

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



**LABORATORNÍ TENKOVRSŤVÝ
FOTOBIOREAKTOR**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

JAKUB JANKOVEC

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jankovec** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **487125**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Laboratorní tenkovrstvý fotobioreaktor.

Název bakalářské práce anglicky:

Laboratory thin-layer photobioreactor

Pokyny pro vypracování:

- Vypracujte konstrukční návrh tenkovrstvého fotobioreaktoru pro kultivaci mikrořas.
- Zpracujte rešerši dané problematiky (procesní podmínky kultivace, konstrukce tenkovrstvých fotobioreaktorů) a vytipujte vhodné konstrukční uspořádání pro provoz v laboratorních podmínkách v kontextu s potenciálem jeho průmyslového použití.
 - Navrhnete základní konstrukční uspořádání a provedte potřebné procesní výpočty.
 - Provedte potřebné pevnostní výpočty.
 - Vypracujte výkresovou dokumentaci ve formě kótované sestavy.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, že jsem řádně citoval všechny použité prameny a literaturu, a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne 3.8.2022

.....
Jakub Jankovec

Autor: Jakub Jankovec

Název práce: Laboratorní tenkovrstvý fotobioreaktor

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Bibliografické údaje: Počet stran: 70
Počet obrázků: 30
Počet tabulek: 14
Počet příloh: 2

Abstrakt: Hlavním tématem této bakalářské práce jsou tenkovrstvé fotobioreaktory, čemuž je věnovaná rešeršní a praktická část práce. Dále je v této práci definován pojem mikrořasy, jejich vlastnosti, kultivační požadavky, základní druhy, zpracování a použití. Také jsou v této práci popsány základní druhy fotobioreaktorů. Praktická část se věnuje procesnímu výpočtu Taylor-Couettova proudění v navrhovaném laboratorním měřítku tenkovrstvého fotobioreaktoru, a také samotnému návrhu a teoretické konstrukci zmíněného fotobioreaktoru.

Klíčová slova: Tenkovrstvé fotobioreaktory, Taylor-Couettovo proudění, návrh fotobioreaktoru, Taylorovo číslo, mikrořasy, fotobioreaktory laboratorního měřítka, chlorella

Author: Jakub Jankovec

Title: Laboratory thin-layer photobioreactor

Thesis type: Bachelor's thesis

Thesis advisor: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., Department of Process Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague

Bibliographical notes: Number of pages: 70
Number of figures: 30
Number of tables: 14
Number of appendices: 2

Abstract: The main theme of this bachelor's thesis are thin-layer photobioreactors, which is the subject of theoretical part of the study and practical part of the thesis. Furthermore, the thesis defines the concept of microalgae, their properties, cultivation requirements, basic species, processing and the use. Basic types of the photobioreactors are also described in this thesis. The practical part is based around the process calculation of Taylor-Couett flow in the proposed laboratory scale of the thin-layer photobioreactor, as well as to the actual design and theoretical construction of the said photobioreactor.

Key words: Thin-film photobioreactors, Taylor-Couett flow, photobioreactor design, Taylor number, microalgae, lab-scale photobioreactors, chlorella

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky, ochotu a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Velké poděkování také patří mé rodině, která mě podporovala během celého mého studia a psaní bakalářské práce.

Jakub Jankovec

Obsah

Úvod	10
1 Základní procesní podmínky kultivace mikrořas	11
1.1 Mikrořasy	11
1.1.1 Základní typy	11
1.1.2 Zpracování a užití	11
1.2 Teplota	13
1.3 Živiny	13
1.3.1 Uhlík	14
1.3.2 Dusík	14
1.3.3 Fosfor	14
1.4 <i>pH</i>	15
1.5 Zdroj světla	15
2 Tenkovrstvé fotobioreaktory	17
2.1 Současné konstrukce fotobioreaktorů	17
2.1.1 Otevřené kultivační systémy	17
2.1.1.1 Otevřené nádrže	17
2.1.1.2 Kruhové nádrže	17
2.1.1.3 Traťové nádrže	18
2.1.1.4 Kaskádové systémy	19
2.1.2 Uzavřené kultivační systémy – fotobioreaktory	20
2.1.2.1 Trubkové fotobioreaktory	21
2.1.2.2 Deskové fotobioreaktory	23
2.1.2.3 Válcové fotobioreaktory	24
2.2 Literární rešerše tenkovrstvých fotobioreaktorů	25
2.3 Patentová rešerše konstrukčního uspořádání tenkovrstvých fotobioreaktorů	28

3	Shrnutí klíčových informací	33
4	Definice procesních podmínek a požadavků na konstrukci.....	34
5	Návrh základního konstrukčního uspořádání.....	36
6	Procesní výpočet	38
6.1	Obecný popis problematiky a popis výpočtu Taylor-Couettova proudění.....	38
6.2	Zjištění prvního a druhého kritické Taylorovo číslo	41
6.3	Reologické vlastnosti.....	45
6.4	Konfigurace parametrů	46
6.5	Citlivostní analýza	48
6.5.1	Citlivostní analýza čistého kultivačního média.....	49
6.5.2	Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella	51
6.5.3	Citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas Chlorella na pracovní otáčky a na momenty síly.....	53
6.5.3.1	Citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas Chlorella na pracovní otáčky.....	53
6.5.3.2	Citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas Chlorella na momenty síly	54
6.5.3.3	Definice momentů síly vznikajících na průměru vnitřního válce reaktoru vlivem pracovních otáček.....	54
6.6	Provozní podmínky.....	55
7	Konstrukční návrh fotobioreaktoru.....	57
7.1	Konstrukční návrh	57
7.2	Pevnostní kontrola	60
7.2.1	Kontrola kritického průměru hřídele na krut.....	60
7.2.2	Kontrola hřídele a vnitřního válce s tvarovým spojem – Těsné pero.....	60
7.2.3	Určení životnosti radiálního jednořadého kuličkového ložiska	61
8	Závěr	63
9	Reference	64

Seznam obrázků	68
Seznam tabulek	69
Seznam příloh.....	70

Úvod

Nejrozšířenějšími systémy ke kultivaci mikrořas jsou otevřené vodní nádrže [8], tyto zařízení jsou uzpůsobeny k vysoké produkci mikrořas, díky své velké rozloze a množství kultivované vsádky, na úkor jejich efektivity [8]. Jedním z hlavních úskalí, se kterými se velké průmyslové kultivační systémy potýkají, je efektivita světelného prozařování svrchní ozařované vrstvy kultivované vsádky, což má za následek fotoinhibici buněk (poškození buněk vlivem světelného záření), nacházející se právě v této svrchní vrstvě [8, 42]. Fotoinhibice buněk má za následek limitní koncentrace kultivačních zařízení, ale také svrchní vrstva znemožňuje vstup světelného záření do níže položených vrstev kultivované vsádky, čímž znemožňuje růst mikrořas v celém objemu média [42]. Tomuto jevu se často předchází procesem míchání vsádky, což spotřebovává značné množství energie při kultivaci mikrořas [8].

Existují ale také jiné přístupy k řešení konstrukce kultivačního systému, a to například značným redukováním kultivačního média v poměru k rozloze zařízení, čímž můžeme docílit tenké vrstvy vsádky ve světelně ozařovaných prostorech kultivačního systému. Tímto konstrukčním řešením můžeme docílit značně větších koncentrací mikrořas v médiu [4, 40, 42].

Moje práce se bude soustředit na návrh, procesní výpočet a teoretickou konstrukci právě tenkovrstvého fotobioreaktoru v laboratorním měřítku.

1 Základní procesní podmínky kultivace mikrořas

1.1 Mikrořasy

Mikrořasy jsou termín označující eukaryotické mikroskopické řasy a prokaryotické sinice, jednobuněčné nebo jednoduché mnohobuněčné organismy existující jednotlivě, v řetězcích nebo koloniích [8, 23, 40]. Velikostně se pohybují od druhů o velikosti jednotek mikrometrů, až po druhy o velikosti stovek mikrometrů [23, 42]. Pro svůj růst vyžadují světlo, oxid uhličitý, vodu (sladkou, mořskou i brakickou) a živiny (především fosfor a dusík) [3, 4, 10]. Pomocí procesu fotosyntézy přeměňují tyto nezbytné složky v energii, kterou používají ke svému vývoji. Nejzastoupenějšími chemickými složkami mikrořas jsou lipidy (látky skládající se z uhlíku, vodíku a kyslíku), bílkoviny, sacharidy, uloženými v buňce mikrořasy [1, 4, 23, 40].

Mikrořasy disponují vynikající flexibilitou a přizpůsobivostí k růstu v rozmanitých podmínkách, čímž vyžadují méně média než pevninské rostliny. Schopnost růstu je oproti konvenčním rostlinám pětikrát až desetkrát rychlejší [8, 23, 41].

Kultivační požadavky jako světlo, oxid uhličitý, teplota, *pH* a živiny ovlivňují vlastnosti mikrořas. Světlo poskytuje energii pro proces fotosyntézy a mikrobiální růst. Oxid uhličitý je zdroj uhlíku pro vývoj buňky mikrořasy. Teplota, *pH* i živiny jsou zapotřebí udržovat v ideálních podmínkách k podpoře mikrobiálního růstu [23, 40, 42].

1.1.1 Základní typy

Množství známých mikrořas je velmi omezené a z toho množství je stále menší část těch, které by byly chemicky popsány. Tento problém nastává z důvodu nezměrné biodiverzity. Zdroje zmiňují existenci 200 000 až 800 000 druhů mikrořas, ale pouze mezi 40 000 až 50 000 chemicky popsánymi druhy jsou nám známy [4, 42]. Tyto chemicky popsané druhy řadíme do kmenů *Chlorophyceae* (zelené řasy), *Cyanophyceae* (modro-zelené řasy), *Chrysophyceae* (zlaté-řasy), *Rhodophyceae* (červené řasy), *Phaeophyceae* (hnědé řasy) a *Bacillariophyceae* (rozsivky) [42].

1.1.2 Zpracování a užití

Po završení etapy kultivace mikrořas, nastává sklizeň a zpracování mikrořas, tyto procesy činní kolem 25 % celkových nákladů při produkci biomasy mikrořas. Sklizení jednotlivých buněk nebo vláken je provedeno nejčastěji oddělovacími procesy v odstředivkách, filtrací, flotací nebo flokulací (vločkováním). Samotný výběr metody je závislý na rozměrech druhu zpracovávaných

mikrořas [23, 31]. Zatímco druhy tvořené vlákny a buňkami větších rozměrů lze separovat filtrací na vibračních sítích, jiné druhy menších rozměrů je nutné separovat různými druhy flokulace například: polyaluminiumchlorid, pro bioseparaci chitosan nebo autoflokulací změnou *pH*. [23]. Dále při separaci buněk menších rozměrů lze využít proces flotace doprovázený přívodem vzduchu, kdy probubláváním média dochází ke zachytávání buněk mikrořas na povrchu bublin a následnému shlukování buněk plouvocích na povrchu média [23]. Lze se setkat i s využitím separace membránovou filtrací, tento proces se potýká s komplikacemi vlivem membránového foulingu (usazování buněk na povrchu nebo pórech membrány). Při dobré separaci buněk lze dosáhnout směsi s obsahem 20-30 % biomasy [23]. Po úspěšné separaci buněk je nutné rozrušení buněk mikrořas, protože tyto buňky mohou mít silné buněčné stěny, které by znemožňovali následné zpracování [23, 40]. Tento proces se provádí většinou mechanicky v homogenizátorech nebo chemickými metodami [23]. Mezi poslední procesy zpracování se řadí proces dehydratace. Proces se provádí několika metodami, nejčastěji solárním sušením, rozprašovacím sušením nebo lyofilizací [23].

Mikrořasy produkují různé zásobní nebo pro ně obranné látky, jako jsou polynenasycené mastné kyseliny, lipidy, antioxidanty. Také ale produkují imunologicky účinné, virostatické a cytostatické sloučeniny [23].

Některé druhy mikrořas řádu *Nannochloropsis* nebo *Chlorella* se díky své vysoké produkci lipidů, biologických molekul, které se rozpouštějí v organickém rozpouštědle, mohou užívat jako alternativní surovina pro výrobu biopaliv jako jsou bionafta, biomasa, biobutanol, bioethanol, bioolej, metan a jiné spalitelné plyny [23, 31, 34].

Kultivace mikrořas je v několika ohledech mnohem výhodnější na produkci biopaliv než vyšší rostliny, především výtěžek uskladněných látek na jednotku plochy je mnohem vyšší než tradiční vyšší rostliny k produkci biomasy, mikrořasy mohou být kultivovány v podmínkách nepříznivých pro normální zemědělství, kultivace může probíhat za řízených podmínek, mohou růst i v nepříznivých podmínkách mořské nebo brakické vody pro normální zemědělství, dokáží využít důležité výživové látky jako fosfor a dusík z odpadních vod a odpadního oxidu uhličitého. Díky možnosti kultivace v extrémních podmínkách se mikrořasy také používají ke zpracování opadů. [1, 23].

Dále se mikrořasy také velmi užívají ve zdravotnickém, gastronomickém a kosmetickém průmyslu, především pro svůj potenciál zlepšit nutriční hodnoty klasického jídla, pro své probiotické a antibiotické kultury, nenasycené mastné kyseliny (linolová, linolenová,

arachidonová, eikosapentaenová a dokosahexaenoidová) a přírodní antioxidanty. Mikrořasy mohou potenciálně těmito složkami zásobovat celé potravní řetězce, díky čemuž jsou velmi dobře zastoupeny na biotechnologickém trhu pro lidské potraviny a zvířecí krmivo. Kosmetika založená na lipidové bázi z mikrořas je také dobře zastoupená na trhu díky svým vyživujícím a ochranným schopnostem [1, 23, 40].

1.2 Teplota

Udržování rozsahu teploty kultivačního média je nezbytným požadavkem pro růst mikrořas, především z důvodu procesu fotosyntézy a vázání uhlíku [42]. Každý druh má optimální rozsah teploty pro růst buněk, tímto lze mikrořasy řadit do tří skupin: *psychrophiles* ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$), *mesophiles* ($< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) a *thermophiles* ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) [42]. Většina užitečných řas z pohledu produkce lipidů mají toleranci teploty v rozsahu od $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40]. Teplotní optimum ke kultivaci se nejčastěji pohybuje kolem $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40]. Teplota zároveň dokáže ovlivňovat mnoho faktorů v životním cyklu řasy [8, 42]. A právě životní cyklus řasy je jeden z nich. Vysoké teploty kolem $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dokáží urychlit růst a vývoj buňky, zlepšením absorpce a fixace oxidu uhličitého, ale zmenšit velikost buňky, růst biomasy a zkrátit její životní cyklus, a to v některých případech o více než 2x, oproti nižším teplotám (např. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) [8, 40, 42]. Nižší teploty kolem $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ naopak zpomalují růst a vývoj, ale dokáží prodloužit životní cyklus buňky. Avšak při pomalejším vývoji a růstu se v mikrořasách může objevovat až dvakrát větší množství Deoxyribonukleové kyseliny (DNA), Ribonukleové kyseliny (RNA) a vybraných proteinů. Pokud během životního cyklu je teplota změněna z nižší na vyšší, dochází u řas k rychlejšímu dělení a vytvoření více dceřiných buněk. Pokud je teplota naopak snižována, buňky se dělí méně a tvoří se méně dceřiných buněk. Životní cyklus mikrořas nesouvisí příliš s rychlostí růstu nebo s množstvím biomasy buněk. Enzym cyklindependentní kináza má také důležitou roli v působení teploty na průběh buněčného cyklu [8, 40, 42].

1.3 Živiny

Kultury mikrořas vyžadují ke svému vývoji esenciální makroživiny, vitamíny a stopové prvky v příslušných množstvích a v biologicky dostupných chemických formách [42]. Mezi nejvýznamnější prvky při kultivaci mikrořas se řadí uhlík v zastoupení v sušině biomasy mezi 30 % až 50 % hmotnostními procenty, vodík v zastoupení v sušině biomasy mezi 3 % až 7 % hmotnostními procenty, dusík v zastoupení v sušině biomasy mezi 4 % až 9 % hmotnostními procenty, fosfor v zastoupení v sušině biomasy mezi 1 % až 3 % hmotnostními procenty a menší množství dalších prvků jako jsou: síra, draslík, hořčík, vápník a jiné stopové prvky [40].

Zastoupení těchto prvků v kultivačním médiu bývá různé dle druhu mikrořas, stádia kultivačního cyklu a námi požadovaných parametrů při kultivaci. Pro idealizaci kultivačního procesu vývoje buňky médium musí tyto prvky obsahovat v požadovaném zastoupení a v rozpuštěné formě v kultivačním médiu [40, 42].

1.3.1 Uhlík

Dávkování uhlíku do kultivačního média lze provádět v plynné formě oxidem uhličitým, v tomto případě je dávkování uhlíku buňkám přístupná pouze část plynu, která se chemickou reakcí oxidu uhličitého s kultivačním médiem (vodou) přeměňuje na kapalnou fázi, tedy oxid uhličitý se při reakci s vodou přeměňuje na kyselinu uhličitou, hydrogenuhličitan nebo uhličitán v závislosti na *pH* média [7, 40, 42]. Dodávka uhlíku by se v průběhu kultivačního cyklu neměla přerušovat, aby nedocházelo k omezení aktivity buněk [40]. Výtěžek 1 *kg* mikrořas v suchém stavu zužitkuje v průměru přibližně 1,83 *kg* oxidu uhličitého, což je více jak dvojnásobné množství oproti vyšším rostlinám. Spotřeba nabývá až trojnásobně, kvůli efektivnějšímu procesu fotosyntézy mikrořas oproti vyšším rostlinám [8]. Buňky mikrořas jsou uzpůsobeny zpracovávat i průmyslové odpadní spaliny [8].

1.3.2 Dusík

Dodávka dusíku do kultivačního média lze provádět ve formách močoviny, dusičnanu nebo amoniaku. Ačkoliv s dávkováním močoviny a amoniaku vyvstává problém z důvodu možnosti toxicity při vyšších úrovních *pH* média [4]. Jako zdroj dusíku se z uvedených důvodů nejčastěji při kultivaci většiny druhů mikrořas využívají dusičnany, a to v koncentraci v rozsahu 100 až 800 *mg/L* sušiny na objem vsádky. Nejčastěji se lze setkat s dávkováním dusičnanu vápenatého nebo dusičnanu sodného v koncentracích od 0,5 *g/L* do 2 *g/L* sušiny na objem vsádky [40]. Přísun dusík velmi ovlivňuje růst a metabolismus buněk mikrořas.

1.3.3 Fosfor

Fosfor jakožto další důležitý prvek ovlivňující růst buněk mikrořas je limitující živinou pro vývoj buňky. Organické molekuly buněk jako Deoxyribonukleové kyseliny (DNA), Ribonukleové kyseliny (RNA), fosfolipidy (buněčné membrány) a Adenosintrifosfáty (ATP) obsahují fosfor [42]. Buňky mikrořas mají schopnost vytvářet zásoby přebytku fosforu, čímž se stávají velmi efektivními při čištění kontaminovaných vod.

1.4 *pH*

Kultivace nižších i vyšších rostlin je založena na prosperitě při ideálních podmínkách v prostředí, tato prosperita se snižuje s kvalitou dostupného prostředí, kdy variace druhů vystavených prostředí má větší nebo menší toleranci vůči těmto podmínkám. Požadovaný rozsah hodnoty *pH*, tedy míra kyselosti (snižující se hodnota *pH* pod hodnotu 7,0) nebo míra zásaditosti (zvyšující se hodnota *pH* nad hodnotu 7,0), kterému je buňka vystavena je jedním z hlavních aspektů, jenž většina organismů vyžadují pro správnou funkci a vývoj [4, 8, 40, 42]. Hodnota *pH* ovlivňuje biochemické procesy v buňce mikrořasy, včetně příjmu uhlíku ať už formou při přeměně z oxidu uhličitého nebo jiné, procesu fotosyntézy k vývoji buňky nebo využití živin v kultivačním médiu [8, 42]. Optimální *pH* je blízce spjato s druhem mikrořasy. Druhy mohou prosperovat při hodnotě *pH* kolem 7,0, některé při vysokých hodnotách *pH* 11,0 (*Spirulina*), jiné zase nízkým *pH* 4,0 (*Chlorococcum*), kultivace mikrořas *Chlorella vulgaris* je na pomezí extrémů, kdy optimální *pH* pro kultivaci je kolem hodnoty 7,0 [8, 37].

