



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

## FOTOBIOREAKTOR PRO PĚSTOVÁNÍ SPIRULÍNY

PHOTOBIOREACTOR FOR CULTIVATING SPIRULINA

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Tomandl

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Jiří Tomandl**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Lošák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Fotobioreaktor pro pěstování Spirulíny

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spirulina nabízí značné výživové hodnoty a má potenciál přispět ke zdravé a udržitelné stravě. Kromě svého významu jako potravinového doplňku, má spirulina i další využití, které zvyšuje její význam a potenciál pro širší aplikaci. Tato práce se zaměří na možnosti domácí kultivace spirulíny, jako potravinového doplňku a také na aplikace spirulíny v dalších oblastech. Úkol zahrnuje literární rešerši, návrh pěstebního systému, energetickou analýzu, finanční rozvahu a technickou dokumentaci včetně 3D modelu navrženého zařízení.

Práce by měla přispět k lepšímu porozumění možností domácí kultivace spirulíny, jejího potenciálního vlivu na gastronomický sektor a průmyslové využití, a zároveň poskytnout ucelený návrh pro zájemce o pěstování spirulíny v domácím měřítku s možností rozšíření do komerční sféry.

### Cíle bakalářské práce:

Vypracování literární rešerše související s mikrořasami a sinicemi, se specifickým zaměřením na spirulinu, její výživové hodnoty, přírodní výskyt, a možnosti kultivace a sklizně  
Návrh zařízení (fotobioreaktoru) pro pěstování spirulíny  
Ekonomické zhodnocení zařízení a kultivace  
Vytvoření 3D modelu navrhovaného zařízení a schématické dokumentace

### Seznam doporučené literatury:

[1] A. Richmond a Q. Hu, Ed., Handbook of microalgal culture: applied phycology and Biotechnology, Second edition. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou kultivace mikrořas, konkrétně spiruliny, za účelem návrhu zařízení pro její efektivní kultivaci s cílem produkce čerstvé biomasy určené ke konzumaci. Spirulina je charakterizována svým vysokým obsahem bílkovin, minerálů a antioxidantů, díky tomu je známá jako doplněk stravy se spoustou benefitů. Práce zahrnuje návrh fotobioreaktoru pro domácí pěstování spiruliny, s ohledem na efektivitu, jednoduchost a ekonomickou dostupnost. Práce obsahuje literární rešerši, technickou dokumentaci, sestavení prototypu a ekonomické zhodnocení zařízení a provozních nákladů. Navržený fotobioreaktor umožňuje produkci čerstvé spiruliny s nízkými náklady, čímž přispívá k širší dostupnosti čerstvé spiruliny pro běžné spotřebitele. Navrhované řešení má potenciál rozšířit povědomí o ekologických a nutričních přínosech spiruliny a podporovat její využití v domácnostech.

### Klíčová slova

Mikrořasy, čerstvá spirulina, airlift fotobioreaktor, trubkový fotobioreaktor, domácí kultivace

## ABSTRACT

This bachelor thesis addresses the issue of microalgae cultivation, specifically focusing on spirulina, with the aim of designing a device for its efficient cultivation to produce fresh biomass intended for consumption. Spirulina is characterized by its high content of proteins, minerals, and antioxidants, making it known as a dietary supplement with numerous benefits. The thesis includes the design of a photobioreactor for home cultivation of spirulina, considering efficiency, simplicity, and economic affordability. The work includes literature review, technical documentation, prototype construction, economic evaluation of the device and operational costs. The proposed photobioreactor enables the production of fresh spirulina at low cost, thus contributing to the wider availability of fresh spirulina to the general consumer. The proposed solution has the potential to increase awareness of the ecological and nutritional benefits of spirulina and to promote its use in households.

### Keywords

Microalgae, fresh spirulina, airlift photobioreactor, tubular photobioreactor, home cultivation

## BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

TOMANDL, Jiří. Fotobioreaktor pro pěstování Spiruliny [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158653>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Lošák.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Lošáka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 23. května 2024

.....

Jiří Tomandl

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Lošákovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a možnost podílet se na tomto projektu. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.



