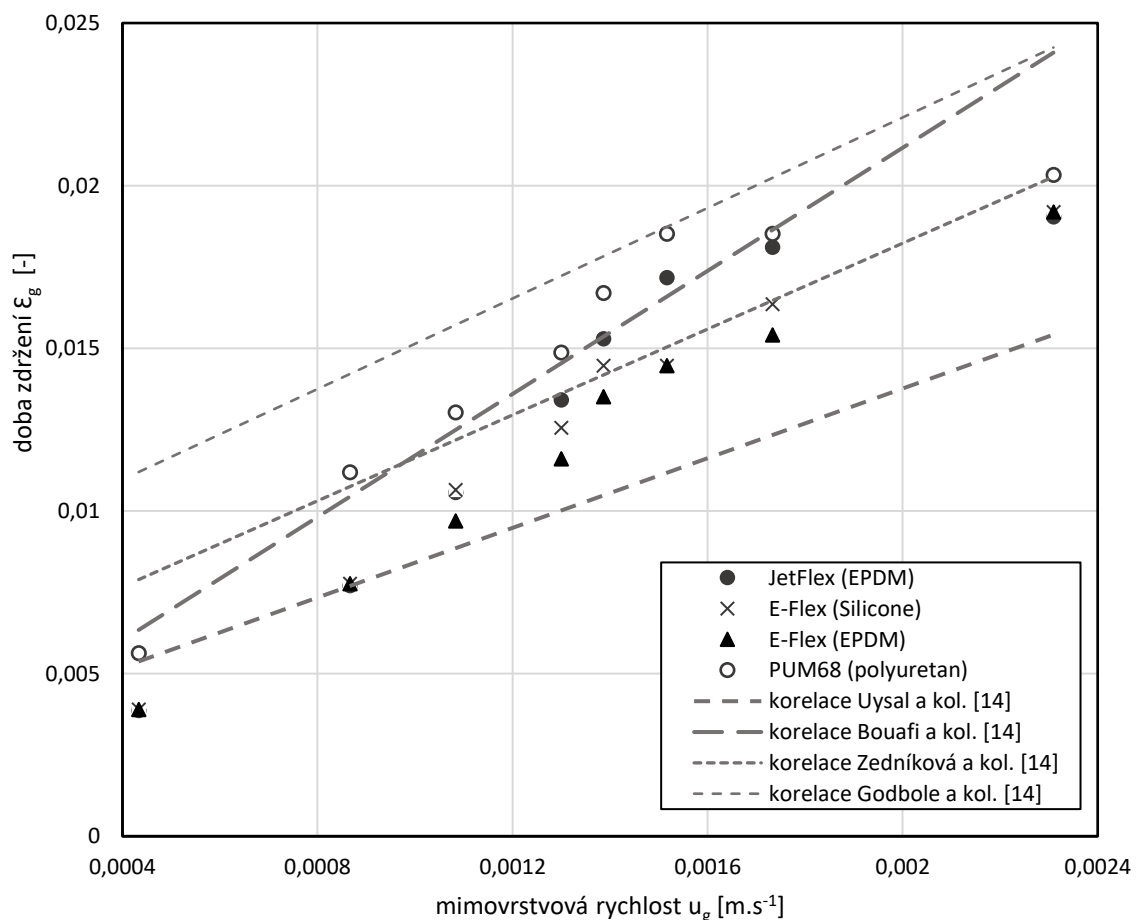


**Obr. 34** Vyhodnocení rychlosti bublin v závislosti na průtoku plynu

### 3.7.3 Vyhodnocení doby zdržení plynu

Dalším měřeným parametrem experimentu je bezrozměrná doba zdržení plynu  $\varepsilon_g$ . Naměřená data byla vyhodnocena pomocí vztahu (20). Výsledné hodnoty pro jednotlivá měření jsou uvedeny v tabulce v příloze (příloha 10). Mimovrstvová rychlost  $u_g$  byla určena rovnicí (21).

Graf závislosti doby zdržení jednotlivých membrán na rychlosti plynu (Obr. 35) je zobrazen níže. Zobrazené body v tomto grafu reprezentují stavy jednotlivých měření. Z vyhodnocení experimentálních dat je patrné, že jednotlivé hodnoty doby zdržení v závislosti na mimovrstvové rychlosti mají lineární průběh. Tento poznatek potvrzuje skutečnost, že během měření nebyl překročen limit homogenního probublávání. Nejvíce jsou výrazná naměřená data membrány PUM68, ale tyto výchyly od zjištěných dat ostatních typů nejsou nijak extrémní.

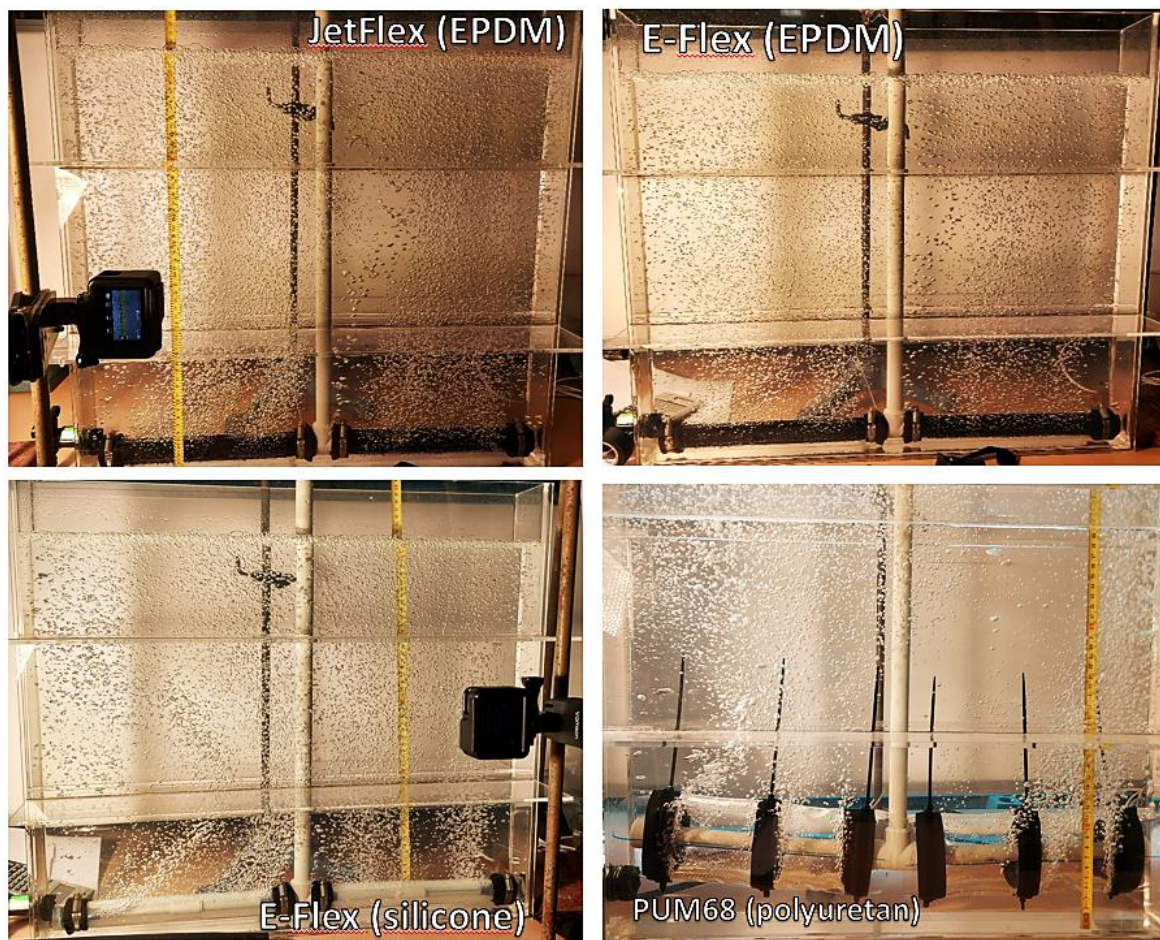


**Obr. 35** Závislost doby zdržení na mimovrstvové rychlosti

Stejný graf také zaznamenává čárkovanými přímkami korelace různých autorů, které jsou uvedené v tabulce 5. Z pozorování vyplývá jistá podobnost mezi experimentálními daty a uvedenými korelacemi. V rozsahu měřených hodnot přibližně odpovídají naměřené hodnoty použitým korelacím. V oblasti odpovídající homogennímu hydrodynamickému režimu lze tedy závislost linearizovat.

#### **3.7.4 Vyhodnocení homogenní aerace**

Neméně důležitým požadavkem navržených aeračních elementů pro zajištění optimálních kultivačních podmínek mikrořas je homogenní aerace v celém objemu reaktoru. Tento aspekt byl též pozorován (Obr. 36) během testování jednotlivých membrán. Fotodokumentace porovnává probublávání jednotlivých aeračních elementů. Všechny záznamy byly zachyceny při hodnotě optimálního průtoku plynu  $3,2 \text{ l min}^{-1}$  (0,16 vvm). Z těchto záznamů lze pozorovat, že podmínku homogenní aerace nejlépe splňují membrány JetFlex (EPDM) a E-Flex (EPDM). V některých malých oblastech komory však dochází k méně homogennímu probublávání. Tyto malé nedostatky mohou být způsobeny konstrukční netěsností.