Ideální růst mikrořas v kyselém nebo zásaditém médiu může být udržován, pokud vnitrobuněčné *pH* mikrořas se udržuje při vyžadované hodnotě 7,5, nezávisle na prostředí *pH* vně buňky. Žijící buňky mají do určitého rozsahu schopnost udržovat vnitrobuněčné *pH* vylučováním vodíkových iontů [8]. Optimální *pH* média musí být udržováno k prevenci kolapsu buněčných kultur narušením až prasknutím buněčné stěny vlivem vysokého *pH*. Regulace hodnot *pH* lze chemickou reakcí oxidu uhličitého s vodou v kultivačním médiu, což má vliv na snižování hodnoty *pH* média a vytváření kyselého prostředí [8]. Mikrořasy regulují kyselost média samovolně při procesu fotosyntézy, kdy vedlejším efektem tohoto procesu je navyšování hodnot *pH* média [40]. Vysoká hodnota *pH* může urychlit proces těkavosti amoniaku a proces samovolného srážení fosforu [8].

1.5 Zdroj světla

Spektrum světla a jeho intenzita přímo ovlivňuje výkon fototrofního růstu mikrořas, což je proces získání energie pro vývoj a růst buňky ze světla (především) [8]. Zdroje světla můžeme rozdělit na pasivní (přírodní) a aktivní (umělé). Za pasivní zdroj považujeme sluneční záření. Sluneční záření má značné nedostatky, není možnost jej ovládat, což má za následek například: denní a noční cyklus, fluktuace záření v závislosti na počasí a změnách ročních období, závislost na poloze. Aktivními zdroji světla se tyto nedostatky snažíme potlačit, což způsobuje problém z ekonomického hlediska, kdy sluneční záření je volně emitovaná energie ze slunce, zatímco aktivnímu zdroji je třeba energii dodávat v podobě elektrické energie, aby ji mohl částečně

přeměňovat na světlo. Za aktivní zdroj můžeme označit světlo uměle vytvořené, například světlo emitující diody (LED), optické vlákno a výbojkové světelné zdroje [8, 23, 40].

Existuje závislost mezi intenzitou světelného záření a rychlostí procesu fotosyntézy, kdy lze uvažovat tři různé režimy dle intenzity světelného záření [42]:

- a) Intenzita světelného záření je nulová až nízká a limitující pro rychlost vývoje buňky, což zpomaluje proces fotosyntézy limitací rychlosti pohlcování fotonů buňkami [42].
- b) Intenzita světelného záření je v ideálním rozsahu, což má za následek maximální dosažitelné výsledky procesem fotosyntézy (pomineme-li jiné faktory ovlivňující proces fotosyntézy), kdy limitujícím faktorem se stává rychlost samotné reakce procesu fotosyntézy [42].
- c) Intenzita světelného záření se stále navyšuje, což má za následek fotoinhibici, a tedy proces fotosyntézy se zpomaluje vlivem rostoucího poškození světelných receptorů buněk (klíčové bílkoviny v chloroplastech) s rostoucí intenzitou světelného záření [42].

Optimální rozsah intenzity světelného záření PPF (fotosyntetická hustota toku fotonů) je pro většinu mikrořas v rozsahu $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ až $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Proces fotosyntézy mikrořas vyžaduje solární rozsah spektra, ačkoliv zvýšené hodnoty koncentrace ultra fialového záření UV mohou poškodit buňky [8, 42]. V potaz se také musí vzít (mimo fotosyntetické hustoty toku fotonů) tloušťka, koncentrace buněk a rychlost promíchávání kultivačního média, kdy tloušťka a koncentrace buněk znemožňují efektivní prostup světelného záření vrstvou média, tudíž je za potřebí promíchávání neozařované části objemu buněk v kultivačním médiu, tímto lze zefektivnit proces kultivace mikrořas. Zefektivnění procesu kultivace mikrořas znamená větší výnos biomasy, případně i zkrácení kultivačního cyklu. Promíchávání může mít i negativní vliv na kultivaci mikrořas, je za potřebí dosáhnout ideální rovnováhy kultivačního systému (fotobioreaktoru) mezi osvětlováním a promícháváním média [8, 40, 42].

2 Tenkovrstvé fotobioreaktory

2.1 Současné konstrukce fotobioreaktorů

Mikrořasy je možné kultivovat v mnoha typech vodních kultivačních systémů. Kultivační systémy se dělí do tří základních skupin: Otevřené, uzavřené a hybridní kultivační systémy [4].

2.1.1 Otevřené kultivační systémy

Otevřené kultivační systémy mají rozmanité podoby, které mají využití v průmyslovém i poloprovozním měřítku. Nejvyužívanějšími zástupci otevřených systému jsou otevřené nádrže a kaskádové systémy s tenkou stékající vrstvou [4, 23, 42].

2.1.1.1 Otevřené nádrže

Jedná se o nejjednodušší a nejvíce používané otevřené kultivační systémy. Jsou tvořeny horizontálními nádržemi různých oválných tvarů a velikostí, součástí konstrukce většinou je míchací prvek, nejčastěji ve formě oběžného kola s lopatkami nebo rotačním ramenem, což zajišťuje neustálé proudění a míšení média (vody). Hloubka nádrží je efektivně volena subjektivně ke kladeným nárokům, aby docházelo k účinnému průniku světelného záření vsádkou s mikrořasami do co možná nejhlubší vrstvy kanálu [4, 23, 42]. Příklad zařízení je na Obr. 1.



Obr. 1 Příklad otevřené nádrže [23]

2.1.1.2 Kruhové nádrže

Kruhové nádrže jsou svojí konstrukcí podobné nádržím určeným k dekontaminaci vody, kdy je nádrž konstantně promíchávána rotačním ramenem. Tyto kultivační systémy mají možnost pracovat v nepřetržitém režimu, s potřebou dodáváním vody, živin a sklizení mikrořas k udržování optimální koncentrace [4, 8]. Příklad zařízení je na Obr. 2.



Obr. 2 Příklad kruhové nádrže [23]

Výhodami těchto systému jsou jejich možnosti zpracovávat velké množství média, nenáročná obsluha, snadná údržba i čištění a relativně nízká cena v porovnání s jinými typy kultivačních systému [4, 8, 23].

Nevýhodami jsou především nízká produktivita systému v závislosti na objemu kultivačního média, komplikovaná kontrola nad systémem z pohledu udržování teploty a distribuce potřebných látek médiem. Systém je velmi náchylný na kontaminaci, což znemožňuje produkci řadě typů mikrořas. Dochází k odpařování média. Efektivní velikost dna nádrže je omezena přibližně na 1 ha, nad touto hodnotou plochy už nelze zaručit rovnoměrné promíchávání [4, 8, 23].

2.1.1.3 Traťové nádrže

Traťové nádrže jsou v mnoha ohledech podobné kruhovým nádržím, přičemž se liší způsobem promíchávání média. Kanál je promícháván oběžným kolem s lopatkami, což systému umožňuje zásadně změnit tvar v traťové kanály [4, 23, 42]. Příklad zařízení je na Obr. 3.



Obr. 3 Příklad traťové nádrže [23]

Výhody jsou v podstatě stejné jako u kruhových nádrží, s rozdílem možností navrhnutí okruhu kanálu, kdy je toto omezeno pouze prouděním média, což lze řešit přidáním dalších oběžných kol s lopatkami [4, 8].

Nevýhody jsou velmi podobné kruhovým nádržím [4, 8, 23].

2.1.1.4 Kaskádové systémy

Kaskádové systémy jsou tvořeny řadou přepadově spojených panelových nádob, zadržovací nádobou, přepadem a zařízením zajišťující promíchávání a proudění média. Mikrořasy jsou kultivovány v rovnoměrné tenké vrstvě média, která stéká po nakloněné rovině panelů. Fakt, že kultivace probíhá v tenké vrstvě média, která dovoluje regulaci, umožňuje efektivní průchod světelného záření skrze vsádku [4, 8, 23, 42]. Příklad zařízení je na Obr. 4.



Obr. 4 Příklad kaskádového systému [23]

Výhodami kaskádových systémů jsou především tenká vrstva kultivačního média, nenáročná obsluha, snadná údržba i čištění, relativně nízká cena a náklady [4, 8].

Nevýhodami jsou především nízká produkce oproti jiným otevřeným kultivačním systémům, při stejném využití zástavbové plochy, komplikovaná kontrola nad systémem podobně jak u jiných otevřených kultivačních systémů, náchylnost ke kontaminaci, dochází k intenzivnějšímu odpařování média, než u jiných druhů otevřených systémů [4, 8, 42].

2.1.2 Uzavřené kultivační systémy – fotobioreaktory

Za účelem intenzifikace výroby mikrořas se zmenšením zástavbového prostoru a množství kultivačního média, byly vyvinuty uzavřené kultivační systémy – fotobioreaktory. Intenzivnějších výsledků kultivace lze dosáhnout zajištěním kontrolovaného kultivačního prostředí, čímž jsou řízení teploty média, řízení potřebných rozpustných výživových prvků v kultivačním médiu (uhlík, dusík, fosfor a další potřebné stopové prvky), řízení hodnoty pH média a případně přidání aktivního zdroje světla (umělý zdroj světla), za účelem zesílení intenzity dostupného světelného záření buňkám [4, 6, 23, 42]. Řízení kultivačních podmínek fotobioreaktorů je zprostředkováno především vnějšími zařízeními, která jsou přidanou součástí kultivačních systémů, tvořené většinou z kruhových, plošných nebo jinak tvarovaných připojených transparentních materiálů. Nejvyužívanější konstrukce uzavřených fotobioreaktorů rozdělují systém do dvou sekcí. Provdušňovací sekce zajišťující chemickou reakcí částečnou přeměnu oxidu uhličitého na prvky rozpustitelné v kultivačním médiu, také zde může docházet k separaci produktu z kultivačního média. Ozařovací sekce sloužící především k intenzifikaci kultivace, skládá se z transparentních materiálů k zajištění prostupu světelného záření do média [4, 6, 42]. Uzavřené kultivační systémy mají rozmanité podoby, které mají využití v průmyslovém i laboratorním měřítku.

Nejvyužívanějšími zástupci uzavřených fotobioreaktorů jsou trubkové, deskové a válcové fotobioreaktory. Všechny tyto systémy se snaží o vystavení co největšího zastoupení kultivačního média světelnému záření [6, 42].

Uzavřením kultivačního systému lze také dosáhnout sterilního prostředí, což předchází kontaminaci z okolního prostředí. Tato vlastnost umožňuje kultivaci environmentálně náchylnějších druhů mikrořas [4, 6].

Ke distribuci a míchání kultivačního média se většinou využívá čerpadla, aeračního systému nebo míchadla. Toto je potřebné pro redukci procesu usazování mikrořas v prostorech kultivačního systému. Aerační systém se využívá především k intenzifikaci reakce oxidu uhličitého s kultivačním médiem a promíchávání vsádky [6, 42].

Z ekonomického hlediska jsou uzavřené kultivační systémy nákladnější na vybudování, provoz a údržbu než otevřené kultivační systémy, což je způsobeno především náročnější a propracovanější konstrukcí, vyšší spotřebou energií pro efektivní chod a údržbu oproti otevřeným kultivačním systémům [4, 6].

2.1.2.1 Trubkové fotobioreaktory

Trubkové fotobioreaktory jsou konstruovány spojením transparentních trubkových profilů, za účelem umožnit ozařovat médium světelným zářením skrze materiál trubek. Trubkové fotobioreaktory se rozdělují dle uložení trubek na horizontální, vertikální, nakloněné a spirální [4]. Dochází k cirkulaci kultivačního média fotobioreaktorem prouděním skrze na sebe napojené profilové tratě, čímž se vsádka promíchává [6]. Příklady zařízení jsou na Obr. 5 a Obr. 6.



Obr. 5 Příklad trubkového fotobioreaktoru horizontálního [23]



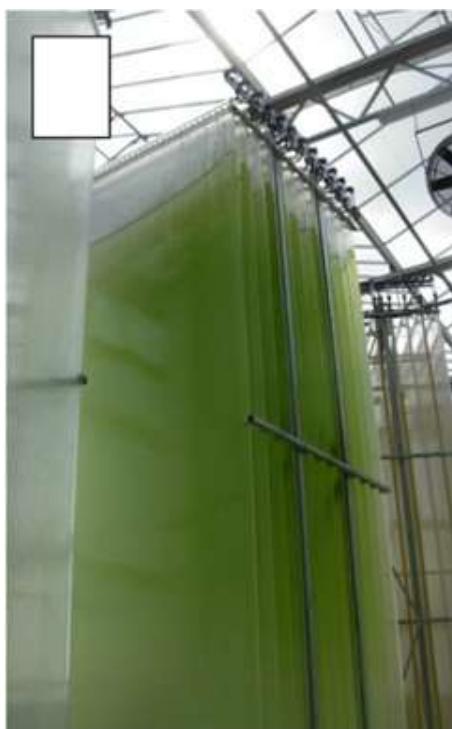
Obr. 6 Příklad trubkového fotobioreaktoru vertikálního [23]

Výhodami trubkových systémů jsou především relativně tenká vrstva kultivačního média, zamezení kontaminace systému okolím, vysoká produktivita systému v závislosti na použití kultivačního média, dobrý přenos živin a uhlíku do média, snadná korekce pH média [4, 40, 42].

Nevýhodami trubkových systémů jsou především nedokonalá hladkost transparentních materiálů držící kultivační médium, to má za následek vytváření kalu na těchto plochách, což redukuje průsvitnost, komplikované čištění a údržba [4, 6, 24].

2.1.2.2 Deskové fotobioreaktory

Deskové fotobioreaktory jsou konstruovány převážně z transparentních desek o počtu dvou a více, uložených za sebou s mezerou pro průtok kultivačního média mezi těmito deskami. Toto umožňuje plošné tenkovrstvé prozařování kultivačního média [4, 6, 23]. Kvůli rychlé reprodukci mikrořas, způsobené znatelně intenzivnějším procesem fotosyntézy, je třeba kontinuálně snižovat koncentraci mikrořas odváděním z kultivačního média, aby se předešlo vysoké koncentraci mikrořas v médiu. Vysoká koncentrace mikrořas v médiu negativně ovlivňuje prostup světelného záření vsádkou, proto je jej třeba zaměňovat za čerstvé kultivační médium [4, 6, 23]. Dochází k cirkulaci kultivačního média fotobioreaktorem prouděním skrze za sebe napojené profilové tratě, čímž se vsádka promíchává [6]. Příklad zařízení je na Obr. 7.



Obr. 7 Příklad deskového fotobioreaktoru [23]

Výhody deskových fotobioreaktorů jsou především možnost až velmi tenké vrstvy kultivačního média a menších nákladů na údržbu, nadále jsou výhody velmi podobné trubkovým fotobioreaktorům [4, 6, 42].

Nevýhody deskových systémů jsou velmi podobné trubkovým fotobioreaktorům, s rozdílem intenzivnějšího vlivu sedimentace [4, 6, 42].

2.1.2.3 Válcové fotobioreaktory

Válcové fotobioreaktory jsou konstruovány z transparentních válcových nádob, kdy nastává problém s prozařováním světla kultivačním médiem. Je třeba zajistit důkladné promíchávání vsádky. Na rozdíl od doposud zmíněných typů uzavřených fotobioreaktorů jsou válcové fotobioreaktory promíchávány pouze pneumaticky (aeračním systémem ve spodní části válcové nádoby), případně i mechanicky [4, 6, 23]. Příklad zařízení je na Obr. 8.



Obr. 8 Příklad válcové fotobioreaktoru [23]

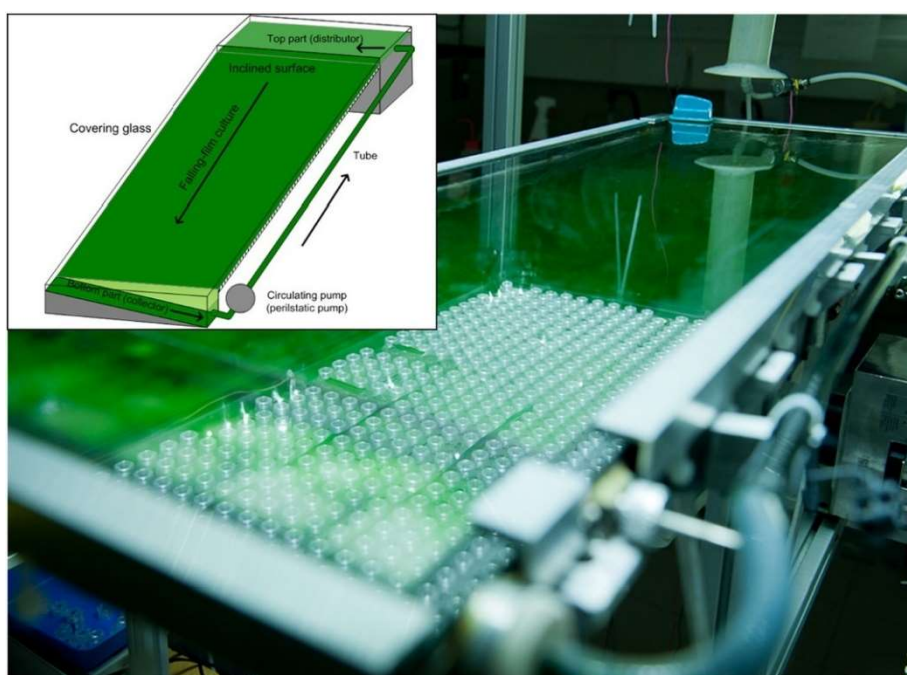
Výhodami válcových systémů jsou především možnost využití velkých objemů kultivačního média s relativně malým postihem na ozařovanou plochu, zamezení kontaminace systému okolím prostředím, možnost velmi dobré difúze živin v médiu, možnost intenzivní chemické reakce oxidu uhličitého s médiem za cílem dodávky potřebného uhlíku mikrořasám, nekomplikovaná kontrola a regulace *pH* média [4, 6, 23].

Nevýhodami trubkových systémů jsou především nedokonalá hladkost transparentních materiálů držící kultivační médium, což má za následek vytváření kalu na těchto plochách, což redukuje průsvitnost povrchu, nutnost intenzivního promíchávání za účelem redukování procesu sedimentace mikrořas [4, 6, 23].

2.2 Literární rešerše tenkovrstvých fotobioreaktorů

Vývoj tenko-filmového solárního fotobioreaktoru AlgoFilm© s vysokou objemovou produktivitou biomasy založeného na procesově intenzifikačních principech (J. Pruvost a kol.)

Práce J. Pruvost a kol. [26] prezentovala racionální vývoj až finální charakterizaci a validaci intenzifikovaného solárního fotobioreaktoru pro produkci mikrořas, cílem práce byl vývoj zařízení AlgoFilm©, vyobrazeno a schematicky popsáno na Obr. 9, zařízení disponujícího velmi vysokým objemovým výkonem produkce fototrofních organismů, který se nachází v rozsahu podmínek fermentačních procesů [26].