## Obsah

Úvod.....	11
1. Charakteristika mikrořas .....	11
2. Základní druhy mikrořas .....	12
3. Možnosti využití spiruliny .....	14
3.1. Využití spiruliny jako doplněk stravy.....	14
3.2. Využití spiruliny jako doplněk krmiva pro zvířata.....	15
3.3. Využití jako indikátor při aktivním balení potravin .....	15
3.4. Čištění spalin.....	16
3.5. Čištění odpadních vod.....	16
3.6. Spirulina jako obnovitelný zdroj pro výrobu biopaliv .....	17
3.7. Biopolymery.....	17
4. Kultivační systémy.....	17
4.1. Otevřené kultivační systémy .....	17
4.2. Uzavřené kultivační systémy (fotobioreaktory).....	20
4.3. Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých systémů .....	25
4.4. Komerčně dostupné fotobioreaktory .....	26
5. Sklizení řasové biomasy.....	27
6. Požadavky na kultivační zařízení .....	27
6.1. Průměr a délka trubek .....	27
6.2. Materiál .....	28
6.3. Osvětlení.....	28
6.4. Míchání.....	31
6.5. Provzdušňování .....	32
6.6. Živiny .....	32
6.7. Sterilizace .....	33
7. Návrh fotobioreaktoru .....	33
7.1. Volba tvaru .....	33
7.2. Návrh rámu.....	35
7.3. Volba vzduchování .....	36
7.4. Návrh osvětlení .....	38
7.5. Snímání teploty .....	45
7.6. Vypouštění biomasy .....	45
7.7. Možnosti optimalizace .....	46
8. Ekonomické zhodnocení .....	47

---

Závěr.....	51
Seznam použitých zdrojů .....	52
Seznam použitých zkratek a symbolů .....	58
Seznam obrázků .....	60
Seznam tabulek .....	61
Seznam příloh.....	62

## Úvod

Témata jako udržitelné zdroje potravy a obnovitelné energetické zdroje nám dávají podnět pro výzkum mikrořas a sinic. Tyto malé organismy si získaly pozornost zejména díky schopnosti rychlého růstu, vysoké produkci biomasy, vysokým podílům spotřebovaného oxidu uhličitého na kilogram biomasy a schopnosti absorbovat toxiny. Jedním ze zástupců těchto mikroorganismů je rod *Arthrospira*, konkrétně *A. maxima* a *A. plantensis*, komerčně označované jako spirulina. Tyto mikrořasy jsou známy zejména pro své využití jako doplňky stravy ve formě tablet či prášku, a to díky vysokému obsahu bílkovin, esenciálních a nenasycených mastných kyselin, minerálů a antioxidantů.

I mimo své výživové hodnoty představuje nejen spirulina, ale i ostatní druhy mikrořas, inovativní způsob řešení enviromentálních a potravinových výzev. Využití jejich schopnosti využívat přírodní či odpadní zdroje a růst v široké škále prostředí je zajímavým způsobem udržitelného a efektivního přístupu k získávání biomasy nejen pro potravinářský průmysl.

Navzdory rostoucí popularitě a povědomí o přínosech spiruliny se na trhu nevyskytuje nabídka její čerstvé formy. Dostupnější sušená varianta nemusí zaručit čistotu, nezávadný původ ani vhodné nutriční složení. Sušení je samo o sobě energeticky náročný proces a mohou se při něm také vytrácet některé živiny a zároveň zhoršovat stravitelnost. Z tohoto důvodu je čerstvá forma spiruliny preferovanou volbou pro mnoho spotřebitelů.

Jedním z hlavních důvodů omezené dostupnosti čerstvé spiruliny je nedostatek nástrojů pro její kultivaci v menším měřítku. Existují komerční verze fotobioreaktorů, které se využívají pro velkoobjemovou kultivaci nebo laboratorní účely, nejsou však vhodné pro domácí kultivaci. Vysoká cena těchto systémů neumožňuje běžnému spotřebiteli jejich pořízení, a právě tento faktor nabádá k vývoji finančně dostupnějšího řešení.

Tato práce se zaměřuje na návrh a sestavení fotobioreaktoru, který umožní kultivaci spiruliny v domácím prostředí. Cílem je vytvořit jednoduché, efektivní a ekonomicky přístupné zařízení, které umožní spotřebitelům produkovat svou vlastní biomasu s minimálními náklady a zároveň zachovat obsah a kvalitu živin. S tímto cílem se autor zabývá technickými aspekty a konstrukcí reaktoru, teoretickými aspekty kultivace, možností využití mikrořas v odlišných průmyslech, a také ekonomickým zhodnocením systému a následné produkce. Sestavení takového fotobioreaktoru má vést k širší dostupnosti čerstvé biomasy a zvýšení povědomí o ekologických a výživových benefitech spiruliny.

## 1. Charakteristika mikrořas

Pojem mikrořasy označuje prokaryotní sinice a eukaryotní řasy, tedy jednobuněčné nebo jednoduché mnohobuněčné organismy, veliké jednotky až stovky mikrometrů, staré více než 2,5 miliardy let, kdy začaly tvořit kyslíkatou atmosféru země pomocí fotosyntézy [1]. Díky vyšší účinnosti fotosyntézy dokážou při produkci 1 kg kyslíku spotřebovat až 1,83 kg oxidu uhličitého, což je více než dvojnásobek oproti rostlinám spotřebovávajícím přibližně 0,77 kg oxidu uhličitého na kilogram kyslíku [2]. Účinná fotosyntéza, krátké reprodukční cykly a jednoduchá buněčná struktura také mají za následek vysokou rychlost reprodukce a schopnost růstu v různých podmínkách. Některé druhy přežijí i na extrémních místech, kde se vyskytují pouze základní živiny [1], [2]. V takto širokém spektru ekosystémů mikrořasy tvoří základ potravního řetězce a jsou zodpovědné za téměř polovinu globální fotosyntetické produkce [1].