**Obr. 36** Porovnání jednotlivých membrán a proudění bublin reaktorem

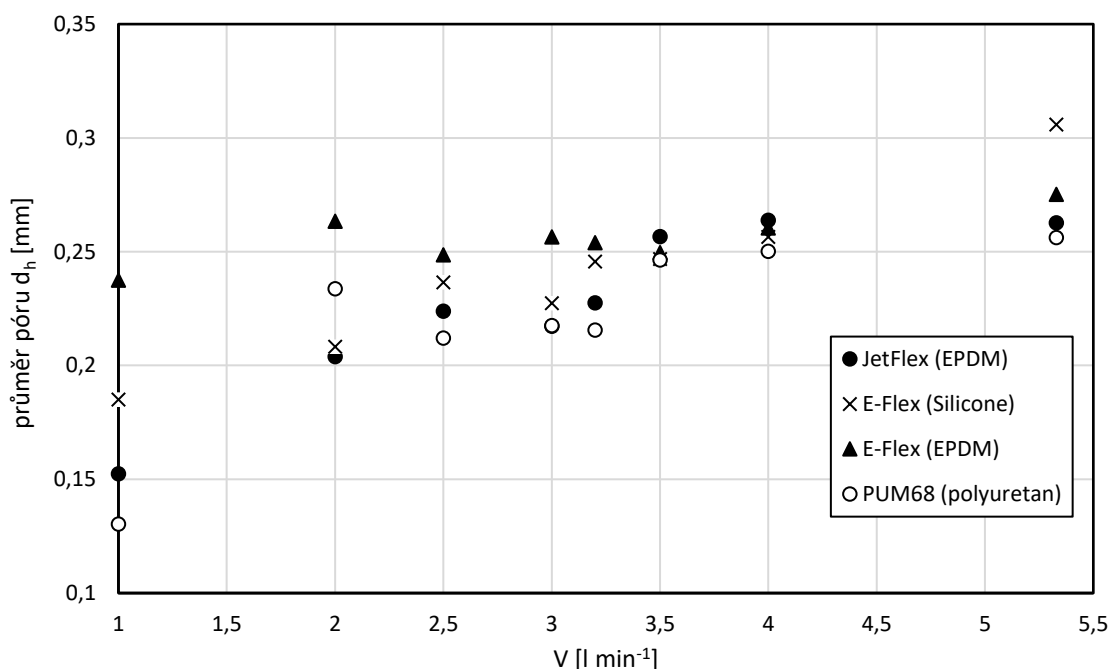
Konstrukční řešení aeračního elementu s membránou E-Flex (silicone) také částečně splňuje podmínku homogenity. V této variantě však jsou jisté rezervy pro konstrukční zdokonalení.

Podmínku homogenní aerace nejméně splňuje druhá varianta aeračního elementu s porézní membránou PUM68. Při experimentu tato membrána nezajistila homogenní distribuci plynu celým svým porézním povrchem. Toto konstrukční řešení není vhodné pro zajištění aerace reaktoru. Vhodným konstrukčním řešením pro membránu PUM68 může být perforovaný elipsoidní člen, který by zajistil rovnoměrné natažení membrány. Pak by nedocházelo k ohýbání a lámání, které by způsobovalo deformaci pórů membrány. To mělo za následek lokální vznik větších bublin, tedy docházelo k nerovnoměrné distribuci.

### 3.7.5 Pozorování průměru póru

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4, výrobci porézních membrán neuvádějí velikost pórů pro dané distribuční membrány. Výsledná velikost bublin závisí především na průměru póru  $d_h$ , jak uvádí vztah (17) a také na hodnotě průtoku dle vztahu (16). Nicméně z těchto

vztahů lze vyjádřit a dopočítat průměr póru, protože hodnoty velikostí bublin v závislosti na průtoku plynu aeračním reaktorem byly experimentálně změřeny. Na základě získaných hodnot velikostí pórů membrány (Příloha 12), byl sestaven graf (Obr. 37). V tomto grafu lze sledovat, že velikosti pórů všech měřených membrán nebyly po dobu experimentu stejné. Vzhledem ke zvýšení průtoku během experimentu a poddajnosti konstrukčních materiálů se velikosti pórů zvětšují.



**Obr. 37** Závislost průměru póru membrány  $d_h$  na průtoku plynu  $V$

Dále lze konstatovat, že při vyšších hodnotách průtoku je trend průběhu téměř konstantní.

### 3.7.6 Pozorování smykové rychlosti a napětí

Při experimentu byla věnována pozornost dalším neméně důležitým parametrům aerace, jimiž jsou smyková rychlost  $v_{aeration}$  [ $s^{-1}$ ] a smykové napětí  $\tau$  [Pa]. Tyto parametry je nutno sledovat především z důvodu poškození mikrořas a jejich negativního vlivu na kultivaci. Pomocí vztahu výpočtu smykového napětí (28) lze stanovit jeho průměrnou hodnotu. Vyhodnocená data jsou shrnuta v tabulce v níže (příloha 13). Nejvyšší dosažená hodnota smykové rychlosti při experimentu byla stanovena  $29,5 \text{ s}^{-1}$ .

Ze vztahu Newtonova zákona viskozity (27) lze získat hodnoty tečného napětí dosažených při experimentu. Vyhodnocená data pro všech experimentů jsou shrnuta

v tabulce v příloze práce (příloha 14). Nejvyšší dosažené hodnoty tečného napětí při testování činily 0,0295 Pa.

Na základě literatury [24] a tabulky kritických parametrů mikrořas (Příloha 1) lze porovnat získané hodnoty s kritickými parametry. Pro kmen mikrořasy *Chlorella vulgaris* byla stanovena kritická hodnota tečného napětí  $\tau_{crit}$  při aeraci 0,9 MPa. Ze vzájemného porovnání hodnot tečného napětí lze konstatovat, že při experimentu nebylo dosaženo kritických hodnot, resp. nedošlo by k poškození buněk řas aerací.

### 3.8 Porovnání optimalizace aeračního členu

Současný provoz stávajícího deskového fotobioreaktoru je velmi neefektivní. Hodnota průtoku aeračního plynu činí až 33,3 l min<sup>-1</sup>. Tato hodnota výrazně převyšuje doporučenou optimální hodnotu provozu 0,16 vvm. Tato skutečnost je způsobena především z důvodu absence vhodného aeračního elementu, který by zajistil homogenní distribuci plynu do celého objemu komory. Přívod aeračního plynu do reaktoru nyní zajišťuje děrovaná trubka. Současná aerace je ryze nehomogenní a velikosti bublin dosahují až 50 mm. Pracovní objem deskového reaktoru je 100 litrů.

Za účelem zlepšení kultivačních podmínek a ekonomického provozu fotobioreaktoru je žádoucí použít aerační element s porézní membránou. Porovnání parametrů současného a optimálního provozu reaktoru shrnuje tabulka 13.

**Tab. 13** Porovnání současného a optimálního provozu fotobioreaktoru

parametr	současný stav	optimální stav
$\dot{V}_g$ [l min <sup>-1</sup> ]	33,3	16
$\dot{V}_{CO_2}$ [l min <sup>-1</sup> ]	2,66	1,28
typ aerace	hrubobulinná	jemnobulinná
režim proudění	nehomogenní	homogenní

Z tabulky je patrné, že při použití vhodného distributoru aeračního plynu lze snížit jeho průtok o více než polovinu původní hodnoty. Optimální průtok plynu  $\dot{V}_g$  pro kultivaci *Chlorella vulgaris* ve stávajícím deskovém fotobioreaktoru činí 16 l min<sup>-1</sup>. Optimální koncentrace CO<sub>2</sub> v aeračním plynu dle literatury [13] je 8 % (obj.). Průtok čistého oxidu uhličitého  $\dot{V}_{CO_2}$  při optimálních podmínkách odpovídá hodnotě 1,28 l min<sup>-1</sup>.

Ze shrnutí plyne, že využitím aeračního elementu lze snížit provozní náklady fotobioreaktoru o více než 50 %. Další výhodou elementu je tvorba jemnobublinné aerace a homogenního proudění. Investiční náklady na materiál pro výrobu aeračního elementu dle kapitoly 3.3 činí v řádu stokorun.



## 4 Závěr

Hlavním tématem této diplomové práce byl návrh a konstrukce elementu pro aeraci kultivačního média v deskovém fotobioreaktoru. Na základě zpracované rešerše provozních podmínek pro homogenní aeraci byla vytvořena technická dokumentace aeračních elementů. Pro navržené aerační elementy byly poptány průmyslové aerační membrány, které byly následně instalovány na navržené elementy. Vyrobené aerační elementy byly následně zprovozněny a experimentálně odzkoušeny při provozních podmínkách dle literární rešerše. Naměřená data byla zpracována a vyhodnocena.