Obr. 9 Fotobioreaktor AlgoFilm© a jeho schématické zapojení [26]

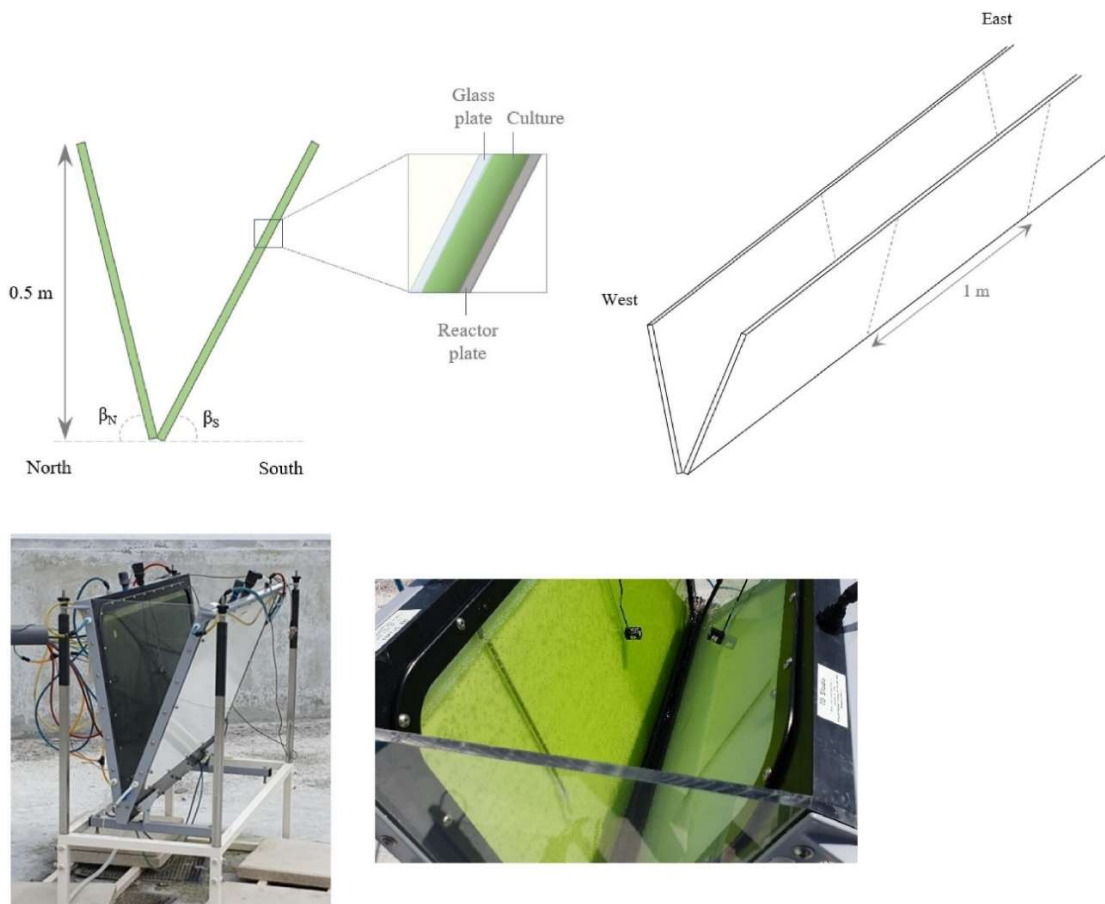
Zařízení je založeno na principu stékajícího filmu média, což umožňuje velmi tenkou vrstvu kultivované vsádky média s buňkami protékající tímto zařízením. Tloušťka vrstvy stékajícího média se pohybuje v rozmezí 1,5 mm až 2,0 mm, což spolu s velkými rozměry zařízení umožňuje dosáhnout velké ozařované plochy média v poměru s objemem média, dosahující hodnoty kolem $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, což odpovídá $2,1 \text{ l}/\text{m}^2$ (Litrů média na metr čtvereční ozařované plochy). Objem největšího aplikovaného modelu zařízení činí 2000 l a nachází se ve městě Třeboň v České republice [26].

Při definování výkonu zařízení AlgoFilm©, skupina J. Pruvost a kol. [26] kultivovala kmen mikrořas *Chlorella vulgaris* za režimu přerušované a nepřerušované kultivace, k dosažení typických podmínek světelného ozařování v průběhu roční operace ve městě Nantes, ležící

v západní Francii, byl použit LED panel k simulaci konstantního a následně plně kontrolovaného cyklu denního a nočního režimu osvětlování [26]. Nejlepší dosažené naměřené a zdokumentované hodnoty výsledků produkce skupinou J. Pruvost a kol. [26] jsou $7,07 \text{ kg m}^{-3} \text{ den}^{-1}$ (kilogram sušiny mikrořas na metr krychlový média za den) pro režim konstantního ozařování a $5,70 \text{ kg m}^{-3} \text{ den}^{-1}$ (kilogram sušiny mikrořas na metr krychlový média za den) pro režim ozařování v denním a nočním cyklu [26].

Unikátní design fotobioreaktoru ve tvaru V pro kultivaci mikrořas v nízkých zeměpisných šířkách (Rocca C.Chin-On a kol.)

Práce Rocca C.Chin-On a kol. [16] prezentovala unikátní design fotobioreaktoru ve tvaru V pro kultivaci mikrořas v nízkých zeměpisných šířkách. Snaha při vývoji tohoto fotobioreaktoru byla na snížení ekonomických nákladů na produkci mikrořas, zvýšením produkce mikrořas venkovního fotobioreaktoru intenzifikací ozařované plochy. Fotobioreaktor byl navržen na zeměpisné podmínky v blízkosti rovníku na ostrově Bonaire v Karibiku, které jsou považovány za ideální z pohledu slunce jako zdroje světelného záření [16]. Zařízení je vyobrazeno na Obr. 10 [16].



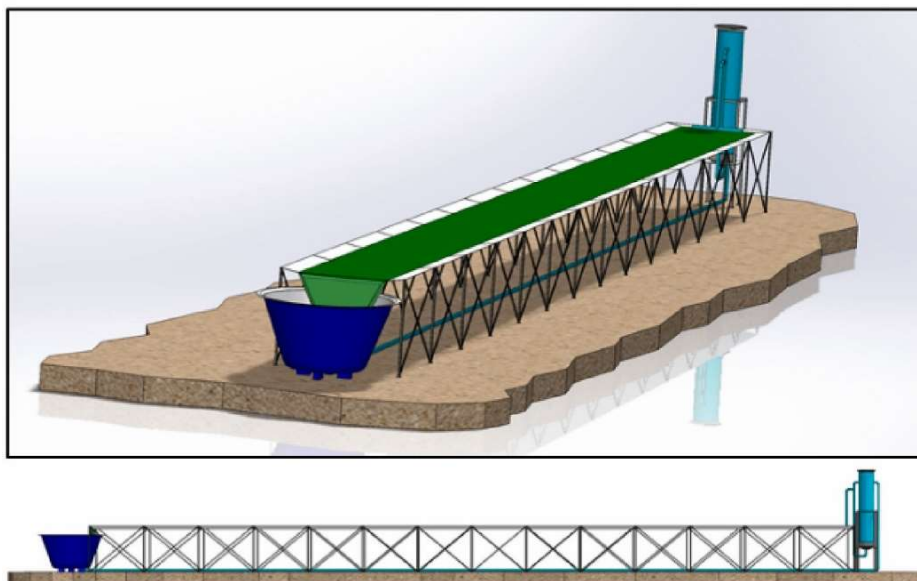
Obr. 10 Design fotobioreaktoru ve tvaru V [16]

Zařízení je deskový fotobioreaktor v unikátním tvaru do V s tenkou vrstvou kultivačního média 10 mm, navržený k zachycení a efektivního utlumení dostupného slunečního záření v nízkých zeměpisných šířkách. Myšlenkou efektivního utlumení dopadajícího záření na tento deskový fotobioreaktor je předejetí efektu fotoinhibice u buněk ozařovaných intenzivním slunečním světelným zářením, a tak neomezovat produkci zpomalením, případně až poškozením mikrořas [16]. Efektivní útlum spočívá ve tvaru fotobioreaktoru, který využívá lomu světla k utlumení dopadajícího světelného slunečního záření. Zároveň minimalizuje ztráty světelného záření kompletním zakrytím plochy podlaží, odrazem a záchytem světelného záření mezi plochami reaktoru [16].

Při definování výkonu zařízení, skupina Rocca C.Chin-On a kol. [16] počítala výsledky pro teoretickou kultivaci kmene mikrořas *Chlorella sorokiniana* za přirozených podmínek slunečního světelného záření, v průběhu teoretické roční operace na ostrově Bonaire v Karibiku [16]. Teoretické dosažitelné hodnoty výsledků produkce mikrořas přes rok skupinou Rocca C.Chin-On a kol. [16] jsou 38,3-50,5 g m⁻² den⁻¹ (gramů sušiny mikrořas na horizontální zastavěné oblasti za den) s předpokladem koncentrace vsádky 0,4-3,6 g l⁻¹ den⁻¹ (gramů sušiny mikrořas na litr vsádky za den). Svůj výsledek porovnávali s teoreticky počítaným deskovým horizontálním fotobioreaktorem klasické konstrukce, unikátní zařízení při stejných teoretických podmínkách projevovalo zvýšenou produkci mikrořas až 1,4krát než teoretický horizontální deskový fotobioreaktor klasické konstrukce [16].

Produkce mikrořas za použití pilotní verze tenkovrstvého kaskádového fotobioreaktoru (S. Villaró a kol.)

Práce S. Villaró a kol. [36] prezentovala studii pilotní verze tenkovrstvého kaskádového kultivačního systému mikrořas kmene *Tetrademus almeriensis* za různých podmínek kultivačního média: primární odpadní městské vody, sekundární odpadní městské vody, čerstvého zředěného prasečího biologického odpadu a sladkovodního média [36]. Model zařízení je vyobrazen na Obr. 11. Zařízení bylo provozováno v skleníku v demonstračním závodě SABANA spadající pod University of Almería ve Španělském městě Almería [36].



Obr. 11 Model pilotní verze tenkovrstvého kaskádového fotobioreaktoru [36]

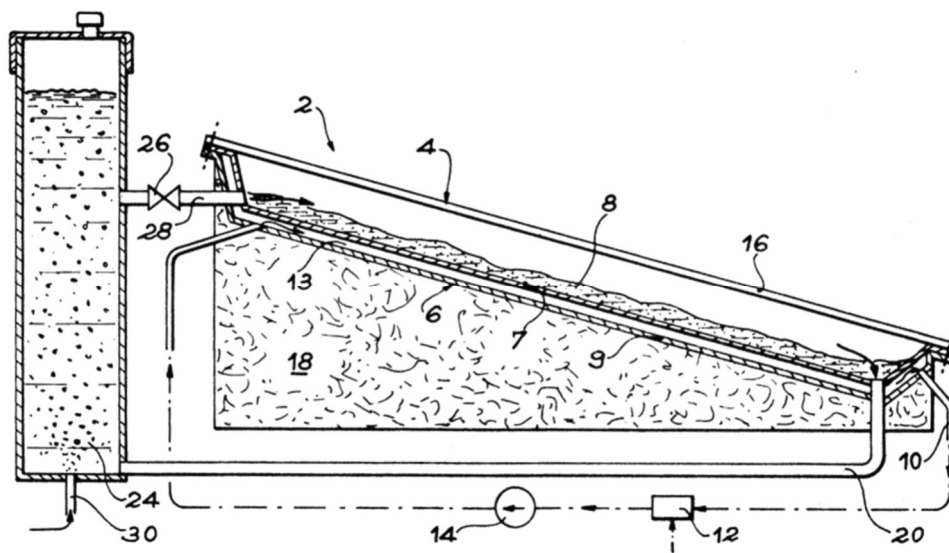
Rozloha zařízení činila 63 m^2 , tloušťka vsádky protékající kaskádovou tratí reaktoru byla v rozsahu $5\text{-}10 \text{ mm}$, celkový objem zařízení činil $2,4 \text{ m}^3$ včetně dohromady 250 l aerační kolony a kolektoru. Vzduch byl přiváděn do spodní části aerační kolony objemovým průtokem 75 l/min k odvedení rozpuštěného kyslíku a podpoře přenosu hmoty [36].

Při definování výkonu zařízení skupina S. Villaró a kol. [36] kultivovala kmen mikrořas *Tetrademus almeriensis* za přirozených podmínek slunečního světelného záření ve skleníku [36]. Nejlepší dosažené naměřené a zdokumentované hodnoty výsledků produkce skupinou S. Villaró a kol. [36] jsou $30,3 \text{ g m}^{-2} \text{ den}^{-1}$ (gramů sušiny mikrořas na horizontální zastavěné oblasti za den) při kultivaci ve sladkovodním médiu. Zjistili také, že produkce procentuální produkce bílkovin a lipidů vzrostla při kultivaci biomasy v odpadních vodách, což dle skupiny S. Villaró a kol. [36] nebylo vlivem reakcí mikrořas na různé dostupnosti živin, ale také vlivem mikrobuněčné rozmanitosti samotné biomasy [36].

2.3 Patentová rešerše konstrukčního uspořádání tenkovrstvých fotobioreaktorů

Fotobioreaktor (J. C. Roux)

Patent fotobioreaktoru inventora J. C. Roux [17] z roku 1986 (číslo patentu: FR2596412A1), schéma zařízení je vyobrazeno na Obr. 12.



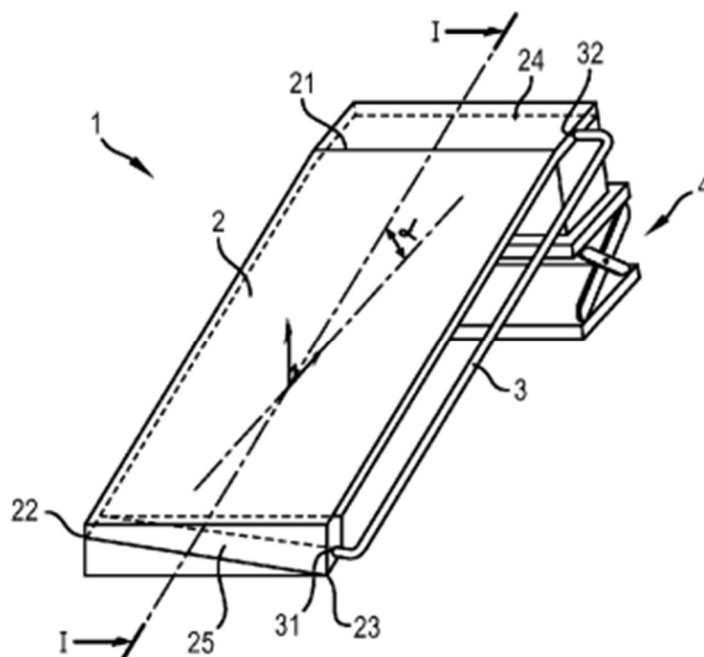
Obr. 12 Schéma fotobioreaktoru [17]

Zařízení je primárně založeno na spojení dvou hlavních částí válce s přítokem recirkulovaného kultivačního média a s aeračním systémem, ozařované části deskového reaktoru s kontinuálně stékající vrstvou kultivačního média s oddělenou podvrstvou k dopravě kapaliny ke chlazení nebo ohřívání cirkulované vsádky [17].

Aerační systém v nádrži napomáhal uvádět částice mikrořas do vznosu a promíchávat vsádku, čehož bylo možné pouze do určité koncentrace vsádky. Zařízení mělo pravděpodobně krátkou dobu zdržení vsádky v ozařované části reaktoru, což na druhou stranu pomáhalo zabraňovat sedimentaci mikrořas. Systém měl pravděpodobně nucenou cirkulaci vsádky čerpadlem, ačkoliv na schématu není vyobrazeno.

Tenkovrstvý fotobioreaktor s vysokou objemovou produktivitou

Patent tenkovrstvého fotobioreaktoru s vysokou objemovou produktivitou skupiny J. Pruvost a kol. [26] z roku 2009 (číslo patentu: WO2011039354A3), toto zařízení bylo již zmíněno v mé práci jako zařízení AlgoFilm©, schéma zařízení je vyobrazeno na Obr. 13.



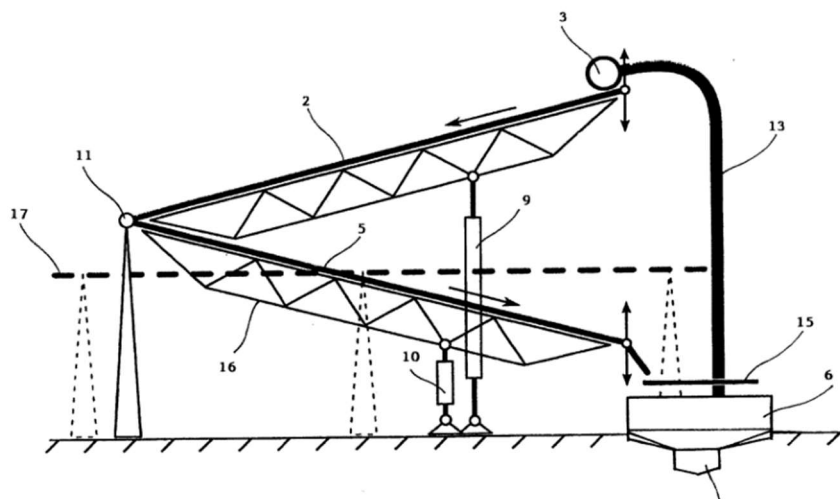
Obr. 13 Schéma tenkovrstvého fotobioreaktoru s vysokou objemovou produktivitou [26]

Zařízení tenkovrstvého fotobioreaktoru s vysokou objemovou produktivitou s filmovou stékající vrstvou vsádky bylo již popsáno v předešlé kapitole literární rešerše.

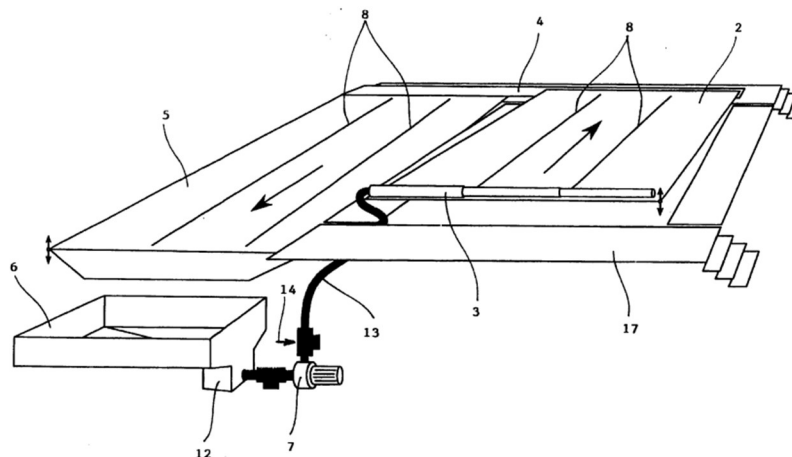
Uvažuji, že součástí zařízení je systém nucené cirkulace vsádky, systém k dopravě média s rozpuštěnými živinami a aerační systém. Tento deskový reaktor má pravděpodobně vysoké nároky na minimální pórovitost funkčních světelně ozařovaných ploch fotobioreaktoru, aby se předešlo usazování mikrořas na těchto funkčních světelně ozařovaných plochách zařízení. Kvůli tvaru zařízení si představuji, že sedimentace je u toho zařízení pravděpodobně jeden z největších problémů. Sklony k sedimentaci jsou částečně řešeny právě jednoduchou konstrukcí, což snižuje nároky na čištění, ale zvyšuje četnost nutnosti čištění v dané periodě.

Zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas

Patent zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas skupiny J. Masojídek a kol. [19] z roku 2013 (číslo patentu: CZ304988B6), schéma zařízení je vyobrazeno na Obr. 14 a Obr. 15.



Obr. 14 Schéma zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas [19]



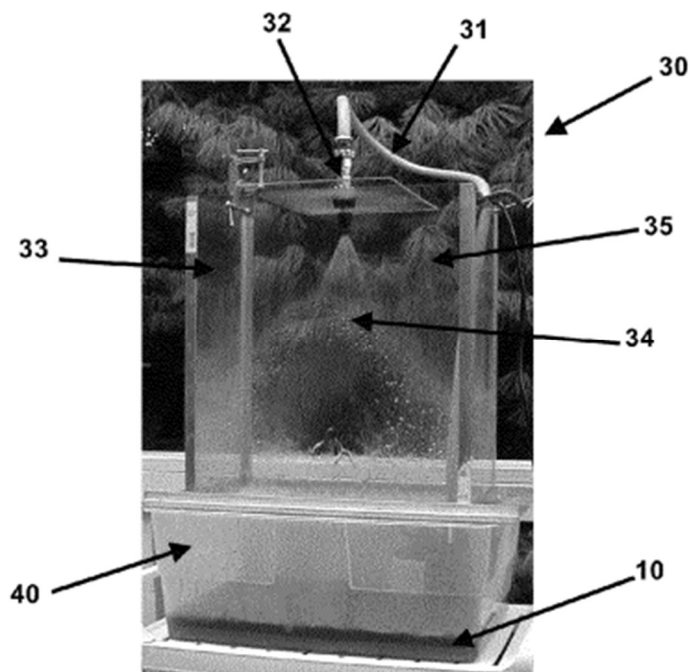
Obr. 15 Model zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas [19]

Zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas zahrnuje dvě meandrovitě uspořádané šikmé plochy tvořící tratě k proudění světelně ozařované vsádky. Přívod vsádky je vrchem zařízení v horní části výše konstrukčně uspořádané šikmé ploše, kde se nachází distribuční trubice. Médium stéká systémem do sběrné nádrže odkud je recirkulováno čerpadlem opět do distribuční trubice [19].

Zařízení má velmi jednoduchou konstrukci, což je ideální z pohledu údržby. Kultivační systém není hermeticky uzavřen, čímž nemůže docházet k sedimentaci mikrořas na funkčních světelně ozařovaných plochách reaktoru. Předpokládám problém se sedimentací mikrořas v distribuční trubici zařízení a sběrné nádrži, kde vsádka je uváděna do pohybu přitékající vsádkou, což je efektivní pouze do určité koncentrace mikrořas.