Biomasa mikrořas vyskytujících se v přírodě se odedávna využívala jako potravinový doplněk a léčebný prostředek, to zejména díky vysokému obsahu bílkovin, olejů, polysacharidů,

antioxidantů a cenných sekundárních metabolitů. Již před několika staletími byly sklízány vodní květy sinice *Arthrospira* (spirulina) v prostředí alkalických jezer, v zemích jako Mexiko, a prodávány na trzích ve formě koláčků sušené biomasy s názvem dihé. Ve stredoasijských a východoasijských zemích je téměř po tisíciletí konzumována vláknitá sinice rodu *Nostoc* jako dietní doplněk, nejen kvůli vysokému obsahu bílkovin, ale i kvůli sloučeninám, jež mají antibakteriální, antivirové a protinádorové účinky [1].

## 2. Základní druhy mikrořas

Sbírký kultur po celém světě obsahují více než 100 000 kmenů izolovaných z přírodních stanovišť, ovšem pouze několik kmenů splňuje požadavky jako robustnost, vysoký obsah cenných látek a adaptivnost pro pěstování v řízené algakultuře, kde lze podmínkami ovlivnit metabolické procesy, tedy i složení biomasy. Nejčastěji komerčně využívané a pěstované kmeny jsou v tabulce 1. [1]

Tabulka 1 Nejčastěji komerčně využívané mikrořasy [2]

Využití	Kmen mikrořas
Potravní a krmné doplňky	<i>Chlorella</i> , <i>Arthrospira</i> (Spirulina)
β-karoten	<i>Dunaliella</i>
Astaxantin	<i>Haematococcus</i>
Živá potrava a krmné doplňky pro akvakulturu	<i>Nannochloropsis</i> , <i>Isochrysis</i> , <i>Chaetoceros</i> , <i>Pavlova</i>
Polynenasycené mastné kyseliny	<i>Cryptocodinium</i> , <i>Schizochytrium</i> , <i>Phaeodactylum</i> , <i>Nannochloropsis</i>

Původní dělení mikrořas bylo podle barvy, modernější systémy klasifikace řas jsou založeny na druhu pigmentu, chemické povaze a složkách buněčné stěny [3]. Také lze řasy rozdělit podle životních cyklů na autotrofní, mixotrofní a heterotrofní, což ovlivňuje výběr kultivačního systému [2].

### **Chlorella**

Velmi rychle rostoucí zelené mikrořasy rodu *Chlorella* s velkou teplotní tolerancí mezi 15 až 40 °C jsou schopné růst v anorganickém médiu jak fototrofně, tak heterotrofně. Biomasa se využívá ve zdravé výživě, jako doplněk krmiva pro domácí zvířata, nebo ve farmaceutickém či kosmetickém průmyslu. [4]

### **Dunaliella**

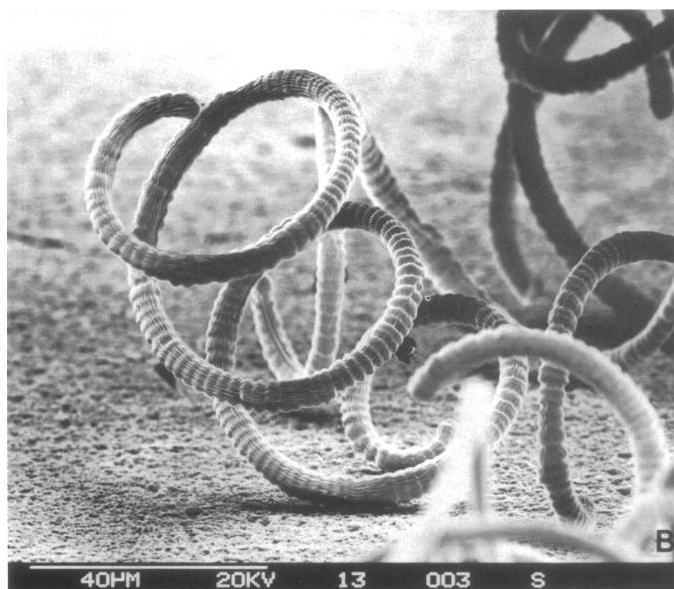
*Dunaliella* je jednobuněčná, zelená, bičíkatá mikrořasa, která se vyskytuje ve slaných i sladkovodních habitatech. Druh *Dunaliella salina* je známý svou vysokou úrovní antioxidantové aktivity a vysokým obsahem β-karotenu, čímž se stává cenným zdrojem této látky. Tato mikrořasa dokáže růst i při extrémních koncentracích solí, což jí umožňuje prosperovat v prostředí s malým množstvím konkurenčních druhů. Kultivuje se v otevřených rybnících nebo nádržích, kde je populární polosouvislý kultivační proces. [4]