Během této práce byly experimentálně zjištěny provozní parametry vybraných membrán. Stanovena byla závislost velikost bubliny  $d_b$  a velikost póru membrány  $d_h$  na průtoku. Průměrná velikost bubliny  $d_b$  pro optimální hodnotu průtoku 0,16 vvm se pohybuje okolo 2,4 mm. Z této závislosti pomocí korelace byla stanovena charakteristika velikosti póru membrány  $d_h$  na průtoku plynu, protože žádný z výrobců vybraných membrán tato data neuvádí. Naměřené charakteristiky doby zdržení plynu  $\varepsilon_g$  tvoří lineární průběh, tím je potvrzena přítomnost homogenního proudění. Porovnání vyhodnocených dat experimentálního měření prokazuje shodu s korelacemi jiných autorů.

Celkem byly otestovány 4 různé porézní membrány. Při vzájemném porovnání naměřených dat lze konstatovat, že v oblastech doporučeného průtoku vykazují membrány velmi podobné provozní parametry. Ale při porovnání distribuce bublin a homogenity proudění plynu jsou patrné jisté rozdíly. Důvodem tvorby malých lokálních vírů a případných mrtvých zón během experimentu byla přítomnost malých netěsností mezi aeračním elementem a porézní membránou.

Nejméně vhodná membrána pro provozní podmínky se jeví porézní membrána PUM68. Kvůli jejímu velkému průměru, je nutné ji navléknout přes napínací držáky. Právě v místech napínacích držáků dochází k lokálnímu napnutí membrány a k nadměrnému otevření okolních pórů. Následně v těchto pórech je zvýšený průtok plynu a již nedochází k pravidelné distribuci po celé délce elementu. Ostatní testované membrány podmínku homogenní aerace do jisté míry splňují.

Cílem další práce by mělo být experimentální ověření aeračních elementů s porézními membránami na laboratorním deskovém fotobioreaktoru. Tento reaktor je

pětkrát větší než testovací, na kterém byl experiment proveden. Při pohledu na trend vyhodnocených dat dle průtoku lze předpokládat pouze mírnou změnu provozních parametrů při průtoku 0,16 vvm, resp. Průtoku aeračního plynu  $16 \text{ l min}^{-1}$ . Provozováním stávajícího deskového fotobioreaktoru s aeračním elementem při optimálních kultivačních podmínkách by bylo možné ušetřit až 50 procent současných provozních nákladů.

Problematika aerace v sobě ukrývá velký potenciál využití. Současný trend uhlíkové neutrality, který panuje ve vyspělých státech, může vést ke zpracování odpadního oxidu uhličitého právě pomocí aerace ve fotobioreaktorech. To by mělo za následek velký rozmach této technologie ať už z pohledu ekonomické rentability, nebo z hlediska enviromentálního.

## 5 Seznam zdrojů a literatury

- [1] Biomach, [www.biomach.cz](http://www.biomach.cz), (n.d.). [www.biomach.cz/biologie-rostlin/fotosynteza](http://www.biomach.cz/biologie-rostlin/fotosynteza) (accessed January 20, 2021).
- [2] J. Masojídek, R. Lhotský, J. Kopecký, O. Prášil, Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce, *Věda Kolem Nás*. (2016) 28. [http://www.vedakolemna.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn\\_45web.pdf?0.415887045674026](http://www.vedakolemna.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_45web.pdf?0.415887045674026).
- [3] J. Doucha, K. Lívanský, V. Kotrbáček, V. Zachleder, Production of Chlorella biomass enriched by selenium and its use in animal nutrition: A review, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 83 (2009) 1001–1008. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2058-9>.
- [4] J. Kopecký, R. Lhotský, J. Paišlová, Aktivní látky mikrořas ve výživě, *Věda Kolem Nás Nakl. Acad.* (2017) 28.
- [5] S. Daliry, A. Hallajisani, J. Mohammadi Roshandeh, H. Nouri, A. Golzary, Investigation of optimal condition for Chlorella vulgaris microalgae growth, *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 3 (2017) 217–230. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.02.010>.
- [6] Archív. Mikrobiologický ústav AV ČR, [mbucas.cz](http://mbucas.cz), (n.d.). [www.mbucas.cz](http://www.mbucas.cz) (accessed March 3, 2021).
- [7] F.G. Acién Fernández, J.M. Fernández Sevilla, E. Molina Grima, Photobioreactors for the production of microalgae, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 12 (2013) 131–151. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9307-6>.
- [8] V. Bělohav, T. Jirout, L. Krátký, Possibilities of implementation of photobioreactors on industrial scale, *Chem. List.* 112 (2018) 183–190.
- [9] Spirulina Grow Organic, [www.grow-organic-spirulina.com](http://www.grow-organic-spirulina.com), (2008). [www.grow-organic-spirulina.com](http://www.grow-organic-spirulina.com) (accessed March 3, 2021).
- [10] Schott, [schott.com](http://schott.com), (n.d.). [www.schott.com/en](http://www.schott.com/en) (accessed January 20, 2021).
- [11] Bonaloka, [www.bonaloka.cz](http://www.bonaloka.cz), (n.d.). [www.bonaloka.cz](http://www.bonaloka.cz) (accessed January 20, 2021).
- [12] R. Formánek, Efektivní technologie a zařízení pro sběr, separaci a extrakci cenných látek z mikrořas, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2017. [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77600/F2-DP-2018-Vanek-Martin-Diplomova\\_prace\\_VANEK\\_MARTIN.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77600/F2-DP-2018-Vanek-Martin-Diplomova_prace_VANEK_MARTIN.pdf?sequence=-1&isAllowed=y).
- [13] M. Adamczyk, J. Lasek, A. Skawińska, CO<sub>2</sub> Biofixation and Growth Kinetics of Chlorella

- vulgaris and *Nannochloropsis gaditana*, *Appl. Biochem. Biotechnol.* 179 (2016) 1248–1261. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2062-3>.
- [14] N. Kantarci, F. Borak, K.O. Ulgen, Bubble column reactors, *Process Biochem.* 40 (2005) 2263–2283. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.10.004>.
- [15] M. Stříž, Porovnání aeračních elementů, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2010.
- [16] Kunst, Invent, Technologická zařízení INVENT, (2018) 15.
- [17] M. Ondráček, AERACE NA ČISTÍRNÁCH ODPADNÍCH VOD, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2015.
- [18] E.S. Gaddis, A. Vogelpohl, Bubble formation in quiescent liquids under constant flow conditions, *Chem. Eng. Sci.* 41 (1986) 97–105. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(86\)85202-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(86)85202-2).
- [19] D.N. Miller, Scale-up of agitated vessels gas-liquid mass transfer, *AIChE J.* 20 (1974) 445–453. <https://doi.org/10.1002/aic.690200303>.
- [20] J. Zahradník, M. Fialová, M. Růžička, J. Drahůs, F. Kaštánek, N.H. Thomas, Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors, *Chem. Eng. Sci.* 52 (1997) 3811–3826. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00226-1).
- [21] O.N. Manjrekar, M.P. Dudukovic, Identification of flow regime in a bubble column reactor with a combination of optical probe data and machine learning technique, *Chem. Eng. Sci.* X. 2 (2019) 100023. <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2019.100023>.
- [22] A.A. Mouza, Design of bubble columns equipped with porous sparger, *Mater. Today Proc.* 5 (2018) 27572–27581. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.09.077>.
- [23] M. Bouaifi, G. Hebrard, D. Bastoul, M. Roustan, A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns, *Chem. Eng. Process.* 40 (2001) 97–111. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(00\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(00)00129-X).
- [24] C. Wang, C.Q. Lan, Effects of shear stress on microalgae – A review, *Biotechnol. Adv.* 36 (2018) 986–1002. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.03.001>.
- [25] Vodní energie, [vodnienergie.cz](http://vodnienergie.cz), (n.d.). [www.vodnienergie.cz](http://www.vodnienergie.cz) (accessed February 3, 2021).
- [26] Alita Industries, Porous High Density Polyethylene Tube, (n.d.). <http://www.alita.com/>.

- [27] JAEGER GROUP, Jaegergroup.com, (n.d.).  
<https://www.jaegergroup.com/en/products/green-products/waste-water-aeration>  
(accessed April 3, 2021).
- [28] ENVI-PUR, envi-pur.cz, (n.d.). [www.envi-pur.cz](http://www.envi-pur.cz) (accessed February 3, 2021).
- [29] Mattei, Mattei.cz, (n.d.). [www.mattei.cz/produkty/lamelove-kompresory](http://www.mattei.cz/produkty/lamelove-kompresory) (accessed March 5, 2021).