Fotobioreaktorový systém pro hromadnou produkci mikroorganismů

Patent fotobioreaktorového systému pro hromadnou kultivaci mikroorganismů skupiny A. B. Nordvik a George Berliner [3] z roku 2010 (číslo patentu: US8765460B2), schéma zařízení je vyobrazeno na Obr. 16.



Obr. 16 Model fotobioreaktorového systému pro hromadnou kultivaci mikroorganismů [3]

Zařízení fotobioreaktorového systému pro hromadnou kultivaci mikroorganismů je založené na principu funkčních ozařovaných ploch hermeticky uzavřeného zařízení ve tvaru kvádru, které je z vnitřní strany těchto ploch ostříkáváno suspenzí kultivačního média a mikroorganismů. Autoři uvádějí, že zařízení je také schopno pěstovat mikrořasy [3].

Toto zařízení je hermeticky uzavřené s velmi dobrým způsobem promíchávání suspenze. Sedimentace mikrořas na stěnách tohoto zařízení je požadovaná vlastnost definující produkci, kdy mikrořasy jsou po kultivační periodě extrahovány ze světlem ozařovaných ploch reaktoru po jeho rozebrání. Tento systém má negativum v distribuci média reaktorem, kdy v hrdle trysky rozstříkující médium po stěnách reaktoru vzniká turbulentní režim proudění. Turbulentní režim proudění vsádky má negativní vliv na kultivaci mikrořas, může limitovat výkon buněk [40], tento jev bude dále přiblížen v kapitole Procesní výpočet – provozní podmínky.

3 Shrnutí klíčových informací

Při návrhu zařízení pro biologický proces je vždy důležité spojení biologických a inženýrských aspektů procesu. Modely vyžadovány pro návrh procesu, možnost změny měřítka, operační a kontrolní úlohy. Proto je větší množství studií a modelů zařízení centrované k výkonosti zařízení v laboratorních měřítkách. Díky možnosti téměř idealizování podmínek modelů v laboratorním měřítku, kterých v průmyslových měřítkách lze dosáhnout velmi těžko, kvůli aspektům, které se stávají opravdu relevantními až v průmyslových měřítkách, například promíchávání média, ekvivalentní vystavování vsádky světelnému záření, atp. [40].

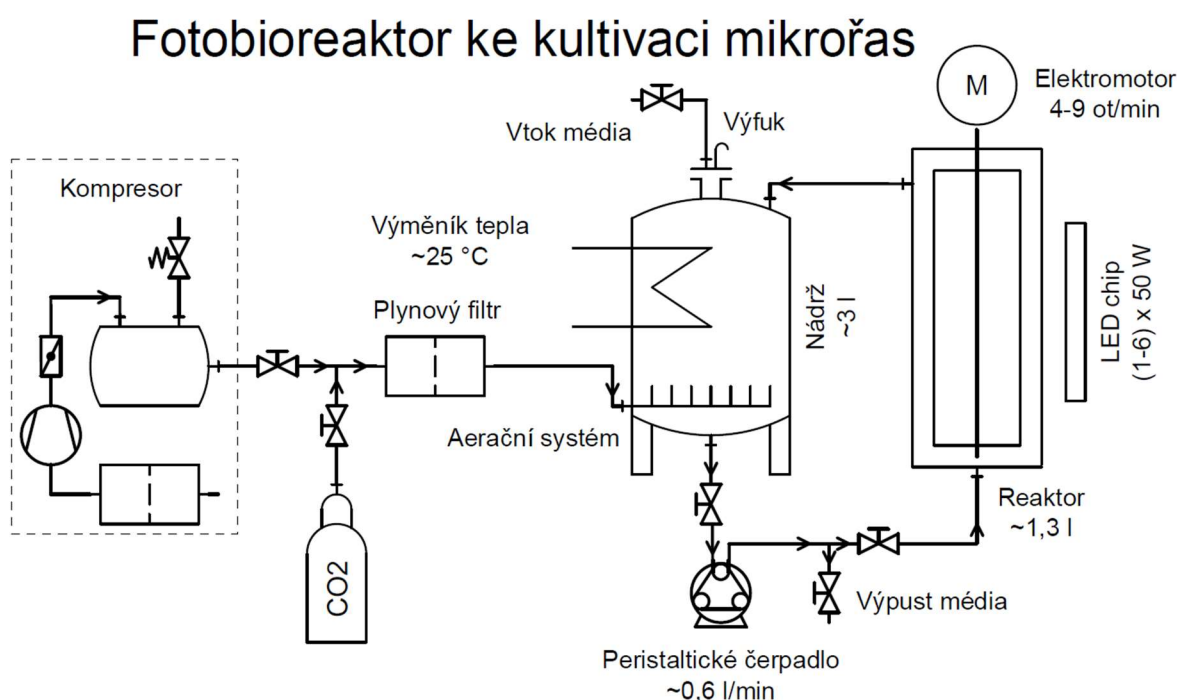
S touto myšlenkou se u svého zařízení budu soustředit na intenzifikaci procesů a aspektů: světelného ozařování funkčních ploch v závislosti na celkový objem vsádky zařízení, promíchávání a recirkulace vsádky zařízení k zamezení sedimentace mikrořas a homogenizace parametrů kultivace v celém objemu vsádky, schopnost efektivní funkce zařízení i při vysokých koncentracích mikrořas ve vsádce, kvůli navýšení rychlosti členění mikrořas, a tím i dosažení vyšší produkce zařízení. Naopak se budu zároveň snažit vyvarovat přílišné komplikaci konstrukce z důvodu náročnosti údržby, turbulentnímu režimu proudění, a s tím spojené limitaci výkonosti buněk při kultivaci [40].

Rozhodl jsem se pro návrh laboratorního měřítka tenkovrstvé konstrukce fotobioreaktoru právě ze zmíněných důvodů, především tedy poměr světelně ozařované plochy vsádky zařízení ku celkovému objemu vsádky, schopnost intenzivního promíchávání a recirkulace vsádky v zařízení, možnost dosahování vysokých koncentrací vsádky k navýšení počtu členění buněk v dané periodě času, po završení kultivačního cyklu je menší objem zpracovávané vsádky [6, 23]. Dosažení těchto parametrů u klasických konstrukcí fotobioreaktorů, jako jsou otevřené, kruhové, traťové nádrže a válcové fotobioreaktory, je významně obtížnější až nemožné. Všechny tyto aspekty významně pozitivně ovlivňují produkci a kvalitu mikrořas v kultivačním systému. Na stranu druhou s těmito aspekty přichází i navýšení pořizovacích a případně i provozních nákladů [6, 8].

Cílem mé praktické části práce pro mne bude: definovat procesní podmínky a požadavky na provoz laboratorního měřítka tenkovrstvého fotobioreaktoru, zpracovat základní projekční návrhy sestavy a zapojení zařízení, provést základní hydrodynamické výpočty, vytvořit 3D konstrukční návrh fotobioreaktoru, provést pevnostní kontrolu dílčích částí zařízení, vytvořit kótovanou sestavu fotobioreaktoru.

4 Definice procesních podmínek a požadavků na konstrukci

Schéma zapojení mého návrhu fotobioreaktoru je vyobrazeno na Obr. 17. Zařízení bylo navrženo funkce za podmínek teploty 25 °C, přibližném tlaku 1 bar a průtoku média reaktorem přibližně 0,6 l/min.



Obr. 17 PFD schéma zapojení Fotobioreaktoru

Zapojení zařízení se skládá z několika komponent:

Nádrž zajišťuje udržování námi požadovaných parametrů kultivačního média za pomoci procesů, jako jsou aerace média, regulace teploty, možnost dodávky čerstvého kultivačního média spolu s potřebnými aditivami (živiny a regulace *pH*) ke kultivaci mikrořas, schopnost akumulace a vyrovnávání tlaku na atmosférický tlak výfukem. Objem nádrže činí přibližně 3 l. Nádrž je vybavena ve spodní části odtokem média a ručním ventilem, v horní části se nachází příruba s vtokem média a výfukem, také se v horní části nachází přítok recirkulované vsádky z prostoru reaktoru.

Aerační systém přivádí do nádrže čerstvý vzduch spolu s příměsí oxidu uhličitého do vsádky, probubláváním vsádky zdržující se v nádrži s cílem pomoci intenzifikovat odpařování rozpuštěného kyslíku v médiu, zásobovat vsádku fotobioreaktoru uhlíkem a částečně ovládat hodnotu pH vsádky chemickou reakcí oxidu uhličitého s médiem, udržovat částice zdržující se v nádrži ve vznosu.

Výměník tepla zabudovaný do samotné nádrže, zajišťuje regulaci teploty vsádky na námi požadovanou hodnotu k dodržení kultivačních parametrů.

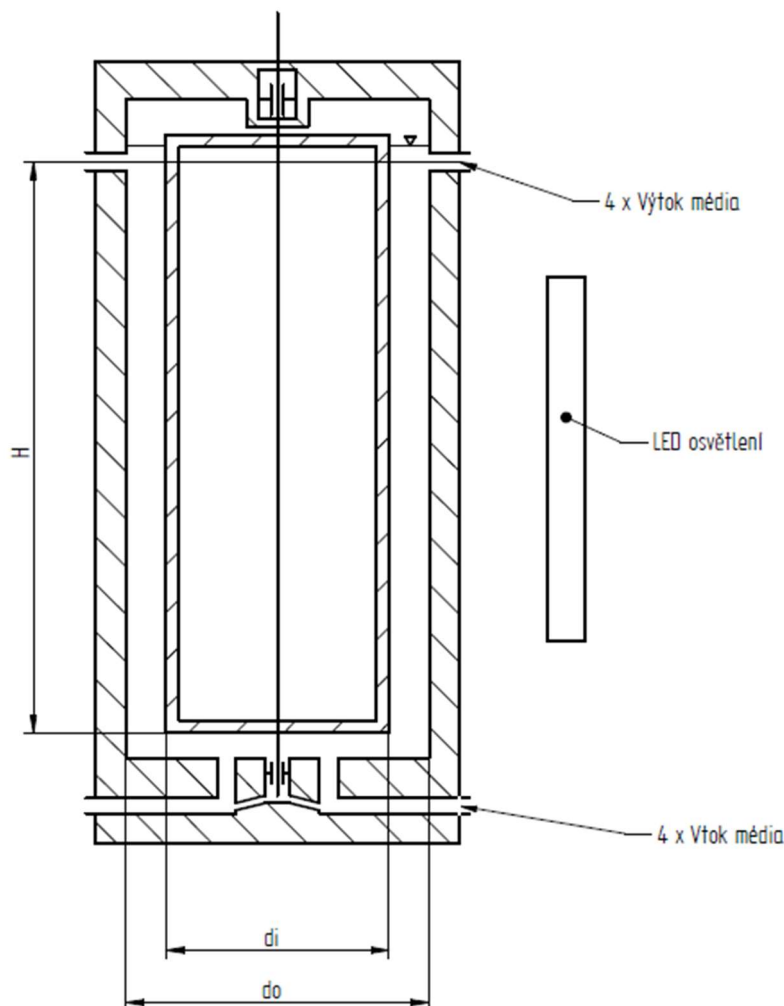
Reaktor je zařízení využívající Taylor-Couettova proudění pro intenzifikaci přenosu hmoty mikrořas v kultivačním médiu ke zvýšení dostupnosti světelného záření buňkám. Část pláště reaktoru je povrchově osvětlován LED zdrojem světla (cob LED plnospektrální chip o příkonu 50 W) k intenzifikaci procesu fotosyntézy. Objem pracovního prostoru reaktoru činí přibližně 1,3 l.

Peristaltické čerpadlo zajišťuje cirkulaci média fotobioreaktorem. Čerpadlo pumpuje přibližně v rozsahu 0,27-0,6 l/min média z nádrže do reaktoru, tento proměnný rozsah práce peristaltického čerpadla je v závislosti na koncentraci vsádky, kdy s vyšší koncentrací je nutnost většího průtoku média k udržení parametrů proudění v pracovním prostoru reaktoru $Re_{ax} = 20$. Trasa z čerpadla do reaktoru obsahuje výpust celého zařízení.

Dodávka čerstvého vzduchu do nádrže fotobioreaktoru je zajištěna kompresorem. Kompresor akumuluje stlačený vzduch do interní tlakové nádrže, tento vzduch lze následně pomocí ventilu dávkovat spolu oxidem uhličitým z tlakové bomby (CO_2) přes filtr do aeračního systému v nádrži fotobioreaktoru.

5 Návrh základního konstrukčního uspořádání

Při návrhu základního konstrukčního uspořádání tenkovrstvého fotobioreaktoru vyobrazeného na Obr. 18 jsem vycházel z klasického jednovrstvé konstrukce Taylor-Couettova reaktoru [12, 22, 27, 28, 32, 35].



Obr. 18 Obrysový návrh Taylor-Couettova fotobioreaktoru

Zvolil jsem si vertikální styl konstrukce k dosažení větší stability při režimu Taylor-Couettova proudění (blíže popsané v kapitole 6 Procesní výpočet). Přívod média jsem zvolil spodem zařízení, abych předešel sedimentaci mikrořas v kultivačním prostředí reaktoru a zároveň prodloužil dobu zdržení vsádky v reaktoru, následně vývod ze zařízení jsem zvolil po stranách pláště v horní části reaktoru. Rozměry zařízení jsem volil na základě poměru vnitřního průměru d_i , vnějšího průměru d_o a výšce H prstencové drážky, kdy jsem se snažil o zvětšení ozařované plochy, a proto jsem zvolil relativně vysoké zařízení. Negativem přílišné výšky zařízení by v průmyslovém měřítku mohla být náročnost na strukturální stabilitu zařízení, což by bylo možné

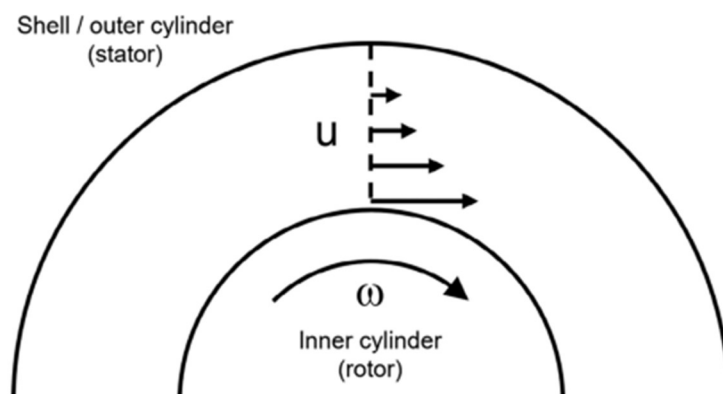
vyřešit podpůrnou konstrukcí. Pro mé laboratorní měřítko mi při návrhu konstrukce postačí nosnost samotného pláště zařízení. Poměr průměrů d_i a d_o by se měl držet nad hodnotou 0,7, kvůli režimu Taylor-Couettova proudění, což jsem mohl pozorovat i při inspiraci v jiných pracích [12, 28, 32].

Cílem mého teoretického návrh bylo docílení Taylor-Couettova režimu proudění vsádky ozařovanou částí fotobioreaktoru ke intenzifikaci produkce mikrořas snahou o zamezení fotoinhibice u buněk konstantním míšením proudících vrstev suspenze vsádky [28, 32].

6 Procesní výpočet

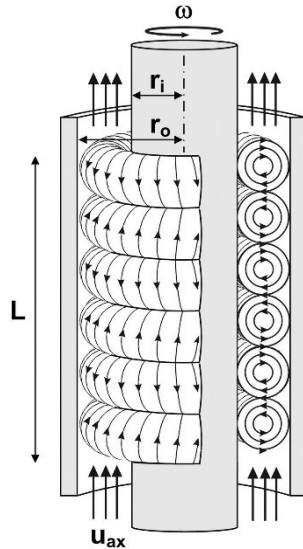
6.1 Obecný popis problematiky a popis výpočtu Taylor-Couettova proudění

Zjednodušené vysvětlení vzniku Taylor-Couettova proudění a mnou požadovaných parametrů proudění může být bráno jako laminární proudění v prstencové mezeře tvořené schránkou vně trubkou a uvnitř válcem, profily sdílejí osu rotace, kdy trubka je státorem a válec rotorem. Médium při laminárním režimu proudění v takto tvořené prstencové mezeře je částečně strháváno při styčném profilu pláště vnitřního válce, vlivem vazkosti média a tření vznikající na površích styčných ploch s médiem, kde vzniká gradient rychlostního profilu média v prstencové drážce profilů viz. Obr. 19.



Obr. 19 Gradient rychlostního profilu proudění při nízkých hodnotách Ta [32]

Pokud axiální Reynoldsovo číslo není nulové, tudíž dochází k proudění kapaliny v axiálním směru, vzniká proudění média ve šroubovici po celé délce prstencové drážky. Pokud se navýší obvodová rychlost vnitřního válce, nezávisle na vlivu superponování axiálním tokem, nastane odstředivá nestabilita v toku média, což má prvotní vliv na vznik proti sobě rotujících toroidních laminárních vírů v médiu o průměru d , tento režim proudění se nazývá Taylorovo vírové proudění, nebo také Taylor-Couettovo proudění viz. Obr. 20 [27, 28, 32, 35].



Obr. 20 Schéma Taylorova vírového reaktoru [28]

Taylor-Couettovo proudění lze do jisté míry vyjádřit podobnostním číslem zvaným Taylorovo číslo Ta , v odborné literatuře se lze také setkat s cylindrickým Reynoldsovým číslem Re_{cyl} . Taylorovo číslo obecně popisuje vztah mezi odstředivými silami a viskozitou, je možné se setkat s různými definicemi Taylorova čísla [32, 35].

V mé práci budu využívat definici Taylorovo číslo v rovnici (1) založené na publikaci Richtera a kol. [28], které uvádí rovnost mezi Taylorovo číslem a cylindrickým Reynoldsovým číslem. Dalším bezrozměrným číslem využívaným v práci je axiální Reynoldsovo číslo Re_{ax} definovaném v rovnici (2) [28, 32].

$$Ta = Re_{cyl} = \frac{\omega \cdot r_i \cdot d}{\nu} = \frac{\omega \cdot r_i \cdot (r_o - r_i)}{\nu} \quad (1)$$

$$Re_{ax} = \frac{u_{ax} \cdot d}{\nu} = \frac{u_{ax} \cdot (r_o - r_i)}{\nu} \quad (2)$$

Definice Taylorova čísla závisí na geometrických vlastnostech jako jsou vnější r_o a vnitřní r_i poloměr prstencové drážky mezi válci neboli vnější poloměr vnitřního válce r_i a vnitřní poloměr trubky r_o viz. Obr. 20, úhlové rychlosti vnitřního válce ω a kinematické viskozitě média ν .

Definice axiálního Reynoldsova čísla závisí na geometrických vlastnostech jako jsou vnější r_o a vnitřní r_i poloměr prstencové drážky mezi válci, střední axiální rychlosti média podél válců u_{ax} a kinematické viskozitě média ν .

V odborných publikacích vznikají spekulace mezi různými režimy proudění a jejich názvy, které se mění v závislosti na zmíněných parametrech. Tyto režimy mohou být charakterizovány

na základě typu a tvaru vznikajících vírů a jejich turbulentním, případně plouživého chování proudění [22, 28, 35].

Parametry, při kterých dochází k prvotní odstředivé nestabilitě v toku média, což má za následek vznik Taylora vírového proudění, se označuje jako první kritické Taylorovo číslo Ta_{c1} viz. Obr. 21 [32].



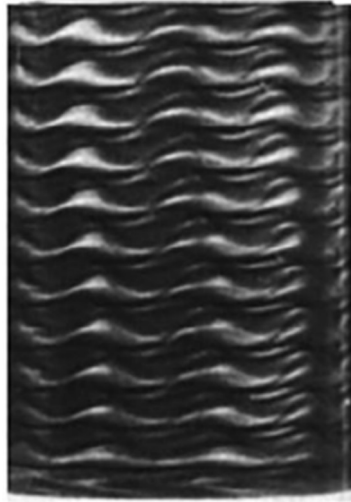
Obr. 21 Vzor Taylorovo vírového proudění [32]

Následným zvyšováním hodnoty Taylorova čísla například zvyšováním obvodové rychlosti vnitřního válce až do bodu druhého kritického Taylorova čísla Ta_{c2} , jev se vyznačuje oscilujícími proti sobě rotujícími toroidními víry viz. Obr. 22 [32].