### ***Haematococcus***

*Haematococcus* je jednobuněčná sladkovodní mikrořasa rozšířená po celém světě. Známa je především *H. pluvialis* díky své schopnosti v kultivaci při stresových podmínkách akumulovat velké množství silného antioxidantu, zvaného astaxanthin (2-3% sušiny), což z ní dělá hlavní komerčně využívaný organismus pro jeho produkci. Kultivace *H. pluvialis* může probíhat jak autotrofně, tak i heterotrofně v otevřených i uzavřených systémech. Pro komerční produkci je používána dvoustupňová strategie, která obsahuje růst řasové biomasy v první fázi a produkci astaxanthinu ve druhé fázi. Následně je astaxanthin extrahován z plně vysušené biomasy obsahující rozdrčené buňky mikrořasy. [4]

### ***Arthrospira (Spirulina)***

*Arthrospira* je rod sinic čítající více než 30 různých druhů, mezi nejznámější zástupce tohoto rodu se řadí *Arthrospira plantensis* a *Arthrospira maxima*, obě jsou pro komerční účely označovány pod názvem spirulina, pokud se tedy používá tento název, hovoří se o obou těchto druzích [5].



Obr. 2-1 Morfologie Spiruliny[6]

Spirulina je mnohobuněčná vláknitá sinice složená z modrozelených válcových buněk v závislosti na prostředí uspořádaných do šroubovice nebo spirály (Obr. 2-1). Parametry jako rozteč stoupání a rozměry šroubovice jsou ovlivněné druhem i změnou podmínek prostředí. [6]

V přírodě tato sinice roste ve sladkých vodách s vysokým obsahem minerálů a alkalickým pH v Mexiku, Africe a Asii. Největší jezera se spirulinou se nacházejí v okolí jezera Čad ve střední Africe a podél Velké příkopové propadliny ve východní Africe. Tyto oblasti poskytují ideální prostředí pro její růst díky vysokým teplotám a slunečnímu záření, které je potřebné pro fotosyntézu. [7]

Obsah kvalitních rostlinných bílkovin, esenciálních aminokyselin, vitaminů, omega-3-mastných kyselin, minerálních látek jako je hořčík, vápník, železo, zinek a spousta antioxidantů (fykocyanin, tokoferol,  $\beta$ -karoten, fenol) dělá spirulinu „superpotravinou“, mající spoustu zdravotních benefitů [8]. Spirulina je jednou z mála mikrořas postrádající buněčnou celulósovou stěnu, což ji dělá snadněji stravitelnou ve srovnání s jinými mikrořasami [9].

V dnešní době je spirulina již běžně průmyslově produkována v uměle vybudovaných systémech s kontrolovanými podmínkami, díky čemuž je dostupná pro spotřebitele ve formě tablet, či sušeného prášku. Bohužel sušení a skladování má negativní dopad na obsah vitaminů, nenasycených mastných kyselin, antioxidantů, a také na chuť, která je nahořklá, a vůni připomínající ryby. Oproti tomu čerstvá spirulina má jemnou strukturu, neutrální chuť i vůni a vyšší nutriční hodnotu. [8]

### 3. Možnosti využití spiruliny

#### 3.1. Využití spiruliny jako doplněk stravy

Mikrořasy jsou bohatým zdrojem důležitých a vzácných látek. Obsahují vyšší množství bílkovin, sacharidů, tuků, vlákniny, minerálů a vitaminů oproti běžným zdrojům lidské potravy (Tabulka 2) [5]. Vitaminy skupiny B, vitamín C a karotenoidy obsažené v biomase mají pozitivní účinky na lidské zdraví, jako je podpora imunitního systému nebo podpora zdravé kůže a nehtů. Pravidelné využívání spiruliny jako doplňku stravy může mít pozitivní účinky na lidské zdraví, např. snížení hladiny cholesterolu a krevních cukrů, protizánětlivou aktivitu, utlumení projevů alergií, snížení tělesných tuků a krevního tlaku [8].

Tabulka 2 Přibližné procentuální složení lidských zdrojů potravy a sušiny různých řas [5]

Zdroj potravy	Bílkoviny	Sacharidy	Lipidy
Pekařské droždí	39	38	1
Maso	43	1	34
Mléko	26	38	28
Rýže	8	77	2
Sója	37	30	20
<i>Arthrospira maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22

Dle historických záznamů byla spirulina používána po staletí v Čadu, jakožto každodenní pokrm pod názvem dihé. Aztékové ji připravovali ve formě sušených koláčů známé pod názvem tecuitlatl. Dnešní spotřebitele ovšem odpuzuje chuť pokrmů obsahujících pouze spirulinu. Jedním z řešení tohoto problému by mohla být inkapsulace pomocí maltodextrinu, popřípadě lisování a konzumace v podobě tablet. Dalším řešením je začlenění spiruliny do exotických pokrmů a zakrytí chuti asijskými a indickými kořeními směsí. Začleněním mikrořasy se běžným pokrmům dodá na nutriční kvalitě. [10]