## 6 Seznam symbolů

<i><b>Veličina</b></i>	<i><b>Jednotka</b></i>	<i><b>Popis</b></i>
A	$m^2$	průtočná plocha
$A_p$	$m^2$	povrch bubliny
a	$m^2 \cdot s^{-1}$	zrychlení bubliny
$a$	$m^2$	mezifázový povrch
C	$g \cdot l^{-1}$	koncentrace řas
$C_d$	-	koeficient odporu
$d_b$	m	aritmetický průměr bubliny
$d_h$	m	průměr póru
$d_{32}$	m	střední průměr bubliny
$F_b$	N	vztlková síla
$F_d$	N	odporová síla
$F_i$	N	setrvačná síla
$F_m$	N	síla od hybnosti plynu
$F_p$	N	tlaková síla
$F_s$	N	síla od povrch. napětí
g	$m \cdot s^{-2}$	gravitační zrychlení
H	m	výška hladiny
$H_0$	m	počáteční výška hladiny
L	$m^4 \cdot s$	parametr substituce
$M_i$	$g \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost složky i
P	$g \cdot l^{-1} \cdot den^{-1}$	produktivita řas
$p_g$	Pa	tlak plynu
$p_L$	Pa	tlak kapaliny
Re	-	Reynoldsovo číslo
s	m	parametr bubliny
S	$m^3$	parametr substituce
$t_b$	s	doba vzniku bubliny
T	$m^2 \cdot s$	parametr substituce
V	$m^3$	výsledný objem bubliny
$V_b$	$m^3$	objem bubliny
$V_l$	$m^3$	objem kapaliny spojený s bublinou
$V_r$	$m^3$	objem reaktoru
$\dot{V}$	$m^3 \cdot h^{-1}$	objemový průtok
$u_b$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost bubliny
$u_g$	$m \cdot s^{-1}$	mimovrstvová rychlost
z	m	parametr bubliny

## 7 Seznam řeckých symbolů

<i><b>Veličina</b></i>	<i><b>Jednotka</b></i>	<i><b>Popis</b></i>
$\epsilon_g$	-	bezrozměr. doba zdržení plynu
$\rho_L$	$\text{kg m}^3$	hustota kapalné fáze
$\rho_g$	$\text{kg m}^3$	hustota plynné fáze
$\sigma$	$\text{N m}$	povrchové napětí
$\mu_L$	$\text{Pa s}$	dynamická viskozita vody
$\mu_g$	$\text{Pa s}$	dynamická viskozita plynu
$\nu$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
$\tau$	$\text{Pa}$	tečné napětí
$\tau_{\text{crit}}$	$\text{Pa}$	kritické tečné napětí
$\gamma_{\text{aeration}}$	$\text{s}^{-1}$	smyková rychlost při aerace

## 8 Zkratky

vvm (volume air per volume culture per minute) - objem plynu na objem vsádky za minutu

FBR - fotobioreaktor

## 9 Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> Postup inokulace startovní kultury buněk mikrořas. Ze sbírky přes laboratorní válcové a panelové fotobioreaktory až k otevřené venkovní kultivaci [2] .....	- 12 -
<b>Obr. 2</b> Kaskádovitá otevřená kultivační plošina v AV ČR v Třeboni [6] .....	- 14 -
<b>Obr. 3</b> Kaskády nakloněných ploch s filmovou vrstvou média [2] .....	- 15 -
<b>Obr. 4</b> Válcový fotobioreaktor [9].....	- 17 -
<b>Obr. 5</b> Horizontální trubkový fotobioreaktor [10].....	- 18 -
<b>Obr. 6</b> Deskový fotobioreaktor v laboratořích FS ČVUT v Praze. ....	- 18 -
<b>Obr. 7</b> Airlift panel photobioreactor [11] .....	- 19 -
<b>Obr. 8</b> Současný provoz deskového fotobioreaktoru.....	- 22 -
<b>Obr. 9</b> Diskový element iDISC společnosti INVENT [16] .....	- 26 -
<b>Obr. 10</b> Aerační membrána E-FLEX společnosti Invent .....	- 26 -
<b>Obr. 11</b> Pro vzdušňovací systém E-FLEX společnosti INVENT .....	- 27 -
<b>Obr. 12</b> Středobublinný systém TEX-FLEX společnosti KUNST [16].....	- 28 -
<b>Obr. 13</b> Různá provedení rotačních aerátorů společnosti KUNST [16] .....	- 29 -
<b>Obr. 14</b> Kombinovaný systém pomocí akcelérátoru a povrchové aerace [16] .....	- 30 -
<b>Obr. 15</b> Tvorba bublin závisí na mnoha parametrech [18].....	- 32 -
<b>Obr. 16</b> Závislost doby zdržení plynu na jeho rychlosti [21].....	- 36 -
<b>Obr. 17</b> Aerační membrána PUM 68 společnosti Vodní energie, s.r.o. [25] .....	- 40 -
<b>Obr. 18</b> Konstrukce elementu s membránou PUM68 [25].....	- 41 -
<b>Obr. 19</b> HDPE porézní trubka společnosti Alita Industries, Inc. [26] .....	- 42 -
<b>Obr. 20</b> Porézní hadice JetFlex společnosti Jaeger [27] .....	- 43 -
<b>Obr. 21</b> JetFlex EPDM membrána společnosti Jaeger .....	- 44 -
<b>Obr. 22</b> Aerační element společnosti ENVI-PUR [28] .....	- 44 -
<b>Obr. 23</b> Diskový element společnosti Envi-Pur [28] .....	- 45 -
<b>Obr. 24</b> Ilustrační obrázek koncepce řešení aerace v deskovém reaktoru .....	- 48 -
<b>Obr. 25</b> Varianta 1 sestavy pro porézní membránu o průměru 34,5 mm.....	- 49 -
<b>Obr. 26</b> Varianta 2 sestavy pro porézní membránu PUM68 .....	- 49 -
<b>Obr. 27</b> Fotky z výroby a montáže dvou variant aeračních elementů .....	- 51 -
<b>Obr. 28</b> Průtokoměr s regulačním ventilem .....	- 52 -
<b>Obr. 29</b> Kamera GoPro HERO 5 při spuštění experimentu.....	- 52 -
<b>Obr. 30</b> Kompresorová stanice společnosti Mattei ve školní laboratoři [29] .....	- 53 -
Návrh aeračního elementu pro deskový fotobioreaktor .....	- 72 -



<b>Obr. 31</b> Schéma zapojení testovacího zařízení pro měření.....	- 54 -
<b>Obr. 32</b> Fotografie ze záznamu experimentálního měření. ....	- 56 -
<b>Obr. 33</b> Vyhodnocení velikosti bublin v závislosti na průtoku plynu.....	- 57 -
<b>Obr. 34</b> Vyhodnocení rychlosti bublin v závislosti na průtoku plynu .....	- 58 -
<b>Obr. 35</b> Závislost doby zdržení na mimovrstvové rychlosti.....	- 59 -
<b>Obr. 36</b> Porovnání jednotlivých membrán a proudění bublin reaktorem .....	- 61 -
<b>Obr. 37</b> Závislost průměru póru membrány $d_h$ na průtoku plynu $V$ .....	- 62 -

## 10 Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b> Nutriční hodnoty v procentech různých druhů mikrořas [4].....	- 11 -
<b>Tab. 2</b> Porovnání jednotlivých typů kultivačních systémů [12] .....	- 20 -
<b>Tab. 3</b> Rozdělení typů aerace .....	- 25 -
<b>Tab. 4</b> Porovnání jednotlivých druhů aerace [17] .....	- 31 -
<b>Tab. 5</b> Vybrané korelace pro stanovení doby zdržení $\varepsilon g$ [14] .....	- 37 -
<b>Tab. 6</b> Srovnání koncentrace a produktivity <i>Chlorella vulgaris</i> při různé koncentraci CO <sub>2</sub> ve vstupním plynu [13] .....	- 38 -
<b>Tab. 7</b> Porovnání teoretického a naměřeného množství zachytu CO <sub>2</sub> v kultivačním médiu obsahující <i>Chlorella vulgaris</i> při různých hodnotách koncentrace CO <sub>2</sub> v dodávaném plynu [13] .....	- 38 -
<b>Tab. 8</b> Přehled HDPE trubek firmy Alita Industries, Inc [26] .....	- 42 -
<b>Tab. 9</b> Výběr trubkových aeračních membrán pro experimentální část práce .....	- 46 -
<b>Tab. 10</b> Základní parametry pro experimentálního měření. ....	- 47 -
<b>Tab. 11</b> Soupis použitého materiálu pro experiment .....	- 50 -
<b>Tab. 12</b> Souhrn provozních parametrů experimentu .....	- 54 -
<b>Tab. 13</b> Porovnání současného a optimálního provozu fotobioreaktoru .....	- 63 -

## 11 Seznam příloh



<b>Příloha 1</b>	Porovnání hodnot kritický parametrů jednotlivých druhů mikrořas [1].....	- 76 -
<b>Příloha 2</b>	Protokol naměřených hodnot membrán JetFlex (EPDM) a PUM68 .....	- 77 -
<b>Příloha 3</b>	Protokol naměřených hodnot membrán E-Flex (EPDM, SILICONE).....	- 78 -
<b>Příloha 4</b>	Záznam měření membrány JetFlex (EPDM) společnosti Jaeger .....	- 79 -
<b>Příloha 5</b>	Záznam měření membrány E-Flex (Silicone) společnosti Invent .....	- 80 -
<b>Příloha 6</b>	Záznam měření membrány E-FLEX (EPDM) společnosti Invent.....	- 81 -
<b>Příloha 7</b>	Záznam měření membrány PUM68 (polyuretan) - Vodní energie .....	- 82 -
<b>Příloha 8</b>	Vyhodnocená data – Sauterův střední průměr bubliny $d_{32}$ .....	- 83 -
<b>Příloha 9</b>	Vyhodnocená data – rychlost bubliny $u_b$ .....	- 83 -
<b>Příloha 10</b>	Vyhodnocená data – Doba zdržení $\varepsilon_g$ .....	- 84 -
<b>Příloha 11</b>	Vyhodnocená data – Doba zdržení $\varepsilon_g$ dle různých korelací .....	- 84 -
<b>Příloha 12</b>	Vyhodnocená data – průměr póru membrány $d_h$ .....	- 84 -
<b>Příloha 13</b>	Vyhodnocená data – smyková rychlost $\gamma_{aeration} [s^{-1}]$ .....	- 85 -
<b>Příloha 14</b>	Vyhodnocená data – tečné napětí $\tau$ [Pa] .....	- 85 -
<b>Příloha 15</b>	Technická dokumentace – Aerační element 1 .....	- 86 -
<b>Příloha 16</b>	Technická dokumentace – Aerační element 2 .....	- 87 -
<b>Příloha 17</b>	Technická dokumentace – Napínací držák pro membránu (3D tisk) .....	- 88 -