Obr. 22 Vzor vlnivě vírového proudění [32]

Při dosažení parametrů hodnoty třetího kritického Taylorova čísla Ta_{c3} , amplituda oscilace proti sobě rotujících toroidních víru se stává modulovanou a proudění je stále více superponováno turbulentním prouděním média viz. Obr. 23 [32].



Obr. 23 Vzor modulovaného vlnivě vírového proudění [32]

Zvyšování hodnoty Taylorova čísla nad parametry třetího kritického Taylorova čísla, dochází k stále převyšujícímu turbulentnímu chování proudění média až to režimu plné turbulence viz. Obr. 24 [32].



Obr. 24 Vzor turbulentního proudění [32]

Takto popsané chování zmíněných jevů Taylor-Couettova, přechodového a turbulentního proudění je zjednodušené a představuje pouze obecné vzory proudění.

6.2 Zjištění prvního a druhého kritické Taylorovo číslo

Pro návrh reaktoru s využitím Taylor-Couettova proudění je podstatné znát hodnotu prvního a druhého kritického Taylorova čísla, aby bylo možné stanovit nutné meze parametrů ovlivňujících tento jev [32].

Pro odhadnutí hodnoty prvního Taylorova čísla pro reaktor bez vlivu axiálního proudění lze obecně užít vztah v rovnici (3) vycházející z definice Taylora [35]. Písmeno Λ představuje bezrozměrný poměr průměrů prstencové drážky, vyjádřený rovnicí (4) [35].

$$Ta_{1c} = \frac{1}{0,1556^2} \cdot \frac{(1+\Lambda)^2}{2 \cdot \Lambda \cdot \sqrt{(1-\Lambda) \cdot (3+\Lambda)}} \quad (3)$$

$$\Lambda = \frac{d_i}{d_o} = \frac{r_i}{r_o} \quad (4)$$

Pro moji práci vliv axiálního proudění v potaz vzít musím, a tak vztah v rovnici (3) budu brát pouze orientačně. Použijeme tedy vztah v rovnici (5) [32], tento vztah je založený na empirických hodnotách vycházejících z poznatků Recktenwalda a kol [27].

$$Ta_{1c}^2 \cdot \frac{1-\Lambda}{\Lambda} = a_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_{ax}}{a_2} \right)^2 + \left(\frac{Re_{ax}}{a_4} \right)^4 \right) \quad (5)$$

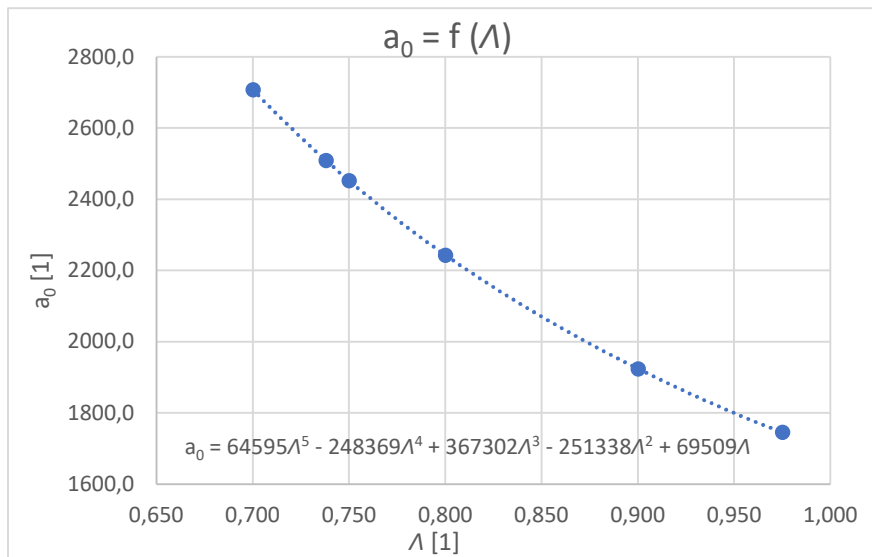
Práce Recktenwalda a kol. [27] přišla s empirickými hodnotami bezrozměrných parametrů a_0 , a_2 a a_4 , jejich hodnoty jsou popsány v tabulce 1. Tyto parametry platí pouze pro $0 \leq Re_{ax} \leq 20$ [32]. Abych dostal hodnoty, které použiji v moji práci, vytvořil jsem grafy (Obr. 25, Obr. 26 a Obr. 27) závislosti Λ na a_0 , a_2 a a_4 . Body grafů proložím polynomickou spojnicí trendu, čímž dostanu rovnici pro mé hodnoty parametrů a_0 , a_2 a a_4 v závislosti na Λ . Pro zpřesnění polynomických rovnic spojnic trendu, použiji hodnoty parametrů pro dané poměry průměrů Λ pouze v blízkosti hodnoty mnou aplikovaného poměru průměrů Λ , tedy aplikace tabulky 2.

Λ	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,738	0,750	0,800	0,900	0,975
a_0	3908,66	3715,17	3521,67	3328,18	3134,69	3428,73	2708,02	2509,08	2452,51	2243,59	1924,69	1746,00
a_2	43,810	40,200	38,420	37,430	36,820	36,450	36,220	36,160	36,140	36,080	36,000	35,970
a_4	103,900	74,260	69,260	67,230	66,240	65,710	65,450	65,390	65,370	65,330	65,310	65,340

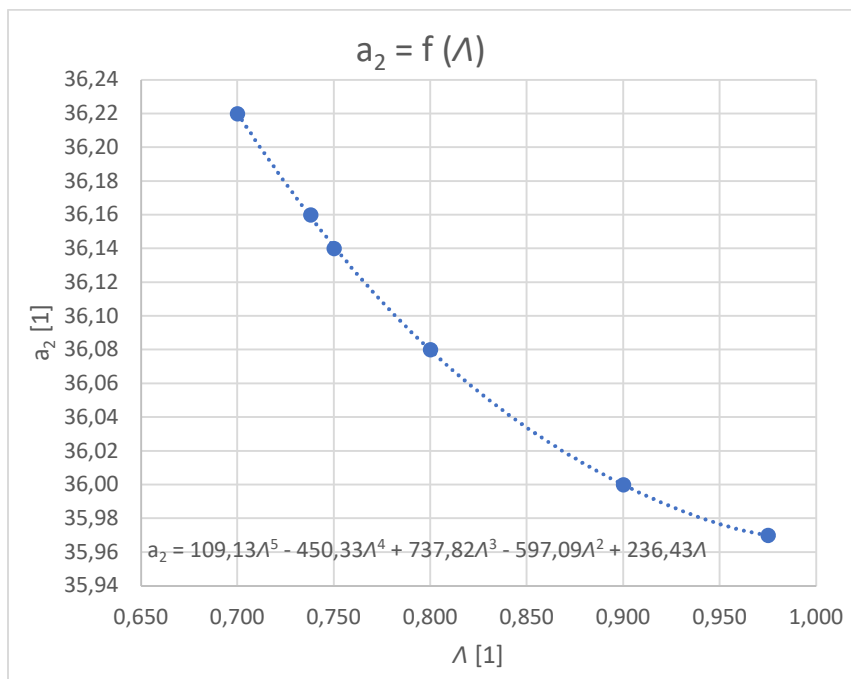
Tabulka 1 Hodnoty parametrů a_0 , a_2 a a_4 [27, 32]

Λ	0,700	0,738	0,750	0,800	0,900	0,975
a_0	2708,02	2509,08	2452,51	2243,59	1924,69	1746,00
a_2	36,220	36,160	36,140	36,080	36,000	35,970
a_4	65,450	65,390	65,370	65,330	65,310	65,340

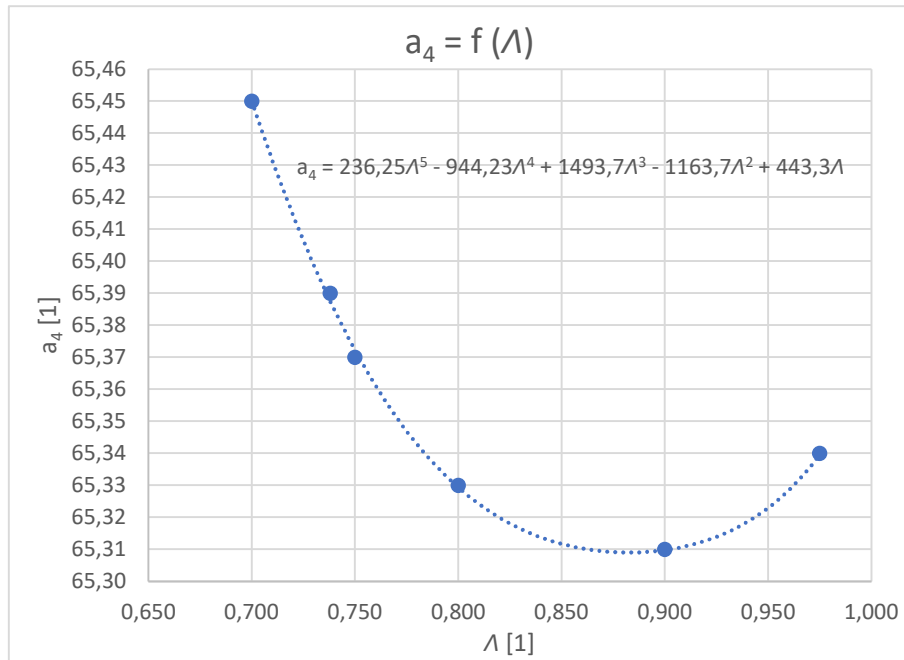
Tabulka 2 Použité hodnoty parametrů a_0 , a_2 a a_4 [27, 32]



Obr. 25 Graf závislost parametru a_0 na poměru λ



Obr. 26 Graf závislost parametru a_2 na poměru λ



Obr. 27 Graf závislost parametru a_4 na poměru Λ

Vyhodnocením empirických hodnot ze zmíněných grafů na Obr. 25, Obr. 26 a Obr. 27, dostávám polynomické rovnice popisující průběh hodnot bezrozměrných parametrů a_0 , a_2 a a_4 v závislosti na Λ . Tyto rovnice použiji ke stanovení vlastních empirických hodnot a_0 , a_2 a a_4 přibližně odpovídajícím mému parametru Λ . Tyto rovnice jsou popsány v rovnici (6) pro empirickou hodnotu parametru a_0 , rovnicí (7) pro empirickou hodnotu parametru a_2 a rovnicí (8) pro empirickou hodnotu parametru a_4 .

$$a_0 = 64595 \cdot \Lambda^5 - 248369 \cdot \Lambda^4 + 367302 \cdot \Lambda^3 - 251338 \cdot \Lambda^2 + 69509 \cdot \Lambda \quad (6)$$

$$a_2 = 109,13 \cdot \Lambda^5 - 450,33 \cdot \Lambda^4 + 737,82 \cdot \Lambda^3 - 597,09 \cdot \Lambda^2 + 236,43 \cdot \Lambda \quad (7)$$

$$a_4 = 236,25 \cdot \Lambda^5 - 944,23 \cdot \Lambda^4 + 1493,70 \cdot \Lambda^3 - 1163,7 \cdot \Lambda^2 + 443,3 \cdot \Lambda \quad (8)$$

Pro druhé kritické Taylorovo číslo platí vztah z rovnice (9), kdy druhé kritické Taylorovo číslo je obecně závislé na prvním kritickém Taylorově čísle, tento předpoklad platí pro poměr mezi průměry prstencové drážky reaktoru v blízkosti hodnotě 1,2. K efektu spojeným s druhým kritickým Taylorovo číslem nemusí vůbec nastat, pokud je poměr mezi průměry prstencové drážky větší nebo roven hodnotě 1,4 [12].

$$Ta_{2c} = 1,7 \cdot Ta_{1c} \quad (9)$$

Pro stabilní formování Taylorových víru je také potřebné dodržet podmínku výšky prstencové mezery, která musí dodržet předpoklad $\Gamma > 10$. [32] Značka Γ popisuje bezrozměrný poměr mezi výškou prstencové mezery H a šířkou prstencové mezery d v rovnici (10). Při

nedodržení této kontroly vznikají nežádoucí vlivy způsobené přechody na koncích prstencové drážky, tedy na vstupu a výstupu drážky [32].

$$\Gamma = \frac{H}{d} = \frac{H}{r_0 - r_i} \quad (10)$$

6.3 Reologické vlastnosti

Viskozita vyjadřuje koeficient proporcionality mezi smykovým napětím a smykovou deformací proudícího média, což je důležitým termo-fyzikálním parametrem při řešení rovnice zachování kontinuity [15, 33, 38].

Viskozita vsádkové směsi mikrořas a kultivačního média je proměnný parametr, závislý na mnoha jiných proměnných, například hmotnostním podílu buněk mikrořas, smykové rychlosti, teplotě a době zdržení během procesu hydrotermální úpravy [13, 15, 39].

Řada studií naznačila, že viskozita směsi mikrořas a kultivačního média je větší než samotné kultivační médium tvořící převážně vodu, viskozita významně roste s rostoucím hmotnostním podílem buněk mikrořas [13, 15, 33, 38, 39]. Vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* lze považovat za Newtonské kapaliny, ale pouze pokud koncentrace směsi nepřekročí přibližně 6 hm. % (hmotnostní procenta). Při koncentraci směsi přesahující 6 hm. % považují vsádkovou směs mikrořas *Chlorella* za Neneutonskou pseudoplastickou kapalinu. Tento fakt ovlivňuje reologické parametry vsádkové směsi mikrořas *Chlorella*, kdy s rostoucí smykovou rychlostí klesá viskozita směsi [15, 21, 38].

Teplota má také vliv na viskozitu vsádkové směsi mikrořas. Dochází k poklesu viskozity směsi v rozpětí kultivační a teploty překračující kultivační podmínky od 20 °C do 70 °C, následně viskozita narůstá v rozmezí od 70 °C do 120 °C, při teplotách nad touto úrovní dochází opět k poklesu [14, 15].

Reologické parametry směsi mikrořas *Chlorella* při teplotě 25 °C, tlaku přibližně 1 bar a pro 5 hm. %, což odpovídá přibližně 50 g/L sušiny mikrořas *Chlorella* na objem vsádky, jsou zobrazeny v tabulce 3 [21].

Reologické parametry vsádky mikrořas <i>Chlorella</i> pro 5 hm. %	
Koncentrace sušiny $\rho_{řasy}$ [g/L; kg/m ³]	50
Hustota ρ [g/L; kg/m ³]	1009
Dynamická viskozita μ [mPa s]	1,9500
Kinematická viskozita ν [mm ² /s]	1,9326

Tabulka 3 Reologické parametry vsádky mikrořas *Chlorella* pro 5 hm. % [21]

Tyto parametry budu považovat jako horní hranici koncentrace vsádky mikrořas *Chlorella* při kultivaci ve fotobioreaktoru. Teoreticky bych mohl pracovat i s vyššími koncentracemi vsádky mikrořas *Chlorella*, ale kvůli komplikaci výpočtu reologických vlastností vsádky mikrořas *Chlorella* při přechodu na Nenevtonskou pseudoplastickou kapalinu, budu pracovat pouze v mezích Newtonských kapalin, které se řídí Newtonovým zákonem viskozity.

6.4 Konfigurace parametrů

Mnou zvolené a použité parametry a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.

První část tabulky 4 se skládá z části „Dané a volené parametry“, v této části jsou obsaženy parametry: Vnější a vnitřní průměr prstencové drážky d_o a d_i , Vnější a vnitřní poloměr prstencové drážky r_o a r_i , Pracovní otáčky zařízení pro vodu n_{Voda} a pro koncentrovanou vsádku $n_{řasy}$, které definují rychlost otáčení vnitřního válce fotobioreaktoru při parametrech odpovídajících reologickým vlastnostem čistého kultivačního média n_{Voda} a mnou definované maximální koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* $n_{řasy}$, Výška prstencové drážky H představuje výšku vnitřního válce fotobioreaktoru, axiální Reynoldsovo číslo Re_{ax} , Kinematická viskozita vody ν_{Voda} a koncentrované vsádky $\nu_{řasy}$, které odpovídají kinematické viskozitě média fotobioreaktoru při 25 °C, tlaku přibližně 1 bar a parametrech odpovídajících reologickým vlastnostem čistého kultivačního média ν_{Voda} a mnou definované maximální koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* $\nu_{řasy}$. Jsou uvedeny také příslušné jednotky a hodnoty parametrů.

Druhá část tabulky se skládá z části „Vypočtené parametry“, v této části jsou obsaženy parametry: Úhlová rychlost pro vodu ω_{Voda} a pro koncentrovanou vsádku $\omega_{řasy}$ vypočtená z pracovních otáček zařízení, které definují úhlovou rychlost rotace vnitřního válce fotobioreaktoru při parametrech odpovídajících reologickým vlastnostem čistého kultivačního média ω_{Voda} a mnou definované maximální koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* $\omega_{řasy}$, Taylorovo číslo vody Ta_{Voda} a koncentrované vsádky $Ta_{řasy}$, které definují režim proudění média

fotobioreaktoren při parametrech odpovídajících reologickým vlastnostem čistého kultivačního média Ta_{Voda} a mnou definované maximální koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* $Ta_{\check{r}asy}$, Poměr průměrů prstencové drážky Λ , určený pro použité vnitřní a vnější průměry prstencové drážky, bezrozměrné empirické parametry a_0 , a_2 a a_4 , určené pro užitý poměr průměrů prstencové drážky, první a druhé kritické Taylorovo číslo Ta_{1c} a Ta_{2c} , určené pro zvolenou konfiguraci parametrů a vlastností mnou navrženého fotobioreaktoru, kontrola výšky prstencové drážky Γ pro navrženou výšku zařízení a šířku prstencové drážky. Jsou uvedeny také příslušné jednotky, hodnoty vypočtených parametrů a referenční čísla rovnic, z nichž vyvozují zmíněné hodnoty parametrů.