Při využívání čerstvé biomasy spiruliny není potřeba tolik maskovat chuť, protože není tak výrazná, a lze ji díky tomu začlenit do běžných pokrmů, nebo do jejich částí, které neprochází tepelnou úpravou (pro maximální zachování nutričních hodnot). Příkladem těchto pokrmů jsou pomazánky, zálivky, studené polévky, smoothie nebo kaše. Při přidávání do pokrmů je pouze třeba se vyvarovat smíchání spiruliny s kyselinami (citrónová šťáva, ocet), protože to vede k reakci přírodního barviva fykocyaninu a změně barevného odstínu. Recepty například na cheesecake (Obr. 3-1), guacamole nebo ovocné smoothie jsou ve zdroji [Recepty z čerstvé spirulíny](#). [11]



Obr. 3-1 Cheesecake s čerstvou spirulinou [11]

Nedávný výzkum naznačuje, že zelená barva spiruliny může být příležitostí k inovaci na trhu potravin. Mnoho firem již začalo využívat tuto příležitost a nabízí zelené potraviny a nápoje. Zelená barva spiruliny může být atraktivní pro spotřebitele, zejména v době, kdy se zvyšuje povědomí o zdravé výživě a přírodních potravinách. Tento trend vedl k tomu, že mnoho velkých potravinářských společností začalo uvádět na trh produkty obsahující spirulinu s přirozenou zelenou barvou. Tyto produkty zahrnují například smoothie, zelené koktejly a pečivo, které využívají výhody spiruliny jako zdravého doplňku stravy. Tento trend naznačuje rostoucí popularitu a důležitost mikrořas jako zdroje potravin a nutričních doplňků. [10]

### 3.2. Využití spiruliny jako doplněk krmiva pro zvířata

Výzkumy ukazují, že spirulinu lze začlenit do krmných dávek prasat, brojlerů, ryb a nahradit tak tradiční bílkovinné zdroje. U brojlerů po integrování spiruliny do krmiva dochází k zabarvení masa více do oranžova a ke zvýšení intenzity aroma. U prasat naopak nedochází k žádnému rozdílu ve kvalitě masa. Nicméně při začleňování do jídelníčku zvířat je nezbytné dbát na správné vyvážení stravy podle potřeb aminokyselin, aby byly dosaženy požadované výsledky. [12]

### 3.3. Využití jako indikátor při aktivním balení potravin

Potraviny jako maso, mléčné výrobky a mořské plody postupem času degradují, přičemž dochází k změně pH a uvolňují se dusíkaté sloučeniny, které mohou způsobit zápach a vznik neobvyklých chutí. Změnu pH lze detekovat pomocí chytrých obalů (Obr. 3-2), obsahujících látky citlivé na změnu pH. Syntetické indikátory používané v těchto obalech, jako bromokrezolová purpura a bromfenolová modř, jsou nejedlé a mohou být toxické pro spotřebitele. Přírodní pigmenty jako  $\beta$ -karoten, tokoferoly, fykoerythrin a chlorofyly, vyskytující se ve spirulině, jsou citlivé na pH a jejich nestabilita vede ke změně barvy. Tato změna barvy v závislosti na pH ze spiruliny činí možnou přírodní náhradu syntetických indikátorů pro kontrolu kvality potravin. [13]



Obr. 3-2 Změna barvy indikátoru stavu potravin v závislosti na degradaci [13]

### 3.4. Čištění spalin

Spaliny mohou obsahovat až 15 % oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), což je výrazně více, než obsahuje okolní vzduch v atmosféře (0,042 obj. %), proto se nabízí možnost využití lehce dostupných spalin z energetických provozů k zvýšení produkce biomasy při používání mikrořas k čištění těchto spalin. Problém může nastat kvůli teplotě spalin, která daleko převyšuje hranici životaschopnosti spiruliny, je tedy nutné spaliny ochladit nebo použít jiné mikrořasy, tolerující vysoké teploty. Takto kultivovaná biomasa může obsahovat toxiny, a je proto vhodná například na výrobu bioplastů a biopaliv, nikoli v potravinářském průmyslu. [14]

### 3.5. Čištění odpadních vod

Využití spiruliny na čištění odpadních vod představuje inovativní způsob k řešení enviromentálních problémů. Tato metoda využívá schopností spiruliny neutralizovat látky z odpadních vod a současně produkovat kyslík. Z ekonomického hlediska chemická kultivační média pokrývají 35 % nákladů na výrobu biomasy [15], zároveň má výroba médií nejvyšší enviromentální dopad v porovnání s ostatními výrobními fázemi. Z tohoto důvodu jsou zkoumány různé druhy kultivačních médií, s důrazem na využití odpadních vod, které obsahují živiny důležité pro kultivaci (uhlík, dusík, fosfor), ale také toxické minerály, které má spirulina jedinečnou schopnost detoxikovat (neutralizovat). [15]