## 12 Přílohy



Druh	Kmen	$\tau_{crit}$ (Pa)	Kritický průtok plynu (vvm)	Smyková citlivost
Zelené řasy	<i>S. obliquus</i> ( <i>S. dimorphus</i> )	0.9 Pa	>1.34	Trochu tolerantní
	<i>C. vulgaris</i>	0.9 Pa	0.16	Trochu tolerantní
	<i>C. reinhardtii</i>	0.2 Pa	>0.28	Citlivá
	<i>T. suecica</i>	>5.10 Pa		Trochu tolerantní
	<i>D. tertiolecta</i>		>0.25	Citlivá
Cyanobacteria	<i>A. flos-aquae</i>	<0.45 Pa		Citlivá
	<i>S. platensis</i>	0.3 Pa	0.73–2.5	Citlivá
	<i>S. elongatus</i>			Trochu tolerantní
	<i>Synechocystis sp.</i>	>0.114 Pa		Trochu tolerantní
Červené řasy	<i>P. cruentum</i>		1.8	Citlivá

\*vvm (volume air per volume culture per minute) = objem plynu na objem vsádky za minutu

**Příloha 1** Porovnání hodnot kritický parametrů jednotlivých druhů mikrořas [1]

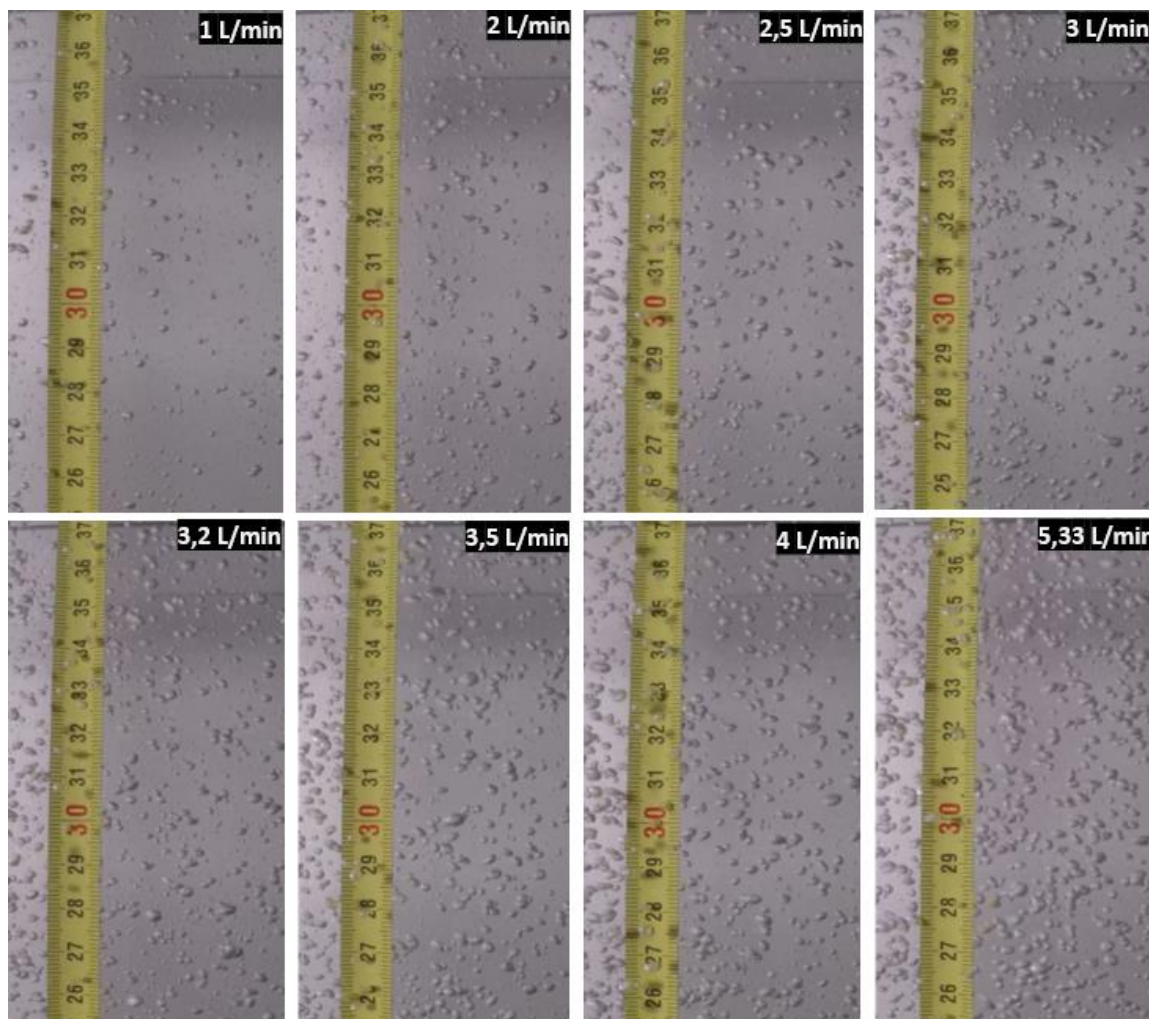
PROTOKOL NAMĚŘENÝCH HODNOT				
DATUM		26.04.2021		 
TEPLOTA		21,5 °C		
TLAK		0,988 Mpa		
PRŮTOK - NASTAVÍM NA POŽADOVANOU HODNOTU POMOCÍ ŠKRTČÍHO VENTILU NA PRŮTOKOMĚRU				
NÁZEV MEMBRÁNY		TLAK PLYNU		POČÁTEČNÍ HLADINA H <sub>0</sub> [cm]
JetFlex - Jaeger (EPDM)		0,13 MPa		51,5
POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [l min <sup>-1</sup> ]	PRŮTOK vvm*	VÝŠKA HLADINY H1 [cm]	GAS HOLDUP (ZDRŽENÍ PLYNU) [-]
1	1,00	0,0500	51,7	0,003868472
2	2,00	0,1000	51,9	0,007707129
3	2,50	0,1250	52,05	0,010566763
4	3,00	0,1500	52,2	0,013409962
5	3,20	0,1600	52,3	0,015296367
6	3,50	0,1750	52,4	0,017175573
7	4,00	0,2000	52,45	0,018112488
8	5,33	0,2665	52,5	0,019047619
NÁZEV MEMBRÁNY		TLAK		POČÁTEČNÍ HLADINA H <sub>0</sub> [cm]
PUM68 - Vodní energie		0,13 MPa		53
POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [l min <sup>-1</sup> ]	PRŮTOK vvm*	VÝŠKA HLADINY H1 [cm]	GAS HOLDUP (ZDRŽENÍ PLYNU) [-]
1	1,00	0,0500	53,3	0,005628518
2	2,00	0,1000	53,6	0,01119403
3	2,50	0,1250	53,7	0,013035382
4	3,00	0,1500	53,8	0,014869888
5	3,20	0,1600	53,9	0,016697588
6	3,50	0,1750	54	0,018518519
7	4,00	0,2000	54	0,018518519
8	5,33	0,2665	54,1	0,020332717
*VVM (VOLUME AIR PER VOLUME CULTURE PER MINUTE) OBJEM PLYNU NA OBJEM VSÁDKY ZA MINUTU				