První část – Dané a volené parametry		
Veličina, značka a příslušné jednotky	Hodnota	
Vnější průměr prstencové drážky d_o [mm]	90	
Vnitřní průměr prstencové drážky d_i [mm]	70	
Vnější poloměr prstencové drážky r_o [mm]	45	
Vnitřní poloměr prstencové drážky r_i [mm]	35	
Pracovní otáčky zařízení pro vodu n_{Voda} [1/min]	4,08	
Pracovní otáčky zařízení pro koncentrovanou vsádku $n_{\check{r}asy}$ [1/min]	8,82	
Výška prstencové drážky H [mm]	500	
Axiální Reynoldsovo číslo Re_{ax} [I]	20	
Kinematická viskozita vody ν_{Voda} [mm ² /s]	0,8927	
Kinematická viskozita koncentrované vsádky $\nu_{\check{r}asy}$ [mm ² /s]	1,9326	
Druhá část – Vypočtené parametry		
Veličina, značka a příslušné jednotky	Hodnota	Ref.
Úhlová rychlost pro vodu ω_{Voda} [rad/s]	0,4273	
Úhlová rychlost pro koncentrovanou vsádku $\omega_{\check{r}asy}$ [rad/s]	0,9236	
Taylorovo číslo vody Ta_{Voda} [I]	167,51	(1)
Taylorovo číslo koncentrované vsádky $Ta_{\check{r}asy}$ [I]	167,27	(1)
Poměr průměrů prstencové drážky Λ [I]	0,7778	(4)
Bezrozměrný empirický parametr a_0 [I]	2331,78	(6)
Bezrozměrný empirický parametr a_2 [I]	36,100	(7)
Bezrozměrný empirický parametr a_4 [I]	65,321	(8)
První kritické Taylorovo číslo Ta_{1c} [I]	103,62	(5)
Druhé kritické Taylorovo číslo Ta_{2c} [I]	176,16	(9)
Kontrola výšky prstencové drážky Γ [I]	50	(10)

Tabulka 4 Vypočtené a použité hodnoty parametrů užitých pro navrhovanou variantu reaktoru

Hodnoty uvedeny v druhé části tabulky 4 byly získány následujícími příklady výpočtů. Vzorce uvedeny v těchto výpočtech byly již uvedeny v aktuální kapitole 6.

$$Ta_{Voda} = \frac{\omega_{Voda} \cdot r_i \cdot d}{\nu_{Voda}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{Voda} \cdot r_i \cdot (r_o - r_i)}{\nu_{Voda}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4,08 \cdot 0,035 \cdot (0,045 - 0,035)}{60 \cdot 0,8927 \cdot 10^{-6}} = 167,51 \quad (1)$$

$$Ta_{\check{R}asy} = \frac{\omega_{\check{R}asy} \cdot r_i \cdot d}{\nu_{\check{R}asy}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\check{R}asy} \cdot r_i \cdot (r_o - r_i)}{\nu_{\check{R}asy}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,82 \cdot 0,035 \cdot (0,045 - 0,035)}{60 \cdot 1,9326 \cdot 10^{-6}} = 167,27 \quad (1)$$

$$\Lambda = \frac{d_i}{d_o} = \frac{0,07}{0,09} = 0,7778 \quad (4)$$

$$a_0 = 64595 \cdot \Lambda^5 - 248369 \cdot \Lambda^4 + 367302 \cdot \Lambda^3 - 251338 \cdot \Lambda^2 + 69509 \cdot \Lambda \quad (6)$$

$$a_0 = 64595 \cdot 0,7778^5 - 248369 \cdot 0,7778^4 + 367302 \cdot 0,7778^3 - 251338 \cdot 0,7778^2 + 69509 \cdot 0,7778 = 2331,78 \quad (6)$$

$$a_2 = 109,13 \cdot \Lambda^5 - 450,33 \cdot \Lambda^4 + 737,82 \cdot \Lambda^3 - 597,09 \cdot \Lambda^2 + 236,43 \cdot \Lambda \quad (7)$$

$$a_2 = 109,13 \cdot 0,7778^5 - 450,33 \cdot 0,7778^4 + 737,82 \cdot 0,7778^3 - 597,09 \cdot 0,7778^2 + 236,43 \cdot 0,7778 = 36,100 \quad (7)$$

$$a_4 = 236,25 \cdot \Lambda^5 - 944,23 \cdot \Lambda^4 + 1493,70 \cdot \Lambda^3 - 1163,7 \cdot \Lambda^2 + 443,3 \cdot \Lambda \quad (8)$$

$$a_4 = 236,25 \cdot 0,7778^5 - 944,23 \cdot 0,7778^4 + 1493,70 \cdot 0,7778^3 - 1163,7 \cdot 0,7778^2 + 443,3 \cdot 0,7778 = 65,321 \quad (8)$$

$$Ta_{1c}^2 \cdot \frac{1-\Lambda}{\Lambda} = a_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_{ax}}{a_2} \right)^2 + \left(\frac{Re_{ax}}{a_4} \right)^4 \right) \rightarrow Ta_{1c} = \sqrt{\frac{\Lambda \cdot a_0}{1-\Lambda} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_{ax}}{a_2} \right)^2 + \left(\frac{Re_{ax}}{a_4} \right)^4 \right)} \quad (5)$$

$$Ta_{1c} = \sqrt{\frac{0,7778 \cdot 2331,78}{1-0,7778} \cdot \left(1 + \left(\frac{20}{36,1} \right)^2 + \left(\frac{20}{65,321} \right)^4 \right)} = 103,62 \quad (5)$$

$$Ta_{2c} = 1,7 \cdot Ta_{1c} = 1,7 \cdot 103,62 = 176,16 \quad (9)$$

$$\Gamma = \frac{H}{r_o - r_i} = \frac{0,5}{0,045 - 0,035} = 50 \quad (10)$$

6.5 Citlivostní analýza

Návrh mého uspořádání fotobioreaktoru byl spojený s prací s řadou proměnných parametrů ovlivňující režim mnou požadovaného režimu proudění, ale i parametry samotného reaktoru a komponentů zajišťující jeho chod. Proto jsem provedl citlivostní analýzu stěžejních parametrů ovlivňujících zmíněné aspekty. Mezi tyto parametry patří vliv otáček rotace vnitřního válce, vliv šířky prstencové drážky závislé na průměru vnitřního válce a vliv viskozity média při rostoucí

koncentraci mikrořas *Chlorella* během kultivačního cyklu. Veřkeré zpracovávané hodnoty jsou za podmínek 25 °C, tlaku přibližně 1 *bar*, maximální koncentrace 5 *hm. %* mikrořas *Chlorella* (≈ koncentrace 50 g/L sušiny mikrořas na objem vsádky) v kultivačním médiu.

6.5.1 Citlivostní analýza čistého kultivačního média

Provedená citlivostní analýza čistého kultivačního média, uvedená tabulkách 5, 6, 7 a 8, je za podmínek kultivačního média s nulovou koncentrací mikrořas *Chlorella*, opovídající koncentraci 0 g/L sušiny mikrořas *Chlorella* v kultivačním vsádkovém médiu.

V tabulkách 5, 6, 7 a 8 jsou popsány hodnoty Taylorova čísla při hodnotách konstantních parametrů: vnější průměr prstencové drážky d_o , výřka prstencové drážky H , Axiální Reynoldsovo číslo Re_{ax} a kinematická viskozita vody ν_{voda} , které jsou již uvedeny v první části tabulky 4. Proměnné hodnoty parametrů uvedené v tabulkách 5, 6, 7 a 8 jsou vnitřní průměr prstencové drážky d_i a rozsah pracovních otáček n .

Barevné rozlišení kolonek s hodnotami Taylorova čísla Ta v tabulkách 5, 6, 7 a 8, naznačují režim proudění média prstencovou drážkou fotobioreaktoru. Barva oranřová vypovídá o proudění překračující druhé kritické Taylorovo číslo, barva zelená vypovídá o námi požadovaném proudění média prstencovou drážkou fotobioreaktoru, tedy proudění Taylor-Couettovo proudění překračující první kritické Taylorovo číslo a barva modrá vypovídá o tangenciálním proudění média prstencovou drážkou fotobioreaktoru.

Taylorovo číslo Ta [1]									
Ta_{c2} [1]	Ta_{c1} [1]	d_i [mm]	n [1/min]						
			4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4	3,9
157	93	64	220	215	210	205	200	195	190
163	96	66	209	204	200	195	190	186	181
169	99	68	197	193	189	184	180	175	171
176	104	70	182	181	177	172	168	164	160
185	109	72	171	167	163	160	156	152	148
195	115	74	156	153	149	146	142	139	135
208	122	76	140	137	134	131	128	125	122
224	132	78	124	121	118	115	113	110	107
244	144	80	106	103	101	99	96	94	92

Tabulka 5 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – první část

Taylorovo číslo Ta [I]									
Ta_{c2} [I]	Ta_{c1} [I]	d_i [mm]	n [1/min]						
			3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2
157	93	64	185	181	176	171	166	161	156
163	96	66	177	172	167	163	158	153	149
169	99	68	167	162	158	154	149	145	140
176	104	70	156	152	148	144	140	135	131
185	109	72	144	141	137	133	129	125	122
195	115	74	132	128	125	122	118	115	111
208	122	76	119	115	112	109	106	103	100
224	132	78	104	102	99	96	93	91	88
244	144	80	89	87	84	82	80	77	75

Tabulka 6 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – druhá část

Taylorovo číslo Ta [I]									
Ta_{c2} [I]	Ta_{c1} [I]	d_i [mm]	n [1/min]						
			3,1	3	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5
157	93	64	151	146	142	137	132	127	122
163	96	66	144	139	135	130	125	121	116
169	99	68	136	132	127	123	118	114	110
176	104	70	127	123	119	115	111	107	103
185	109	72	118	114	110	106	103	99	95
195	115	74	108	104	101	97	94	90	87
208	122	76	97	94	90	87	84	81	78
224	132	78	85	82	80	77	74	71	69
244	144	80	73	70	68	66	63	61	59

Tabulka 7 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – třetí část

Taylorovo číslo Ta [I]									
Ta_{c2} [I]	Ta_{c1} [I]	d_i [mm]	n [1/min]						
			2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	0
157	93	64	117	112	107	102	98	93	0
163	96	66	111	107	102	98	93	88	0
169	99	68	105	101	97	92	88	83	0
176	104	70	99	94	90	86	82	78	0
185	109	72	91	87	84	80	76	72	0
195	115	74	83	80	76	73	69	66	0
208	122	76	75	72	69	66	62	59	0
224	132	78	66	63	60	58	55	52	0
244	144	80	56	54	52	49	47	45	0

Tabulka 8 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – čtvrtá část

6.5.2 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella

Provedená citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella, uvedená tabulkách 9, 10, 11 a 12, je za podmínek kultivační vsádkové směsi při horní hranici koncentrace mikrořas Chlorella, odpovídající 5 hm. % směsi, což odpovídá přibližně koncentraci 50 g/L sušiny mikrořas Chlorella v kultivační vsádkové směsi.

V tabulkách 9, 10, 11 a 12 jsou popsány hodnoty Taylorova čísla při hodnotách konstantních parametrů: vnější průměr prstencové drážky d_o , výška prstencové drážky H , Axiální Reynoldsovo číslo Re_{ax} a kinematická viskozita koncentrované vsádky $\nu_{řasy}$, které jsou již uvedeny v první části tabulky 4. Proměnné hodnoty parametrů uvedené v tabulkách 9, 10, 11 a 12 jsou vnitřní průměr prstencové drážky d_i a rozsah pracovních otáček n .

Barevné rozlišení kolonek s hodnotami Taylorova čísla Ta v tabulkách 9, 10, 11 a 12, naznačují režim proudění média prstencovou drážkou fotobioreaktoru. Barva oranžová vypovídá o proudění překračující druhé kritické Taylorovo číslo, barva zelená vypovídá o námi požadovaném proudění média prstencovou drážkou fotobioreaktoru, tedy proudění Taylor-Couettovo proudění překračující první kritické Taylorovo číslo a barva modrá vypovídá o tangenciálním proudění média prstencovou drážkou fotobioreaktoru.

Taylorovo číslo Ta [I]									
Ta_{c2} [I]	Ta_{c1} [I]	d_i [mm]	n [1/min]						
			10	9,9	9,8	9,7	9,6	9,5	9,4
157	93	64	225	223	221	219	216	214	212
163	96	66	215	212	210	208	206	204	202
169	99	68	203	201	199	197	195	193	191
176	104	70	190	188	186	184	182	180	178
185	109	72	176	174	172	170	169	167	165
195	115	74	160	159	157	156	154	152	151
208	122	76	144	143	141	140	138	137	135
224	132	78	127	126	124	123	122	120	119
244	144	80	108	107	106	105	104	103	102

Tabulka 9 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella – první část

Taylorovo číslo $Ta [I]$									
$Ta_{c2} [I]$	$Ta_{c1} [I]$	$d_i [mm]$	$n [I/min]$						
			9,3	9,2	9,1	9	8,9	8,8	8,7
157	93	64	210	207	205	203	201	198	196
163	96	66	200	197	195	193	191	189	187
169	99	68	188	186	184	182	180	178	176
176	104	70	176	174	173	171	169	167	165
185	109	72	163	162	160	158	156	154	153
195	1145	74	149	148	146	144	143	141	140
208	122	76	134	133	131	130	128	127	125
224	132	78	118	117	115	114	113	112	110
244	144	80	101	100	99	98	96	95	94

Tabulka 10 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* – druhá část

Taylorovo číslo $Ta [I]$									
$Ta_{c2} [I]$	$Ta_{c1} [I]$	$d_i [mm]$	$n [I/min]$						
			8,6	8,5	8,4	8,3	8,2	8,1	8
157	93	64	194	192	189	187	185	183	180
163	96	66	185	182	180	178	176	174	172
169	99	68	174	172	170	168	166	164	162
176	104	70	163	161	159	157	156	154	152
185	109	72	151	149	147	146	144	142	140
195	115	74	138	136	135	133	132	130	128
208	122	76	124	123	121	120	118	117	115
224	132	78	109	108	107	105	104	103	101
244	144	80	93	92	91	90	89	88	87

Tabulka 11 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* – třetí část

Taylorovo číslo $Ta [I]$									
$Ta_{c2} [I]$	$Ta_{c1} [I]$	$d_i [mm]$	$n [I/min]$						
			7,9	7,8	7,7	7,6	7,5	7,4	7,3
157	93	64	178	176	174	171	169	167	165
163	96	66	170	167	165	163	161	159	157
169	99	68	160	158	156	154	152	150	148
176	104	70	150	148	146	144	142	140	138
185	109	72	139	137	135	133	132	130	128
195	115	74	127	125	124	122	120	119	117
208	122	76	114	112	111	110	108	107	105
224	132	78	100	99	98	96	95	94	93
244	144	80	86	85	83	82	81	80	79

Tabulka 12 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* – čtvrtá část

6.5.3 Citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* na pracovní otáčky a na momenty síly

Provedená citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* na pracovní otáčky vnitřního válce reaktoru a na momenty síly vznikající na průměru vnitřního válce reaktoru uvedená v tabulkách 13 a 14, je za podmínek kultivačního média s rozsahem od nulové koncentrace až po mnou definovanou horní hranici koncentrace mikrořas *Chlorella*, odpovídající přibližně koncentraci 50 g/L sušiny mikrořas *Chlorella*, parametry byly vypočteny při konfiguraci parametrů z tabulky 4 (Vypočtené a použité hodnoty parametrů užitých pro navrhovanou variantu reaktoru)

6.5.3.1 Citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* na pracovní otáčky

V tabulce 13 jsou popsány hodnoty parametrů: kinematické a dynamické viskozity, Taylorova čísla, pracovních otáček za podmínek proudění při 95 % druhého kritického Taylorova čísla a zaokrouhlených pracovních otáček. Těmto hodnotám parametrů je přiřazena hodnota stupně koncentrace mikrořas *Chlorella* v kultivačním vsádkovém médiu, vyjádřená v procentech.

Rozsah koncentrace [%]	ν [mm^2/s]	μ [$mPa s$]	Ta [I]	n (95 % Ta_{c2}) [1/min]	n [1/min]
0	0,8927	0,8900	167,51	4,0761	4,08
5	0,9447	0,9430	167,22	4,3089	4,31
10	0,9967	0,9960	167,32	4,5461	4,55
15	1,0487	1,0490	167,06	4,7832	4,78
20	1,1007	1,1020	167,16	5,0204	5,02
25	1,1527	1,1550	167,25	5,2576	5,26
30	1,2047	1,2080	167,03	5,4947	5,49
35	1,2567	1,2610	167,12	5,7319	5,73
40	1,3087	1,3140	167,20	5,9690	5,97
45	1,3607	1,3670	167,28	6,2062	6,21
50	1,4127	1,4200	167,09	6,4434	6,44
55	1,4646	1,4730	167,16	6,6805	6,68
60	1,5166	1,5260	167,23	6,9177	6,92
65	1,5686	1,5790	167,06	7,1548	7,15
70	1,6206	1,6320	167,13	7,3920	7,39
75	1,6726	1,6850	167,19	7,6292	7,63
80	1,7246	1,7380	167,25	7,8663	7,87
85	1,7766	1,7910	167,10	8,1035	8,10
90	1,8286	1,8440	167,16	8,3406	8,34
95	1,8806	1,8970	167,22	8,5778	8,58
100	1,9326	1,9500	167,08	8,8150	8,81

Tabulka 13 Vliv koncentrace vsádky na parametry proudění

6.5.3.2 Citlivostní analýza vlivu rozsahu koncentrace vsádkové směsi mikrořas *Chlorella* na momenty síly

V tabulce 14 jsou popsány hodnoty parametrů: krouťícího moment M_k , axiálního momentu M_{ax} a složeného tangenciálního momentu M_{tg} vznikajícího působením krouťícího a axiálního momentu. Těmto hodnotám zmíněných parametrů je přiřazena hodnota stupně koncentrace mikrořas *Chlorella* v kultivačním vsádkovém médiu, vyjádřená v procentech.

6.5.3.3 Definice momentů síly vznikajících na průměru vnitřního válce reaktoru vlivem pracovních otáček

Určení krouťícího momentu vyvozeného na hřídeli vnitřního válce působením pracovních otáček, je popsáno v rovnicích (11, 12, 13, 14) [18]. Veličiny popsané v rovnicích (11, 12, 13, 14) jsou vnitřní poloměr prstencové drážky r_i , výška prstencové drážky H , úhlová rychlost vnitřního válce reaktoru ω , vyjádření rychlosti deformace v závislosti na změně poloměru r a úhlu natočení φ $\Delta_{r\varphi}$, který vychází z tenzoru rychlosti deformace, dynamická viskozita vsádky μ , smykové napětí v závislosti na změně poloměru r a úhlu natočení φ $\tau_{r\varphi}$, plocha pláště vnitřního válce (mimo podstav) A , krouťící moment vztažený k vnitřnímu poloměru válce prstencové drážky r_i $M_{k(r_i)}$ [18].

$$\Delta_{r\varphi} = \frac{\omega \cdot r_i^2}{1-\Lambda^2} \frac{1}{r} \quad (11)$$

$$\tau_{r\varphi} = 2 \cdot \mu \cdot \Delta_{r\varphi} \quad (12)$$

$$M_k = \tau_{r\varphi} \cdot A \cdot r \quad (13)$$

$$M_{k(r_i)} = \tau_{r\varphi(r_i)} \cdot A \cdot r_i = 4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot H \cdot \frac{r_i^2}{1-\Lambda^2} \quad (14)$$

Určení axiálního momentu vyvozeného na hřídeli vnitřního válce působením pracovních otáček, je popsáno v rovnicích (15, 16, 17) [18]. Veličiny popsané v rovnicích (15, 16, 17) jsou vnější a vnitřní poloměr prstencové drážky r_0 a r_i , výška prstencové drážky H , střední axiální rychlost proudění média reaktorem \bar{u}_{ax} , dynamická viskozita vsádky μ , smykové napětí v závislosti na změně poloměru r a souřadnice definující výšku z τ_{rz} , plocha pláště vnitřního válce (mimo podstav) A , axiální moment vyvozený na poloměru vnitřního válce M_{ax} [18].

$$\bar{u}_{ax} = \frac{Re_{ax} \cdot v}{d_H} = \frac{Re_{ax} \cdot v}{r_0 - r_i} \quad (15)$$

$$\tau_{rz} = \mu \cdot \frac{\bar{u}_{ax}}{d} = \mu \cdot \frac{\bar{u}_{ax}}{r_0 - r_i} \quad (16)$$

$$M_{ax} = \tau_{rz} \cdot A \cdot r_i = \frac{Re_{ax} \cdot v \cdot \mu}{(r_0 - r_i)^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot L \quad (17)$$

Určení složeného tangenciálního momentu vznikajícího působením kroutícího a axiálního momentu vyvozeného na hřídeli vnitřního válce působením pracovních otáček, je popsáno v rovnici (18). Veličiny popsané v rovnici (18) jsou kroutící moment vztažený k vnitřnímu poloměru válce prstencové drážky $r_i M_{k(ri)}$ a axiální moment vyvozený na poloměru vnitřního válce M_{ax} .

$$M_{tg} = \sqrt{M_{k(ri)}^2 + M_{ax}^2} \quad (18)$$

Rozsah koncentrace [%]	M_k [Nm]	M_k [g cm]	M_{ax} [Nm]	M_{ax} [g cm]	M_{tg} [Nm]	M_{tg} [g cm]
0	7,41E-06	0,0755	6,12E-07	6,23E-03	7,43E-06	0,0758
5	8,29E-06	0,0845	6,86E-07	6,99E-03	8,32E-06	0,0848
10	9,25E-06	0,0942	7,64E-07	7,79E-03	9,28E-06	0,0946
15	1,02E-05	0,1043	8,47E-07	8,63E-03	1,03E-05	0,1046
20	1,13E-05	0,1151	9,34E-07	9,52E-03	1,13E-05	0,1154
25	1,24E-05	0,1264	1,02E-06	1,04E-02	1,24E-05	0,1268
30	1,35E-05	0,1379	1,12E-06	1,14E-02	1,36E-05	0,1384
35	1,47E-05	0,1503	1,22E-06	1,24E-02	1,48E-05	0,1508
40	1,60E-05	0,1631	1,32E-06	1,35E-02	1,61E-05	0,1637
45	1,73E-05	0,1766	1,43E-06	1,46E-02	1,74E-05	0,1772
50	1,87E-05	0,1902	1,54E-06	1,57E-02	1,87E-05	0,1908
55	2,01E-05	0,2046	1,66E-06	1,69E-02	2,01E-05	0,2053
60	2,15E-05	0,2196	1,78E-06	1,82E-02	2,16E-05	0,2204
65	2,30E-05	0,2348	1,91E-06	1,94E-02	2,31E-05	0,2356
70	2,46E-05	0,2508	2,04E-06	2,08E-02	2,47E-05	0,2517
75	2,62E-05	0,2674	2,17E-06	2,21E-02	2,63E-05	0,2683
80	2,79E-05	0,2845	2,31E-06	2,35E-02	2,80E-05	0,2854
85	2,96E-05	0,3017	2,45E-06	2,50E-02	2,97E-05	0,3027
90	3,14E-05	0,3198	2,60E-06	2,65E-02	3,15E-05	0,3209
95	3,32E-05	0,3385	2,75E-06	2,80E-02	3,33E-05	0,3397
100	3,51E-05	0,3573	2,90E-06	2,96E-02	3,52E-05	0,3585

Tabulka 14 Vliv koncentrace vsádky na momenty síly

6.6 Provozní podmínky

Byla snaha o navržení laboratorního měřítka tenkovrstvého fotobioreaktoru, využívající Taylor-Couettova proudění v místech světlem ozařované plochy vsádky reaktoru ke intenzifikaci produkce mikrořas utlumením až zamezením jevu fotoinhibice u buněk konstantním míšením proudících vrstev suspenze vsádky [28, 32]. Mnou navržené hodnoty vstupních parametrů užitých v práci byly centrovány především kolem udržení požadovaného režimu proudění, tedy Taylor-Couettova proudění. Moje snaha je udržet hodnotu Taylorova čísla proudícího media reaktorem

při hodnotě 95 % druhého kritického Taylorova čísla. Důvodem k těmto podmínkám je snaha o co nejintenzivnější přenos hmoty podél osvětlované plochy vnějšího průměru prstencové drážky reaktoru za podmínky laminárního proudění vsádky. Při překročení druhého Taylorova čísla nastává režim vlnivě vírového proudění, který má tendenci se projevovat již známkami turbulentního režimu proudění [32], chceme se tomu režimu proudění vyvarovat.