V odpadních vodách bohatých na organické látky hraje klíčovou roli uvolňování volného kyslíku, což podporuje aerobní rozklad organických látek bakteriemi a jinými mikroorganismy. Část organického uhlíku je oxidována na oxid uhličitý, který slouží jako zdroj uhlíku pro řasy. Další důležitou funkcí mikrořas je akumulace a přeměna živin z odpadních vod, především dusíku a fosforu, na řasovou biomasu. Existují dva hlavní typy systémů čištění odpadních vod pomocí řas: jezírkové systémy pro stabilizaci odpadu (WSPs) a jezírka s vysokým obsahem řas (HRAP). WSPs využívají přirozené procesy anaerobního a aerobního rozkladu, kde mikrořasy pomocí fotosyntézy produkují kyslík podporující biologickou degradaci organických látek. HRAP jsou mělké rybníky s míchacími zařízeními, která zajišťují rovnoměrné rozložení světla a živin, čímž maximalizují růst mikrořas a množství odstraněných živin (dusík a fosfor). HRAPs jsou efektivnější, ale náročnější na provoz, zatímco WSPs jsou jednodušší systémy. [16], [17]

Využití spiruliny na čištění odpadních vod se potýká s problémy, jako je variabilita složení živin ve skutečných odpadních vodách, přítomnost toxických látek a barva odpadních vod. Zároveň produktivita biomasy je v odpadních vodách stále relativně nízká ve srovnání s konvenčními chemickými médii. [15]

Mikrořasy kultivované v odpadních vodách nejsou vhodné pro aplikace s požadavkem vysoké čistoty biomasy jako například potravinářství a farmacie z důvodu přítomnosti toxických těžkých kovů, využití se spíše předpokládá při výrobě biopaliv, bioplastů a hnojiv. [15][18]



### 3.6. Spirulina jako obnovitelný zdroj pro výrobu biopaliv

Zvýšený důraz na obnovitelné zdroje energie vede k nahrazování fosilních paliv ekologičtějšími náhražkami. Mezi takovouto náhradu patří i biopaliva získané z mikrořas, a to zejména díky jejich krátkému buněčnému cyklu, vysokému obsahu oleje, silnou adaptační schopností a velmi dobrou schopností vázat oxid uhličitý. Mezi biopaliva, které je možné získat se řadí bionafta, bioplyn, bioetanol, biovodík, biometan a bio-olej. [18]

Mikrořasy mají vysoký obsah lipidů, které se podobně jako při výrobě bionafty z řepkového oleje přeměňují chemickou reakcí (transesterifikací) na methylestery mastných kyselin a vedlejší produkt glycerol, zatímco bioethanol se získává fermentací cukrů obsažených v mikrořasách. Vylisované zbytky biomasy mohou být dále využity pro extrakci dalších produktů za účelem zvýšení efektivity zpracování biomasy. [18]

Využití spiruliny kultivované v nádržích s odpadní vodou se považuje za ekonomicky i ekologicky udržitelný způsob výroby biopaliv [16]. Mikrořasy lze kultivovat na odpadních vodách a využívat jejich schopnosti akumulace pro odstranění nežádoucích látek a následně biomasu zpracovat při produkci biopaliv [16]. Při změně kultivačních podmínek je možné dosáhnout vysokých koncentrací sacharidů (až 50 %), potřebných na výrobu bioethanolu [19].

### 3.7. Biopolymery

Spirulina je také schopná produkovat biopolymery, jako je polyhydroxybutyrát (PHB), který je biologicky rozložitelný. Výzkum ukázal, že když je spirulina pěstována ve speciálně upraveném živném médium, může během svého růstu pro produkci biopolymerů dosáhnout až 45 % navýšení potřebných látek. Tento proces umožňuje využití mikrořas k výrobě bioplastů, které jsou ekologicky udržitelné a mohou konkurovat tradičním plastům z petrochemických zdrojů. Mají také srovnatelnou kvalitu s tradičními polyolefinovými plasty a mohou být využity v různých oblastech, od obalů po průmyslové aplikace. [19]