*Příloha 2* Protokol naměřených hodnot membrán JetFlex (EPDM) a PUM68

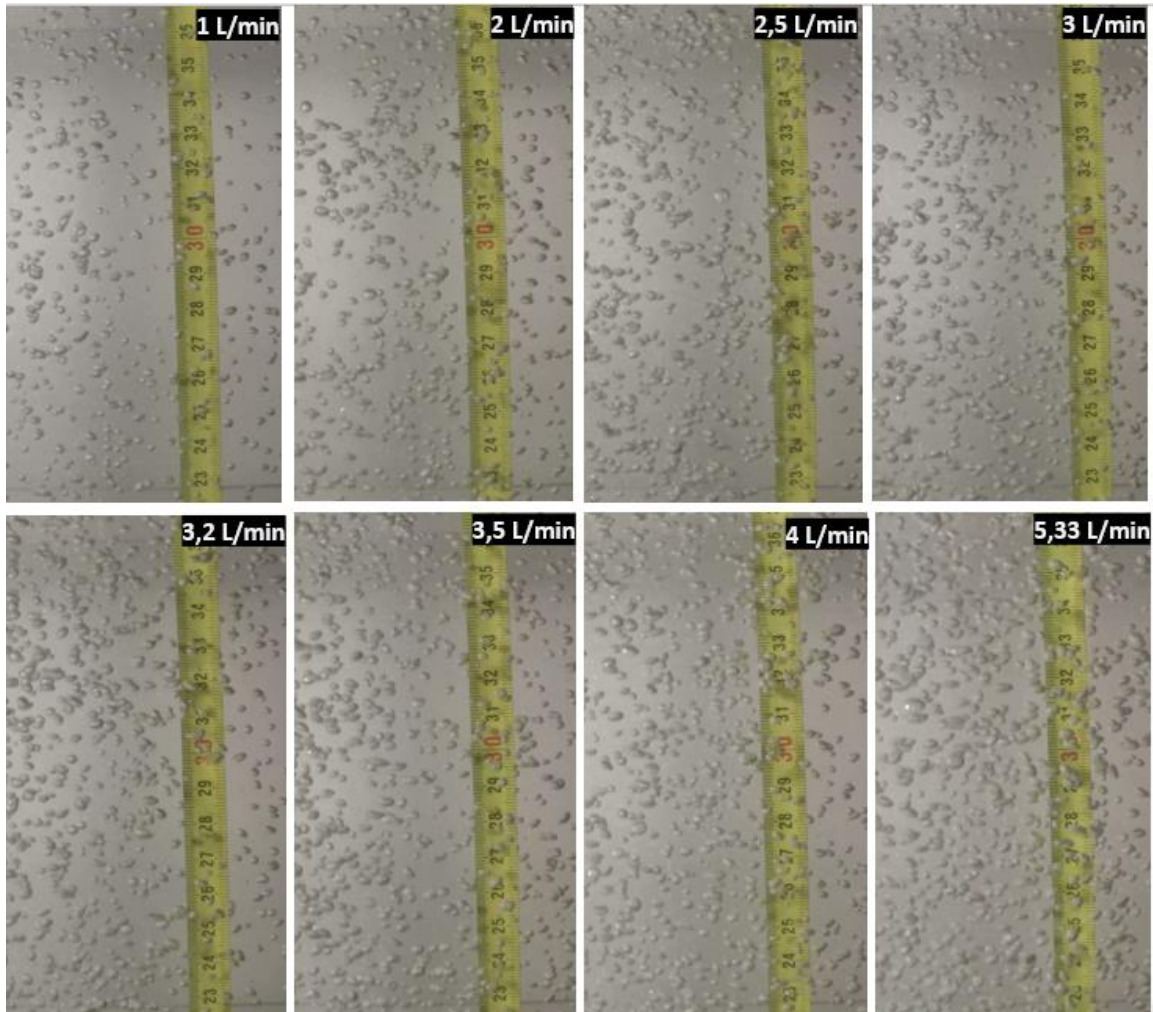
PROTOKOL NAMĚŘENÝCH HODNOT				
DATUM <u>29.04.2021</u>		PRŮTOK - NASTAVÍM NA POŽADOVANOU HODNOTU POMOCÍ ŠKRTÍČÍHO VENTILU NA PRŮTOKOMĚRU		
TEPLOTA <u>21,5 °C</u>				
TLAK <u>0,988 Mpa</u>				
				
NÁZEV MEMBRÁNY		TLAK PLYNU		POČÁTEČNÍ HLADINA H <sub>0</sub> [cm]
E-Flex - Invent (Silicone)		0,13 MPa		51,1
POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [l min <sup>-1</sup> ]	PRŮTOK vvm*	VÝŠKA HLADINY H1 [cm]	GAS HOLDUP (ZDRŽENÍ PLYNU) [-]
1	1,00	0,0500	51,3	0,00390
2	2,00	0,1000	51,5	0,00777
3	2,50	0,1250	51,6	0,00969
4	3,00	0,1500	51,7	0,01161
5	3,20	0,1600	51,8	0,01351
6	3,50	0,1750	51,85	0,01446
7	4,00	0,2000	51,9	0,01541
8	5,33	0,2665	52,1	0,01919
NÁZEV MEMBRÁNY		TLAK		POČÁTEČNÍ HLADINA H <sub>0</sub> [cm]
E-Flex - Invent (EPDM)		0,13 MPa		51,1
POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [l min <sup>-1</sup> ]	PRŮTOK vvm*	VÝŠKA HLADINY H1 [cm]	GAS HOLDUP (ZDRŽENÍ PLYNU) [-]
1	1,00	0,0500	51,3	0,00390
2	2,00	0,1000	51,5	0,00777
3	2,50	0,1250	51,6	0,00969
4	3,00	0,1500	51,7	0,01161
5	3,20	0,1600	51,8	0,01351
6	3,50	0,1750	51,85	0,01446
7	4,00	0,2000	51,9	0,01541
8	5,33	0,2665	52,1	0,01919