Dosažení Taylor-Couettova režimu proudění vsádky ozařovanou částí fotobioreaktoru ke intenzifikaci produkce mikrořas snahou o zamezení fotoinhibice u buněk konstantním míšením proudících vrstev suspenze vsádky [28, 32].

Podmínka laminárního proudění vsádky reaktorem je za účelem nenarušování kultivačních aspektů mikrořas, turbulentní režim proudění tvoří nebezpečí při kultivaci mikrořas negativním ovlivněním kultivačních vlastností buněk mikrořas (množení buněk, životní cyklus buněk, aj.) [40].

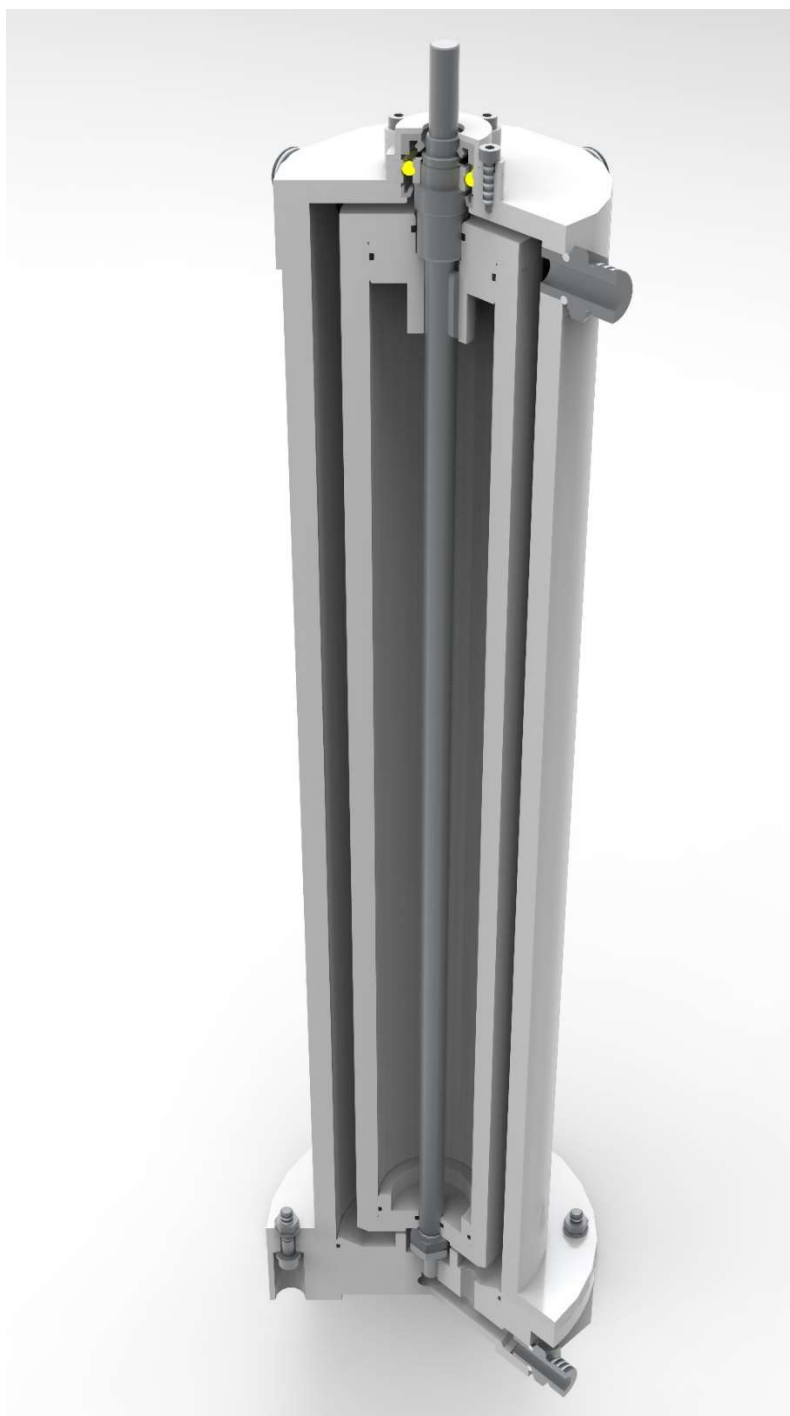
Citlivostní analýza reologických vlastností kultivace mikrořas *Chlorella* počítá s velmi vysokými koncentracemi sušiny mikrořas *Chlorella* ve vsádce, toto je za účelem naznačení, jakých parametrů jsme až schopni dosáhnout při podmínce udržení vlastností Newtonské kapaliny vsádky fotobioreaktoru. Citlivostní analýza reologických vlastností mikrořas *Chlorella* nesloužila k prezentování teoretických hodnot výnosnosti mikrořas *Chlorella* fotobioreaktoru, jejím účelem bylo pouze popsání možných funkčních parametrů zařízení.

Malý vznikající kroutící moment na hřídeli reaktoru je příčinou laboratorního měřítka fotobioreaktoru, tedy zařízení takto malých rozměrů není energeticky náročné. Vystává tedy otázka efektivity pohonu vnitřního válce reaktoru za účelem dosažení požadovaných provozních parametrů. Pohon takto malého zařízení energeticky úsporný nebude, tedy případný elektromotor pohánějící vstupní hřídel reaktoru by byl předimenzovaný. Z takového a mnoha dalších důvodů se práce soustředí spíše na teoretický návrh laboratorního řešení fotobioreaktoru. Mnou navržený model by měl obstát parametry většího měřítka, a tedy řešení případné efektivity a úspory energie samotného zařízení.

7 Konstrukční návrh fotobioreaktoru

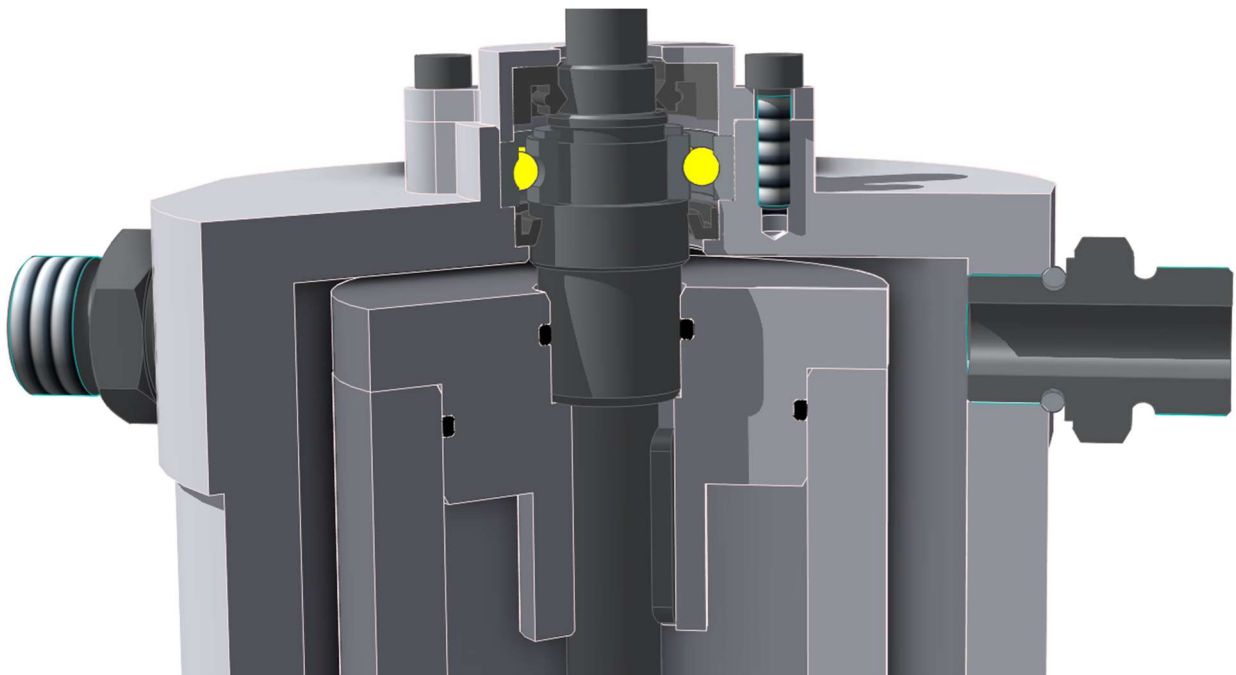
7.1 Konstrukční návrh

Navržené zařízení se skládá z několika částí a různých materiálů, především z polylaktidu PLA, polymethylmethakrylát PMMA, nerezové oceli 1.4021 a dalších malých částí z různých materiálů. Model zařízení je vyobrazen na Obr. 28.

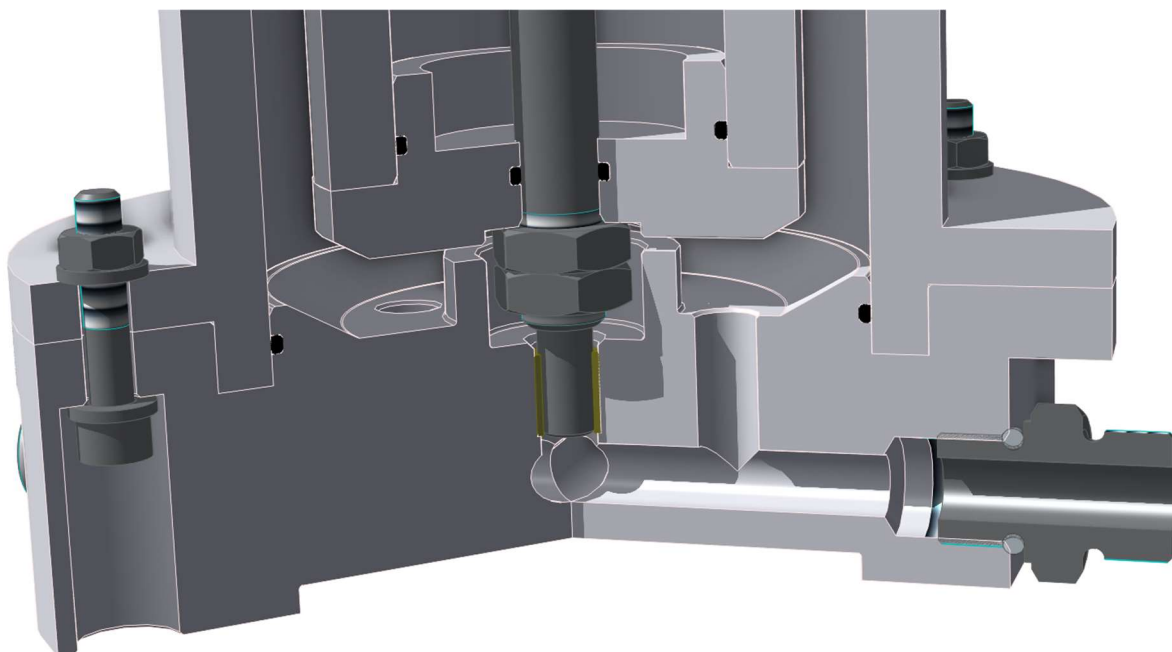


Obr. 28 Model fotobioreaktoru (v řezu)

Sestava zařízení se skládá z vnějšího válce, vyobrazeného na Obr. 29, do kterého jsou v horní části uložena hydraulická těsnění gufera a radiální kuličkové jednořadé ložisko, tento domek je uzavřen víkem vnějšího válce a zajištěn čtyřmi šrouby velikosti M4. Válec ve své horní části také obsahuje čtyři výtokové kanály, do výtokových kanálů jsou našroubované čtyři přímé přípojky HPP 12. Ke spodku vnějšího válce je připevněna, vyobrazeného na Obr. 30, O-kroužkem utěsněna a čtyřmi šrouby s maticemi velikosti M6 zajištěna podstava zařízení se čtyřmi vtokovými kanály, do vtokových kanálů jsou našroubované čtyři přímé přípojky HPP 12. V podstavě zařízení je také uloženo kluzné pouzdro vyrobené z polytetrafluorethylen kompozitu (teflon). Součástí sestavy reaktoru je také hřídel, která je uložena ve zmíněném valivém a kluzném ložisku, hřídel pomáhá přenášet kroutící moment pomocí tvarového spoje těsným perem na vnitřní válec zařízení, skrze horní přírubu vnitřního válce. Vnitřní válec se skládá z pláště válce a dvou přírub. Příruby mají uloženy v mezerách mezi přechody s hřídelí a pláštěm vnitřního válce O-kroužky. Sestava vnitřního válce je opřena o osazení hřídele a zajištěna dvěma šestihrannými nízkými maticemi velikosti M12x1.



Obr. 29 Horní část modelu reaktoru (v řezu) z prostředí programu Solid Edge 2020



Obr. 30 Spodní část modelu reaktoru (v řezu) z prostředí programu Solid Edge 2020

Popsané zařízení fotobioreaktoru umožňuje nenáročnou záměnu pláště vnitřního válce dle požadovaného rozměru vnějšího průměru válce, tato možnost dovoluje změnu šířky mezery prstencové drážky mezi vnitřním a vnějším válcem. Další možností úpravy zařízení je možnost výměny spodní části zařízení se vtokovými kanály, záměna spodní části zařízení by dovolovala zkoumat vliv úhlu a polohy přívodového kanálu zařízení.

Hřídel zařízení je z korozi-vzdorné oceli 1.4021 nebo ČSN 17 022 (X20Cr13). Jedná se o legovanou ušlechtilou, chromovou ocel. Ocel je vhodná k všeobecnému užití, například pro tyče tvářené za tepla nebo za studena, osy, hřídele, součásti čerpadel, pístní čepy, jehly trysek, lodní šrouby, aj. [24] Výroba bude obráběním.

Nenormalizovaných součástí: plášť vnitřního válce spodek jsou vyrobeny z materiálu polymethylmethakrylát (PMMA – plexisklo, akrylátové sklo). Polymethylmethakrylát je transparentní polymer, který představuje vlastnosti termoplastu. Polymethylmethakrylát má všeobecné použití včetně v oblasti medicíny a potravinářství [25]. Představuje se především dobrou číro- stí transparentností, pevností, povětrnostní odolností, dobré elektroizolačními vlastnostmi a chemickou odolností vůči vodě, zředěným alkáliím a kyselinám, lze ho lepit, lehký a tvárný. Polymethylmethakrylát je finančně náročný, měkký a neodolává alkáliím a kyselinám vyšších koncentrací. [25]. Výroba bude obráběním a lepením.

Nenormalizovaných součástí: příruby vnitřního válce a víko jsou vyrobeny z materiálu polylaktid (PLA). Polylaktid je bioplast vyráběný z přírodních zdrojů polymerizací z monomerní

kyseliny mléčné. Polylaktidy jsou používány jako specializované polymery v oblasti medicíny, ale také jako obaly a vláknité materiály [5]. Tyto bioplasty se představují především dobrou pevností, elasticitou, transparentností, jsou degradabilní v průmyslovém kompostu při zajištění specifických podmínek teploty vyšší než 60 °C [5]. Výroba bude 3D tiskem plastu.

Nonnormalizovaná součást vnější válec bude vyráběná lepením z kombinace materiálů polymethylmethakrylát a polylaktid.

7.2 Pevnostní kontrola

Pevnostní výpočet mé práce se soustředí především na volbu pohonu, kontrolu hřídele reaktoru na krut, kontrolu tvarového spoje hřídele a vnitřního válce reaktoru těsným perem a určení životnosti radiálního jednořadého kuličkového ložiska. Kvůli laboratornímu měřítku zařízení bude většina komponent předimenzovaných, ale i přesto se budu snažit materiál, kterých by se užilo i případně ve větším měřítku, kvůli spolehlivosti zařízení. Kontrolu provádíme za podmínek stanovené horní hranice koncentrace.

Při kontrolní zařízení budu uvažovat, že vnitřní válec reaktoru bude poháněný stejnosměrným elektromotorem série SGC271 s čelní převodovkou (1:360), varianta 12 V disponuje jmenovitým výkonem 0,75 W a kroutícím momentem přibližně 1,2 kg cm, což odpovídá přibližně 1,177 N m [9]. Elektromotor dodává na výstupu 10,5 ot/min, po připojení frekvenčního měniče k elektromotoru bych měl být schopen regulováním dosáhnout potřebného rozsahu pracovních otáček [9, 11].

7.2.1 Kontrola kritického průměru hřídele na krut

Rovnice číslo (19) popisuje kontrolu hřídele použité při návrhu naší konstrukce na krut, hřídel je z nerezové oceli 1.4404 (ČSN 17 349), tento materiál se volil na základě dostupnosti, dobrých korozivzdorných vlastností a dobré obrobiteľnosti. Mez kluzu v krutu materiálu činí $\tau_{kt} = 144 \text{ N mm}^{-2}$.

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_k \max}{\pi \cdot \tau_{kD}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 3,51 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 144}} = 0,107 \text{ mm} \quad (19)$$

7.2.2 Kontrola hřídele a vnitřního válce s tvarovým spojem – Těsné pero

Rovnice číslo (20, 21, 22) popisují kontrolu hřídele a vnitřního válce s tvarovým spojem – těsné pero [29]. Pero použité v návrhu konstrukce je označeno PERO 5 x 5 x 25 ČSN 02 2507. Tolerance spoje uložení průměru hřídele a díry náboje je Ø 12 H7/k6. Tolerance spoje uložení pera a drážky v náboji a hřídeli je 5 P9/h9.

Rovnice číslo (20) definuje funkční délku pera l_a , dále rovnice číslo (21) určují minimální funkční délku pera z kontroly pera na namáhání otláčením a rovnice (22) popisuje kontrolu pera na namáhání na stříh [29].

$$l_a = l - b = 25 - 5 = 20 \text{ mm} \quad (20)$$

$$l'_a = \frac{4 \cdot M_{k \max}}{d_H \cdot h \cdot p_D} \leq l_a \rightarrow l'_a = \frac{4 \cdot 3,51 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 5 \cdot 80} \rightarrow l'_a = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm} \leq 20 \text{ mm} \quad (21)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot M_{k \max}}{d_H \cdot b \cdot l_a} \leq \tau_D \rightarrow \tau = \frac{2 \cdot 3,51 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 5 \cdot 20} \rightarrow \tau = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ Nmm}^{-2} \leq 65 \text{ Nmm}^{-2} \quad (22)$$

Navržený tvarový spoj hřídele reaktoru a vnitřního válce reaktoru těsným perem vyhovuje kontrole, podmínka dodržení minimálního průměru hřídele také nebyla překročena, pomínu kontrolu kritických otáček hřídele z důvodu velmi pomalé rotace.

7.2.3 Určení životnosti radiálního jednořadého kuličkového ložiska

Rovnice číslo (23, 24, 25, 26, 27, 28, 29) definují životnost radiálního jednořadého kuličkového ložiska a kontrolu statické únosnosti, statickou únosnost kontrolují při vypuštění reaktoru. Volené radiální jednořadé kuličkové ložisko 16002 [20] definovaná dynamická únosnost ložiska C je až 5850 N , statická únosnost ložiska C_o je až 2850 N a limitní otáčky ložiska činí 32 000 ot/min [30].