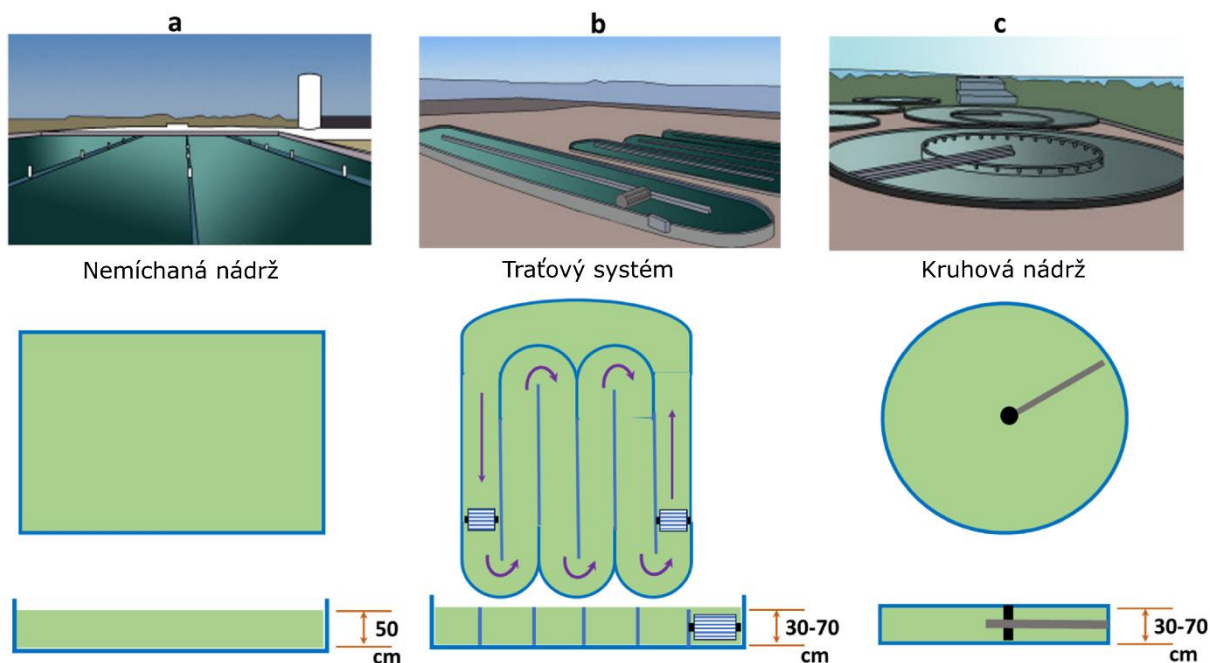
## 4. Kultivační systémy

### 4.1. Otevřené kultivační systémy

V otevřených kultivačních systémech, jako jsou přírodní, nebo umělé nádrže, oběžné náhony a kaskády nakloněných ploch, jsou kultury mikrořas v přímém kontaktu s okolním prostředím. Tyto systémy jsou konstrukčně jednodušší a levnější na provoz než uzavřené fotobioreaktory a jsou vhodné pro produkci velkého množství biomasy. Vyrábí se z různých inertních materiálů, jako je beton, PVC, laminát nebo nerezová ocel v závislosti na požadavcích a klimatických podmínkách. Míchání je zajištěno oběžnými čerpadly, rotujícími rameny, lopatkovými koly nebo vzduchováním. [1]

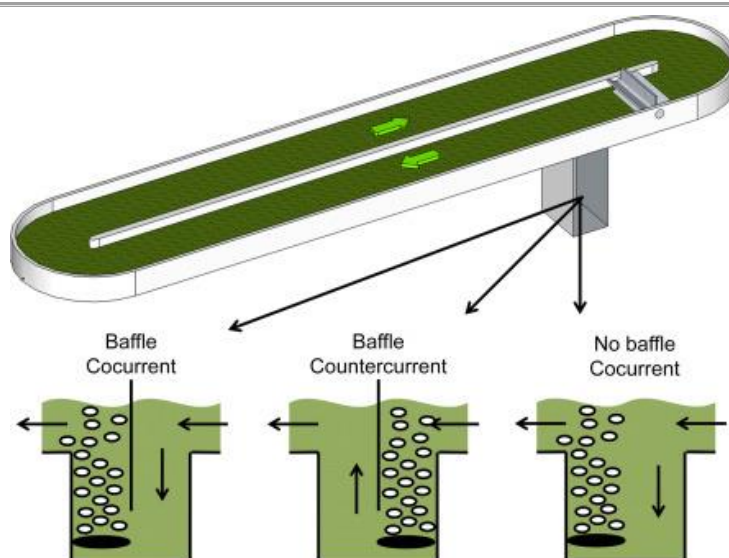
V těchto systémech je obvykle nižší koncentrace biomasy (0,5-1 g/l) a celková produktivita je nízká, kvůli omezenému míchání a nedostatku světla v hlubších vrstvách suspenze. Velké nádrže se komerčně využívají pro pěstování halofilní *Dunaliella salina* v Austrálii za účelem produkce  $\beta$ -karotenu. Otevřené nádrže jsou také používány pro pěstování spiruliny a *Chlorella* v různých částech světa. [1]