\*vvm (VOLUME AIR PER VOLUME CULTURE PER MINUTE)  
OBJEM PLYNU NA OBJEM VSÁDKY ZA MINUTU

**Příloha 3** Protokol naměřených hodnot membrán E-Flex (EPDM, SILICONE)

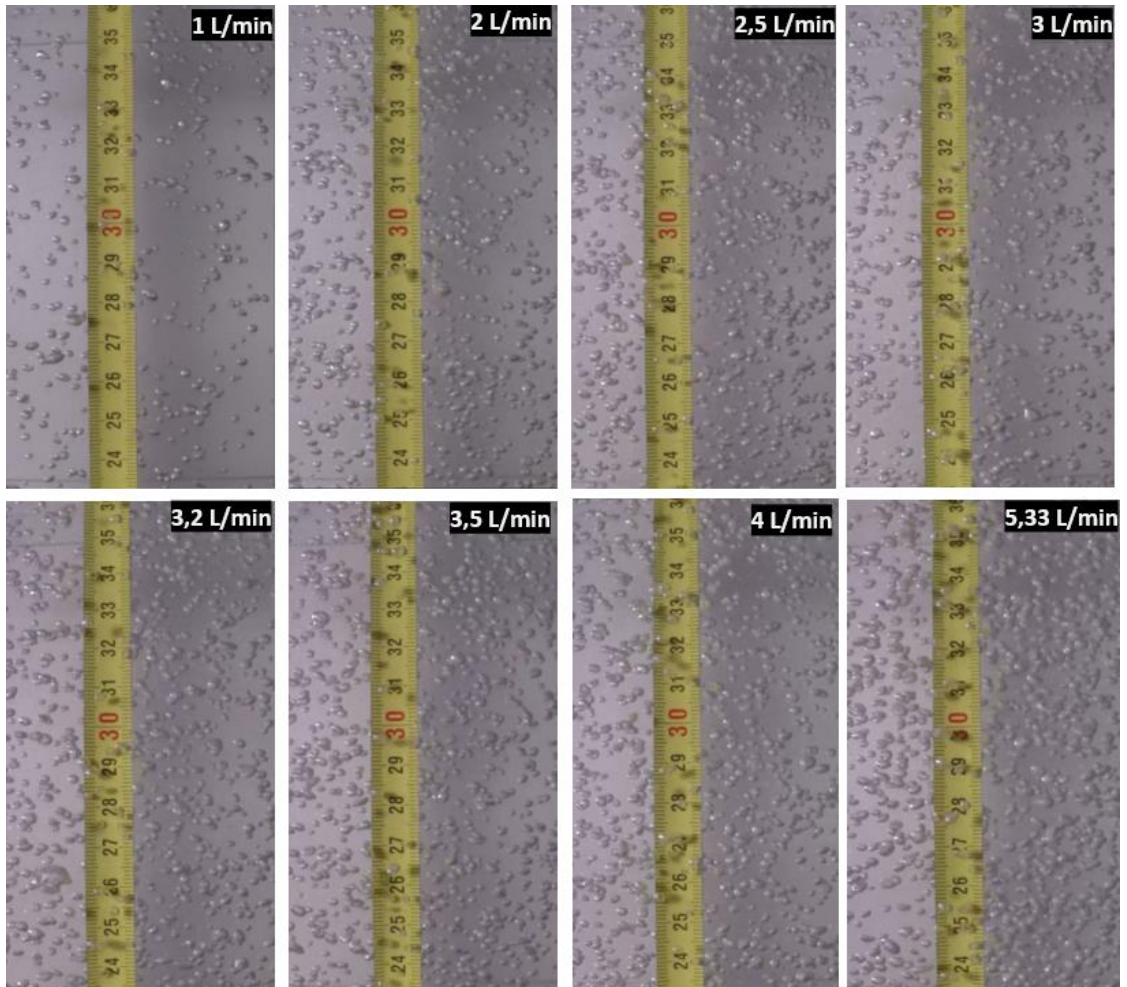


*Příloha 4* Záznam měření membrány JetFlex (EPDM) společnosti Jaeger

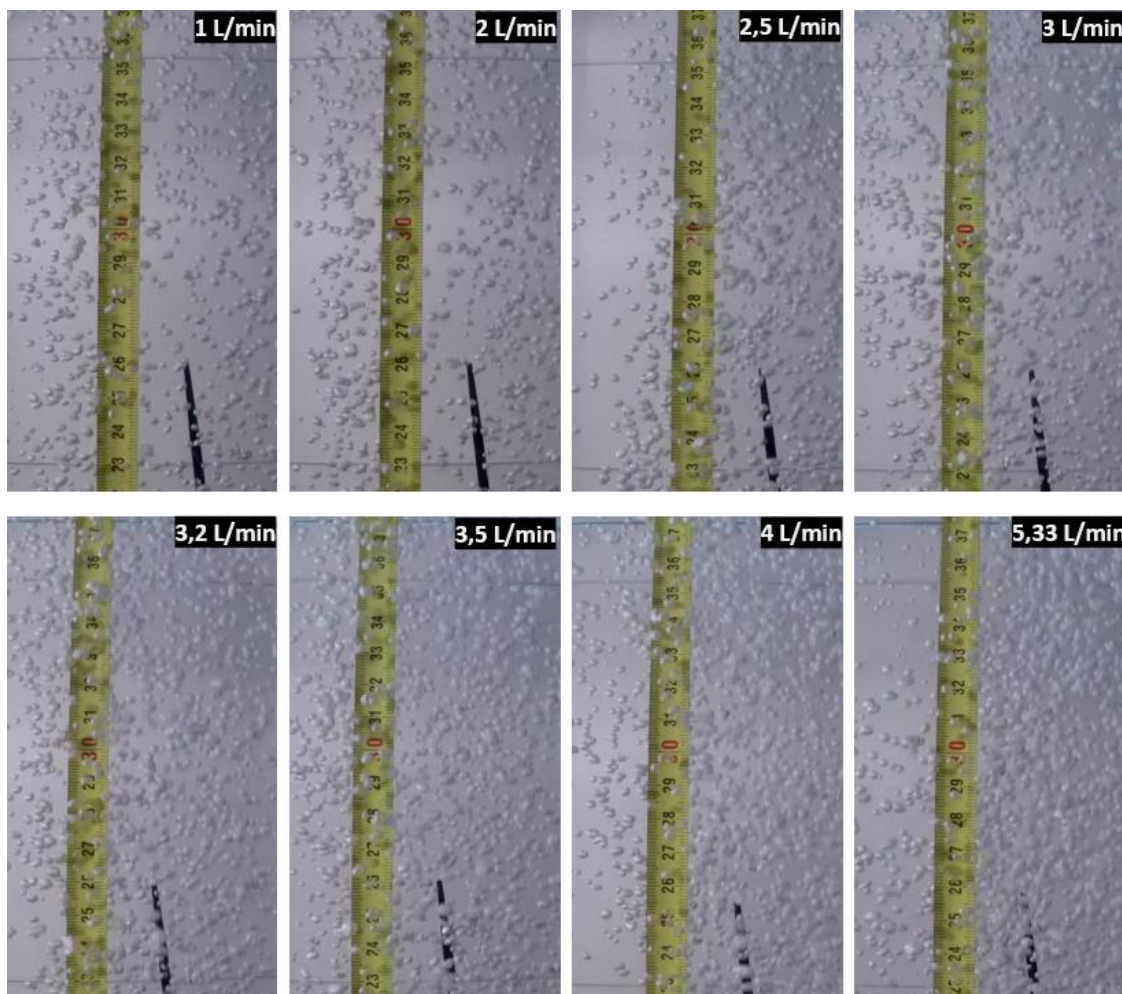


*Příloha 5 Záznam měření membrány E-Flex (Silicone) společnosti Invent*





*Příloha 6 Záznam měření membrány E-FLEX (EPDM) společnosti Invent*



*Příloha 7 Záznam měření membrány PUM68 (polyuretan) - Vodní energie*

Membrána			JetFlex (EPDM)	E-Flex (Silicone)	E-Flex (EPDM)	PUM68 (polyuretan)
měření	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	vvm [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> min <sup>-1</sup> ]	d <sub>32</sub> [mm]	d <sub>32</sub> [mm]	d <sub>32</sub> [mm]	d <sub>32</sub> [mm]
1	1,00	0,0500	1,987	2,181	2,330	1,830
2	2,00	0,1000	2,237	2,323	2,387	2,403
3	2,50	0,1250	2,328	2,354	2,367	2,297
4	3,00	0,1500	2,358	2,380	2,385	2,364
5	3,20	0,1600	2,368	2,383	2,389	2,397
6	3,50	0,1750	2,403	2,387	2,392	2,408
7	4,00	0,2000	2,440	2,418	2,404	2,434
8	5,33	0,2665	2,475	2,569	2,434	2,456

**Příloha 8** Vyhodnocená data – Sauterův střední průměr bubliny  $d_{32}$

Membrána			JetFlex (EPDM)	E-Flex (Silicone)	E-Flex (EPDM)	PUM68 (polyuretan)
měření	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	vvm [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> min <sup>-1</sup> ]	$u_b$ [m s <sup>-1</sup> ]	$u_b$ [m s <sup>-1</sup> ]	$u_b$ [m s <sup>-1</sup> ]	$u_b$ [m s <sup>-1</sup> ]
1	1,00	0,0500	0,026	0,024	0,024	0,024
2	2,00	0,1000	0,030	0,030	0,029	0,027
3	2,50	0,1250	0,030	0,031	0,030	0,027
4	3,00	0,1500	0,031	0,032	0,030	0,028
5	3,20	0,1600	0,032	0,031	0,031	0,029
6	3,50	0,1750	0,033	0,033	0,031	0,029
7	4,00	0,2000	0,033	0,033	0,031	0,030
8	5,33	0,2665	0,033	0,034	0,032	0,031

**Příloha 9** Vyhodnocená data – rychlost bubliny  $u_b$

Membrána		JetFlex (EPDM)	E-Flex (Silicone)	E-Flex (EPDM)	PUM68 (polyuretan)	
měření	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	vvm [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> min <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_g$ [-]	$\epsilon_g$ [-]	$\epsilon_g$ [-]	$\epsilon_g$ [-]
1	1,00	0,0500	0,00387	0,00390	0,00390	0,00563
2	2,00	0,1000	0,00771	0,00777	0,00777	0,01119
3	2,50	0,1250	0,01057	0,01065	0,00969	0,01304
4	3,00	0,1500	0,01341	0,01256	0,01161	0,01487
5	3,20	0,1600	0,01530	0,01446	0,01351	0,01670
6	3,50	0,1750	0,01718	0,01446	0,01446	0,01852
7	4,00	0,2000	0,01811	0,01636	0,01541	0,01852
8	5,33	0,2665	0,01905	0,01919	0,01919	0,02033

**Příloha 10** Vyhodnocená data – Doba zdržení  $\epsilon_g$

měření	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	mimovrstvová rychlost $u_g$ [m s <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_g$ Uysal a kol.[14]	$\epsilon_g$ Bouafi a kol.[14]	$\epsilon_g$ Zedníková a kol.[14]	$\epsilon_g$ Godbole a kol.[14]
1	1,00	0,00043	0,00489	0,00592	0,00717	0,01022
2	2,00	0,00087	0,00779	0,01052	0,01089	0,01442
3	2,50	0,00108	0,00904	0,01266	0,01246	0,01611
4	3,00	0,00130	0,01022	0,01472	0,01391	0,01763
5	3,20	0,00139	0,01067	0,01553	0,01446	0,01820
6	3,50	0,00152	0,01133	0,01673	0,01526	0,01903
7	4,00	0,00173	0,01239	0,01869	0,01654	0,02033
8	5,33	0,00231	0,01502	0,02372	0,01967	0,02345

**Příloha 11** Vyhodnocená data – Doba zdržení  $\epsilon_g$  dle různých korelací

Membrána		JetFlex (EPDM)	E-Flex (Silicone)	E-Flex (EPDM)	PUM68 (polyuretan)	
měření	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	vvm [m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> min <sup>-1</sup> ]	$d_h$ [mm]	$d_h$ [mm]	$d_h$ [mm]	$d_h$ [mm]
1	1,00	0,0500	0,152	0,185	0,237	0,130
2	2,00	0,1000	0,204	0,208	0,243	0,194
3	2,50	0,1250	0,224	0,236	0,249	0,212
4	3,00	0,1500	0,217	0,227	0,256	0,227
5	3,20	0,1600	0,228	0,246	0,254	0,236
6	3,50	0,1750	0,257	0,247	0,250	0,246
7	4,00	0,2000	0,264	0,256	0,260	0,250
8	5,33	0,2665	0,263	0,306	0,275	0,256