Rovnice číslo (23) určuje velikost radiální síly F_r z kroutícího momentu.

$$F_r = \frac{M_k}{r_h} = \frac{3,51 \cdot 10^{-5}}{0,006} = 5,84 \cdot 10^{-3} \text{ N} \quad (23)$$

Rovnice číslo (24) určuje velikost axiální síly vlivem axiálního moment vznikajícího na vnitřním válci reaktoru při proudění vsádky, vztlakové síly F_b z Archimédova zákona [2] a tíhového zatížení G působící na ložisko.

$$F_a = \frac{M_{ax}}{r_i} + F_b - g \cdot \sum_i V_i \cdot \rho_i = 8,29 \cdot 10^{-5} + 19,05 - 18,42 = 0,627 \text{ N} \quad (24)$$

Rovnice číslo (25) určuje poměr mezi axiální silou a statickým zatížením [30]. Výsledná hodnota poměru nám definuje hodnoty veličin součinitele radiálního zatížení X a součinitele axiálního zatížení Y . Tyto parametry jsou potřebné k určení ekvivalentního dynamického zatížení ložiska P , popsaného v rovnici číslo (26) [30].

$$\frac{F_a}{C_o} = \frac{0,627}{2850} = 2,20 \cdot 10^{-4} \quad (25)$$

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 0,56 \cdot 5,84 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,627 = 1,257 \text{ N} \quad (26)$$

Rovnice číslo (27) a (28) definují velikost ekvivalentního statického zatížení P_o a kontrolu podmínky statické únosnosti ložiska, součinitel radiálního zatížení X_o , součinitele axiálního zatížení Y_o a axiální sílu při vypuštěném reaktoru F_{ao} působící na ložisko. Při určení velikosti axiální síly při vypuštěném reaktoru vycházíme z rovnice číslo (23), kdy počítáme pouze s vlivem tíhové síly na ložisko. Podmínkou této kontroly je, aby výsledná hodnota ekvivalentního statického zatížení ložiska C_{ov} byla menší hodnota ekvivalentního statického zatížení ložiska [30].

$$P_o = X_o \cdot F_r + Y_o \cdot F_a = Y_o \cdot F_{ao} = 2,2 \cdot 18,42 = 40,52 \text{ N} \quad (27)$$

$$C_{ov} \leq C_o \rightarrow P_o \cdot s_o \leq C_o \rightarrow 40,52 \cdot 2 \leq 5850 \rightarrow 81,04 \text{ N} \leq 5850 \text{ N} \quad (28)$$

Rovnice číslo (29) popisuje základní trvanlivost ložiska L_{10} určující hodnotu celkového počet otáček, které snese ložisko při definovaných parametrech. Exponent rovnice trvanlivosti p je tabulková hodnota pro ložiska s bodovým stykem [30].

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{5850}{1,257}\right)^p = 1,008 \cdot 10^{11} \text{ ot} \quad (29)$$

Zvolené ložisko by mělo dosáhnout požadované životnosti při stávajících parametrech, mělo být schopno přenést maximální axiální zatížení a radiální zatížení.

8 Závěr

Svoji práci jsem rozdělil na dvě části, a to část teoretickou a část praktickou. Teoretická část pokrývá vysvětlení definice mikrořas, jejich vlastností, základních typů a zpracování a užití. Dále vysvětluje základní procesní podmínky funkce fotobioreaktorů a kultivačních parametrů, jako jsou: teplota vsádky při kultivaci mikrořas, živiny obsažené ve vsádce, světelné záření potřebné ke kultivaci, hodnota pH vsádky. Následně jsem provedl literární a patentovou rešerši již existujících a navržených fotobioreaktorů. Na základě uvedených informací a poznatků jsem vytvořil shrnutí odůvodněných požadavků, jak si představuji funkci a parametry svého zařízení.

Druhá část mé práce se soustředila na samotný návrh zařízení a s tím spojené aspekty jako jsou definice procesních podmínek, požadavků na konstrukci zařízení a zpracoval PFD schéma teoretického zapojení mého návrhu tenkovrstvého Taylor-Coettova fotobioreaktoru, kdy jsem vycházel z informací teoretické části a vyhodnocení procesního výpočtu zařízení. Při návrhu základního konstrukčního uspořádání jsem zpracoval obrysový návrh reaktoru a odůvodnil volbu jeho základních rozměrů v závislosti na procesních výpočtu. Při postupu v procesním výpočtu jsem musel nejprve vyhledat fakta o Taylor-Couettově režimu proudění a s tím spojená definice a aspekty Taylorova čísla a kritického Taylorova čísla v závislosti na rozměrech zařízení, provozních podmínkách a reologických vlastnostech vsádky. Pro zmíněné parametry byla provedena také citlivostní analýza ke zjištění mnou definovaného optimálního režimu proudění, z čehož jsem vyhodnotil provozní podmínky zařízení. Při hledání kritických hodnot Taylorova čísla jsem využil empirických vlastností v odborné publikaci vyšetřující právě chování a stabilitu Taylor-Couettova proudění. V poslední části své práce jsem provedl konstrukční návrh s vyhotoveným teoretickým modelem zařízení, jeho pevnostní výpočet vybraných komponentů a provedl výkresovou dokumentaci sestavy zařízení.

9 Reference

- [1] ACIÉN, F.G., E. MOLINA, A. REIS, G. TORZILLO, G.C. ZITTELLI, C. SEPÚLVEDA a J. MASOJÍDEK. Photobioreactors for the production of microalgae. In: *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 1-44 [cit. 2022-07-30]. ISBN 9780081010235. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7
- [2] Archimédův zákon. *Onlineschool.cz* [online]. [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/archimeduv-zakon/>
- [3] Atle B. NORDVIK, George BERLINER, Photobioreactor system for mass production of microorganisms, United States, US8765460 B2, 13.12.2010. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US8765460B2/en?q=US8765460B2>
- [4] BĚLOHLAV, Vojtěch, Tomáš JIROUT a Lukáš KRÁTKÝ. Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku. *Chemické Listy* [online]. 2018 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3030/3019.%20%20C4%8Cesk%C3%A9%20vysok%C3%A9%20u%C4%8Den%C3%AD%20technick%C3%A9%20v%20Praze,%20Fakulta%20strojn%C3%A>
[D](http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3030/3019.%20%20C4%8Cesk%C3%A9%20vysok%C3%A9%20u%C4%8Den%C3%AD%20technick%C3%A9%20v%20Praze,%20Fakulta%20strojn%C3%A)
- [5] Bioplasty – Polylaktid (PLA): BIOPLASTY [online]. PAVELSIK, 2018 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethakryl%C3%A1t>
<http://www.bio-plasty.cz/bioplasty-polylaktid-pla/>
- [6] CAÑEDO, Juan Cristóbal García a Gema Lorena López LIZÁRRAGA. Considerations for Photobioreactor Design and Operation for Mass Cultivation of Microalgae. In: *Algae - Organisms for Imminent Biotechnology* [online]. InTech, 2016, 2016-06-29 [cit. 2022-07-30]. ISBN 978-953-51-2431-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/63069>
- [7] Carbon dioxide dissolves in water. In: Youtube [online]. 09.08.2010 [cit. 2020-07-3]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=2KbEV85rJhs&ab_channel=CPDEeatUCO. Kanál uživatele CPDEeatUCO.
- [8] COSTA, Jorge Alberto Vieira a Michele Greque DE MORAIS. An Open Pond System for Microalgal Cultivation. In: *Biofuels from Algae* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 1-22 [cit. 2022-08-01]. ISBN 9780444595584. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59558-4.00001-2>
- [9] DC motor série SGC271 s čelní převodovkou. *Stejnoseměrné Motory.cz* [online]. [cit. 2022-07-29]. Dostupné z: <https://www.dcmotory.cz/dc-motory-celni-prevodovka/serie-sgc271.html>
- [10] DVOŘÁK, Jan. *Využití sinic a řas v průmyslových biotechnologiích*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Mgr. Hana Vojtková, Ph.D.
- [11] Frekvenční měniče a vše o nich. *KDRIVES* [online]. [cit. 2022-07-29]. Dostupné z: <https://www.elektromotory.cz/frekvencni-menice-proc-a-jak#:~:text=Frekven%C4%8Dn%C3%AD%20m%C4%9Bni%C4%8D%20je%20za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20slou%C5%BE%C3%ADc%C3%AD,hodnot%20nap%C4%9Bt%C3%AD%20pouze%20zm%C4%9Bnou%20frekvence>
- [12] HAUT, B, H BEN AMOR, L COULON, A JACQUET a V HALLOIN. Hydrodynamics and mass transfer in a Couette–Taylor bioreactor for the culture of animal cells. *Chemical Engineering Science* [online]. 2003, 58(3-6), 777-784 [cit. 2022-08-01]. ISSN 00092509. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00607-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00607-3)
- [13] CHEN, Hao, Qian FU, Qiang LIAO, Hong ZHANG, Yun HUANG, Ao XIA a Xun ZHU. Rheological properties of microalgae slurry for application in hydrothermal pretreatment

- systems. *Bioresource Technology* [online]. 2018, 249, 599-604 [cit. 2022-08-01]. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.051>
- [14] CHEN, Hao, Qian FU, Qiang LIAO, Chao XIAO, Yun HUANG, Ao XIA, Xun ZHU a Zhongyin KANG. Rheokinetics of microalgae slurry during hydrothermal pretreatment processes. *Bioresource Technology* [online]. 2019, 289 [cit. 2022-08-01]. ISSN 09608524 Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121650>
- [15] CHEN, Hao, Qian FU, Qiang LIAO, Xun ZHU a Akeel SHAH. Applying artificial neural network to predict the viscosity of microalgae slurry in hydrothermal hydrolysis process. *Energy and AI* [online]. 2021, 4 [cit. 2022-08-01]. ISSN 26665468. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100053>
- [16] CHIN-ON, Rocca C., Maria J. BARBOSA, Rene H. WIJFFELS a Marcel JANSSEN. A novel V-shaped photobioreactor design for microalgae cultivation at low latitudes: Modelling biomass productivities of *Chlorella sorokiniana* on Bonaire. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2022, 449 [cit. 2022-08-01]. ISSN 13858947. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137793>
- [17] Jean C. ROUX, Photobioreactor, Francie, FR2596412 A1, 26.3.1986. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/FR2596412A1/en?q=WO2011039354A3>
- [18] JIROUT, Tomáš. Přenos hybnosti, tepla a hmoty - "seminář": Příklady řešení Navier-Stokesovy rovnice II. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2021.
- [19] Jiří MASOJÍDEK, Magda SERGEJEVOVÁ, Pavel SOUČEK, Jiří KOPECKÝ, Zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas, Česká republika, CZ304988 B6, 18.10.2013. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ304988B6/cs?q=CZ304988B6v>
- [20] Kuličkové jednořadé ložisko 16002. *Skf.com* [online]. [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-16002>
- [21] LI, Jiayi. Process Design of Microalgae Slurry Pump. *Trends in Renewable Energy* [online]. 2020, 6(3), 234-244 [cit. 2022-08-01]. ISSN 23762136. Dostupné z: <https://doi.org/10.17737/tre.2020.6.3.00120>
- [22] LUEPTOW, Richard M., Andreas DOCTER a Kyungyoon MIN. Stability of axial flow in an annulus with a rotating inner cylinder. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* [online]. 1992, 4(11), 2446-2455 [cit. 2022-08-01]. ISSN 0899-8213. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.858485>
- [23] MASOJÍDEK, J. a G. TORZILLO. Mass Cultivation of Freshwater Microalgae☆. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* [online]. Elsevier, 2014, 2014 [cit. 2022-07-30]. ISBN 9780124095489. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09373-8>
- [24] Materiálové normy: online.Ferona.cz [online]. [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>
- [25] Polymethylmethakrylát: wikipedia.cz [online]. [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethakryl%C3%A1t>
- [26] PRUVOST, J., F. LE BORGNE, A. ARTU a J. LEGRAND. Development of a thin-film solar photobioreactor with high biomass volumetric productivity (AlgoFilm©) based on process intensification principles. In: *Algal Research* [online]. InTech, 2017, 2016-06-29, s. 120-137 [cit. 2022-07-30]. ISBN 978-953-51-2431-3. ISSN 22119264. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.012>
- [27] RECKTENWALD, A., M. LÜCKE a H. W. MÜLLER. Taylor vortex formation in axial through-flow: Linear and weakly nonlinear analysis. *Physical Review E* [online]. 1993, 48(6), 4444-4454 [cit. 2022-08-01]. ISSN 1063-651X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.48.4444>

- [28] RICHTER, Oliver, Heike HOFFMANN a Bettina KRAUSHAAR-CZARNETZKI. Effect of the rotor shape on the mixing characteristics of a continuous flow Taylor-vortex reactor. *Chemical Engineering Science* [online]. 2008, 63(13), 3504-3513 [cit. 2022-08-01]. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.04.003>
- [29] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004., s. 395-407, ISBN 80-7183-312-6.
- [30] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004., s. 455-528, ISBN 80-7183-312-6.
- [31] SALIAN, Khushbu, Vladimir STREZOV, Antonino POLLIO a Jean-Philippe STEYER. Biofuels From Microalgae. In: *Encyclopedia of Sustainable Technologies* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 107-120 [cit. 2022-07-30]. ISBN 9780128047927. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10114-9>
- [32] SCHRIMPF, Marco, Jesús ESTEBAN, Helge WARMELING, Tobias FÄRBER, Arno BEHR a Andreas J. VORHOLT. Taylor-Couette reactor: Principles, design, and applications. *AIChE Journal* [online]. 2021, 67(5) [cit. 2022-08-01]. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aic.17228>
- [33] SOULIÈS, Antoine, Jeremy PRUVOST, Jack LEGRAND, Cathy CASTELAIN a Teodor I. BURGHELEA. Rheological properties of suspensions of the green microalga *Chlorella vulgaris* at various volume fractions. *Rheologica Acta* [online]. 2013, 52(6), 589-605 [cit. 2022-08-01]. ISSN 0035-4511. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00397-013-0700-z>
- [34] STRÍTESKÝ, Luboš a Petr HLAVÍNEK. Mikrořasy jako zdroj surovin. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/10141-mikrorasy-jako-zdroj-surovin>
- [35] VIII. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* [online]. 1923, 223(605-615), 289-343 [cit. 2022-08-01]. ISSN 0264-3952. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsta.1923.0008>
- [36] VILLARÓ, Silvia, Ana SÁNCHEZ-ZURANO, Martina CIARDI, et al. Production of microalgae using pilot-scale thin-layer cascade photobioreactors: Effect of water type on biomass composition. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2022, 163 [cit. 2022-08-01]. ISSN 09619534. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106534>
- [37] Wang C, Li H, Wang Q, Wei P. [Effect of pH on growth and lipid content of *Chlorella vulgaris* cultured in biogas slurry]. *Sheng Wu Gong Cheng Xue Bao*. 2010 Aug;26(8):1074-9. Chinese. PMID: 21090111. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/49621477_Effect_of_pH_on_growth_and_lipid_content_of_Chlorella_vulgaris_cultured_in_biogas_slurry
- [38] WILEMAN, Angel, Altan OZKAN a Halil BERBEROGLU. Rheological properties of algae slurries for minimizing harvesting energy requirements in biofuel production. *Bioresource Technology* [online]. 2012, 104, 432-439 [cit. 2022-08-01]. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.027>
- [39] WU, Zheng-yun a Xian-ming SHI. Rheological properties of *Chlorella pyrenoidosa* culture grown heterotrophically in a fermentor. *Journal of Applied Phycology* [online]. 2008, 20(3), 279-282 [cit. 2022-08-01]. ISSN 0921-8971. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9244-x>
- [40] YOUSUF, Abu a G. TORZILLO. Fundamentals of Microalgae Cultivation. In: *Microalgae Cultivation for Biofuels Production* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 1-9 [cit. 2022-07-30]. ISBN 9780128175361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00001-1>
- [41] ZACHLEDER, Vilém, Ivan IVANOV, Milada VÍTOVÁ a Kateřina BIŠOVÁ. Effects of cyclin-dependent kinase activity on the coordination of growth and the cell cycle in green

algae at different temperatures. In: *Journal of Experimental Botany* [online]. 2019, s. 845-858 [cit. 2022-07-30]. ISSN 0022-0957. Dostupné z:

<https://doi.org/10.1093/jxb/ery391>

- [42] ZUCCARO, Gaetano, Abu YOUSUF, Antonino POLLIO a Jean-Philippe STEYER. Microalgae Cultivation Systems. In: *Microalgae Cultivation for Biofuels Production* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 11-29 [cit. 2022-07-30]. ISBN 9780128175361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00002-3>

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad otevřené nádrže [23]	17
Obr. 2 Příklad kruhové nádrže [23].....	18
Obr. 3 Příklad traťové nádrže [23]	19
Obr. 4 Příklad kaskádového systému [23]	20
Obr. 5 Příklad trubkového fotobioreaktoru horizontálního [23]	22
Obr. 6 Příklad trubkového fotobioreaktoru vertikálního [23]	22
Obr. 7 Příklad deskového fotobioreaktoru [23]	23
Obr. 8 Příklad válcové fotobioreaktoru [23]	24
Obr. 9 Fotobioreaktor AlgoFilm© a jeho schématické zapojení [26].....	25
Obr. 10 Design fotobioreaktoru ve tvaru V [16].....	26
Obr. 11 Model pilotní verze tenkovrstvého kaskádového fotobioreaktoru [36]	28
Obr. 12 Schéma fotobioreaktoru [17].....	29
Obr. 13 Schéma tenkovrstvého fotobioreaktoru s vysokou objemovou produktivitou [26].....	30
Obr. 14 Schéma zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas [19].....	31
Obr. 15 Model zařízení pro fototrofní kultivaci mikrořas [19].....	31
Obr. 16 Model fotobioreaktorového systému pro hromadnou kultivaci mikroorganismů [3].....	32
Obr. 17 PFD schéma zapojení Fotobioreaktoru	34
Obr. 18 Obrysový návrh Taylor-Couettova fotobioreaktoru	36
Obr. 19 Gradient rychlostní profilu proudění při nízkých hodnotách Ta [32].....	38
Obr. 20 Schéma Taylorova vírového reaktoru [28]	39
Obr. 21 Vzor Taylorovo vírového proudění [32].....	40
Obr. 22 Vzor vlnivě vírového proudění [32].....	40
Obr. 23 Vzor modulovaného vlnivě vírového proudění [32].....	41
Obr. 24 Vzor turbulentního proudění [32]	41
Obr. 25 Graf závislost parametru a_0 na poměru Λ	43
Obr. 26 Graf závislost parametru a_2 na poměru Λ	43
Obr. 27 Graf závislost parametru a_4 na poměru Λ	44
Obr. 28 Model fotobioreaktoru (v řezu).....	57
Obr. 29 Horní část modelu reaktoru (v řezu) z prostředí programu Solid Edge 2020	58
Obr. 30 Spodní část modelu reaktoru (v řezu) z prostředí programu Solid Edge 2020	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty parametrů a_0 , a_2 a a_4 [27, 32].....	42
Tabulka 2 Použité hodnoty parametrů a_0 , a_2 a a_4 [27, 32].....	42
Tabulka 3 Reologické parametry vsádky mikrořas Chlorella pro 5 hm. % [21]	46
Tabulka 4 Vypočtené a použité hodnoty parametrů užitých pro navrhovanou variantu reaktoru	47
Tabulka 5 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – první část.....	49
Tabulka 6 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – druhá část	50
Tabulka 7 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – třetí část.....	50
Tabulka 8 Citlivostní analýza čistého kultivačního média – čtvrtá část	50
Tabulka 9 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella – první část.....	51
Tabulka 10 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella – druhá část	52
Tabulka 11 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella – třetí část.....	52
Tabulka 12 Citlivostní analýza vsádkové směsi mikrořas Chlorella – čtvrtá část	52
Tabulka 13 Vliv koncentrace vsádky na parametry proudění.....	53
Tabulka 14 Vliv koncentrace vsádky na momenty síly	55

Seznam příloh

Seznam příloh	Název přílohy	Počet stran	Formát stran
Příloha č. 1	Výkres sestavy – Fotobioreaktor	1	A1
Příloha č. 2	Výkres sestavy – Fotobioreaktor – Kusovník	2	A4