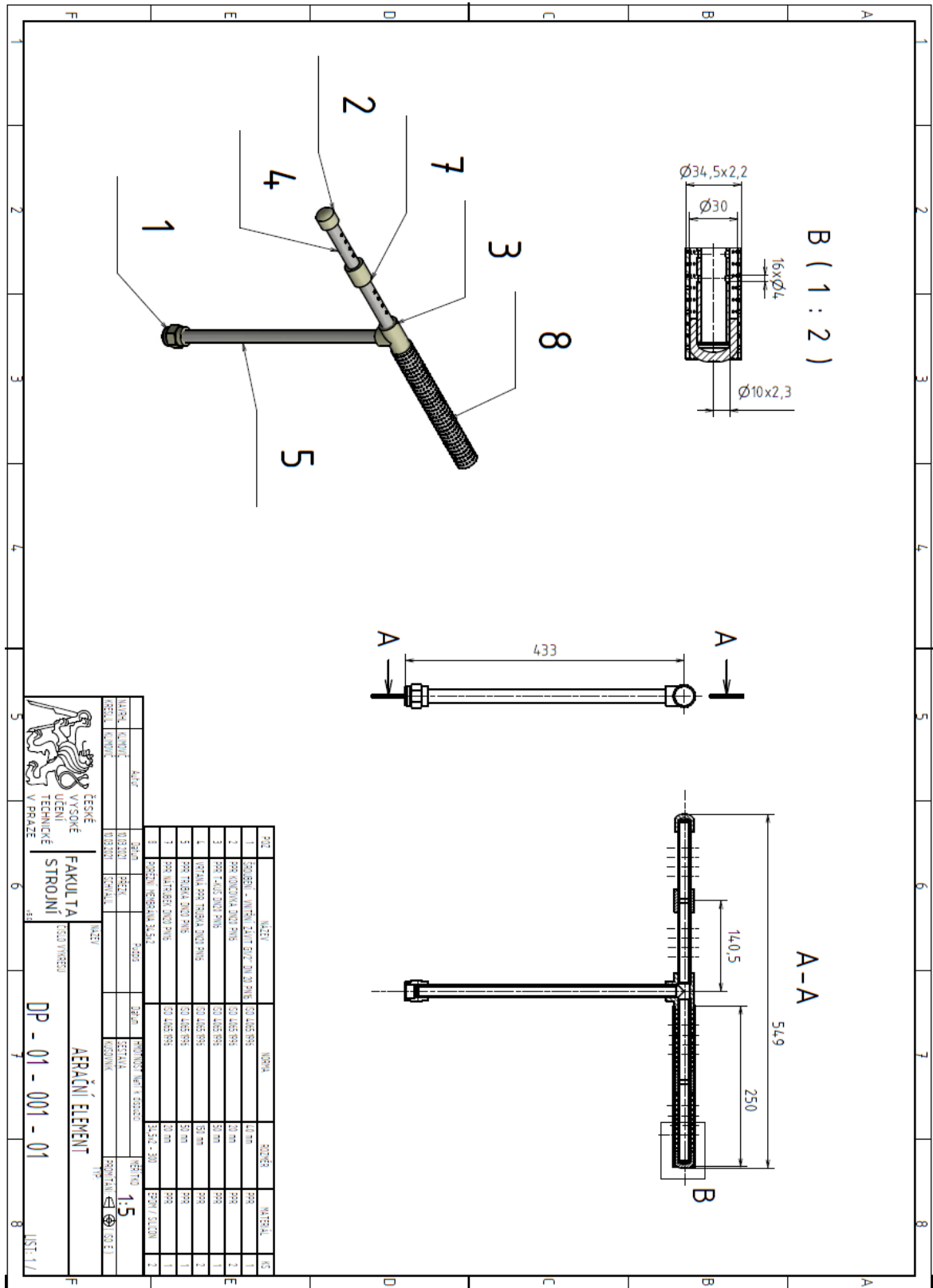
**Příloha 12** Vyhodnocená data – průměr póru membrány  $d_h$

měření	Membrána		JetFlex (EPDM)	E-Flex (Silicone)	E-Flex (EPDM)	PUM68 (polyuretan)
	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	$\frac{vvm}{[m^3 m^{-3} min^{-1}]}$	$\gamma_{aeration}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\gamma_{aeration}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\gamma_{aeration}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\gamma_{aeration}$ [s <sup>-1</sup> ]
1	1,00	0,0500	27,3812	24,1337	21,7523	26,7907
2	2,00	0,1000	28,8878	28,4095	25,9579	24,9471
3	2,50	0,1250	28,0492	28,5575	26,7813	25,4373
4	3,00	0,1500	29,6000	29,3975	27,0824	26,4471
5	3,20	0,1600	29,3779	28,3301	27,5735	26,9957
6	3,50	0,1750	29,0701	29,5052	27,8671	26,4521
7	4,00	0,2000	29,1122	29,5298	27,8746	27,3073
8	5,33	0,2665	29,5053	28,1856	27,7162	27,2238

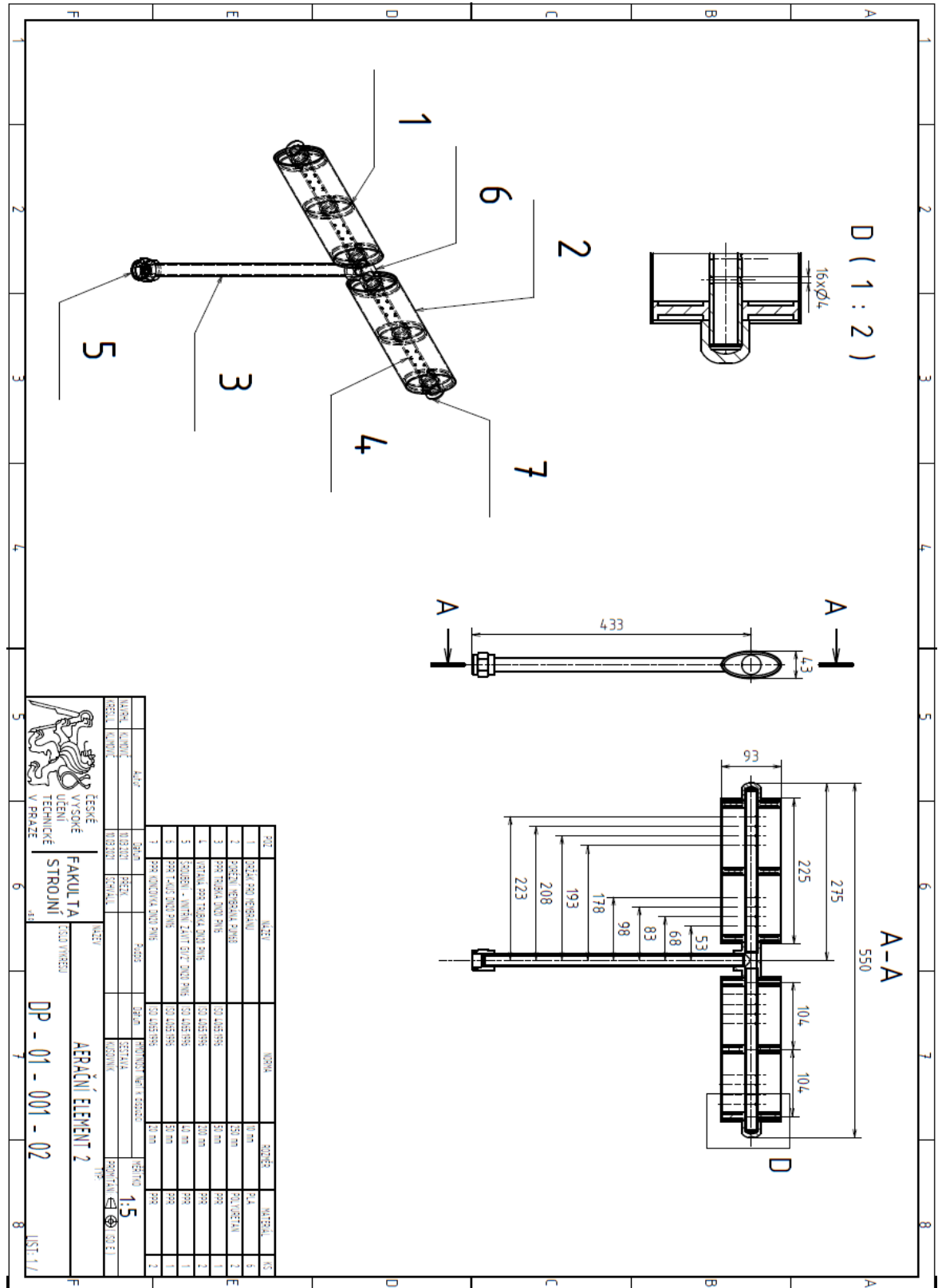
**Příloha 13** Vyhodnocená data – smyková rychlost  $\gamma_{aeration}$  [s<sup>-1</sup>]

měření	Membrána		JetFlex (EPDM)	E-Flex (Silicone)	E-Flex (EPDM)	PUM68 (polyuretan)
	$\dot{V}$ [l min <sup>-1</sup> ]	$\frac{vvm}{[m^3 m^{-3} min^{-1}]}$	$\tau$ [Pa]	$\tau$ [Pa]	$\tau$ [Pa]	$\tau$ [Pa]
1	1,00	0,0500	0,0274	0,0241	0,0218	0,0268
2	2,00	0,1000	0,0289	0,0284	0,0260	0,0249
3	2,50	0,1250	0,0280	0,0286	0,0268	0,0254
4	3,00	0,1500	0,0296	0,0294	0,0271	0,0264
5	3,20	0,1600	0,0294	0,0283	0,0276	0,0270
6	3,50	0,1750	0,0291	0,0295	0,0279	0,0265
7	4,00	0,2000	0,0291	0,0295	0,0279	0,0273
8	5,33	0,2665	0,0295	0,0282	0,0277	0,0272

**Příloha 14** Vyhodnocená data – tečné napětí  $\tau$  [Pa]



Příloha 15 Technická dokumentace – Aerační element 1



Příloha 16 Technická dokumentace – Aerační element 2