Nejstarší a nejjednodušší systémy pro kultivaci jsou **nemíchané nádrže** (Obr. 4-1), v těchto systémech s minimální kontrolou prostředí a míchání se vyskytují monokultury řas přírodně, zejména díky selektivním vlastnostem vody. Rozloha těchto rybníků může dosahovat až 250 ha o hloubce až 50 cm s produkční účinností maximálně 1 g/m<sup>2</sup>. Tento systém může být ekonomicky efektivní v případě, že klimatické podmínky umožní téměř nepřetržitý provoz. [5]



Obr. 4-1 Otevřené kultivační systémy [20] (upraveno)

Většina otevřených komerčních zařízení pro produkci biomasy spiruliny jsou **traťové systémy**. Nejjednodušším příkladem je mělký příkop vyhloubený do země, který je pokryt plastovými fóliemi, jež brání vsáknutí média do podkladového terénu. Lopatkovým kolem je médium hnáno stočeným kanálem a zároveň je promícháváno. Hloubka kanálů se pohybuje v rozmezí od 30 do 50 cm a dlouhodobá produktivita se pohybuje kolem 12 g/m<sup>2</sup>/den. [5]



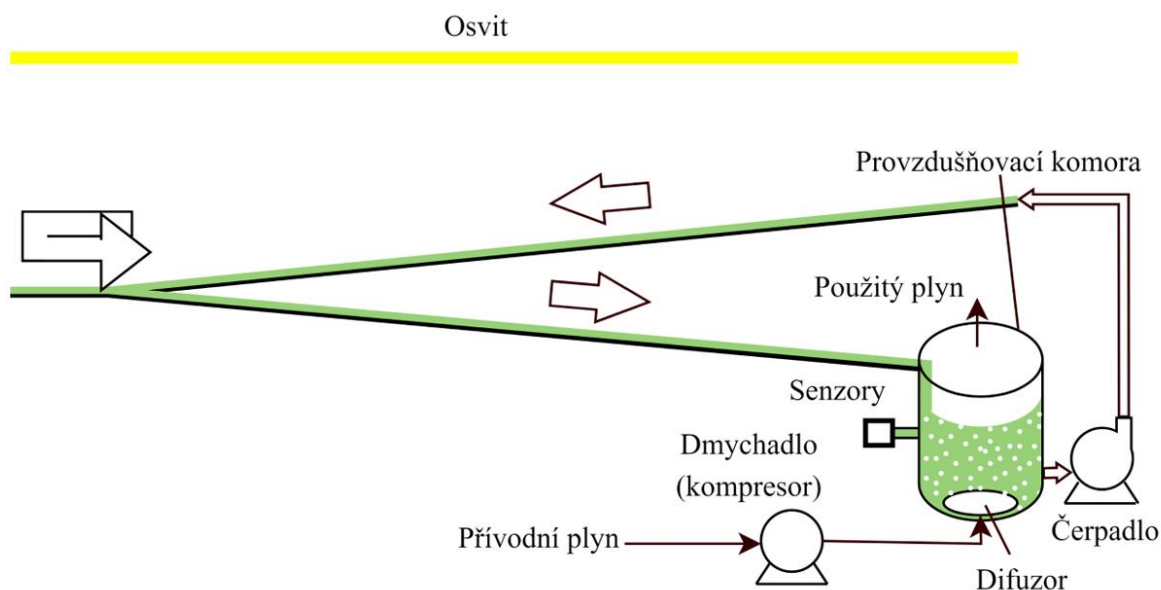
Obr. 4-2 Probublávané kolony traťových systémů [3]

Běžným rysem tohoto typu FBR (fotobioreaktoru) je kontinuální provoz. Zásobování vodou s živinami je umístěno za lopatkovým kolem, zatímco před ním dochází k odvodu média, které putuje dále na zpracování. Systém také může být vybaven probublávající kolonou (Obr. 4-2), sloužící k provzdušnění a promíchání kultury. Použití probublávající kolony je efektivní při využití plynů s vyšším obsahem oxidu uhličitého, což dodává potřebný oxid uhličitý pro fotosyntézu. Traťové systémy jsou často využívány pro masovou kultivaci mikrořas kvůli jejich nízkým investičním a provozním nákladům. [18]

**Kruhové systémy** se skládají z nádrže naplněné kultivačním médiem a rotoru umístěného ve středu nádrže. Rotor je osazen lopatkami, které promíchávají médium a zabraňují usazování mikrořas na dně. Ačkoli je tento systém poměrně jednoduchý na stavbu, tak při navrhování průměru nádrže je potřeba brát v potaz namáhání míchadla. Kruhové systémy jsou nejčastěji používaným typem otevřených fotobioreaktorů díky jejich jednoduché konstrukci a snadné škálovatelnosti. Tento typ zařízení využívá více než 70 společností po celém světě, s největšími producenty nacházejícími se v Taiwanu a Japonsku, kde je vysoká poptávka po řasách určených k lidské spotřebě. Kruhové systémy jsou ideální pro pěstování mikrořas, které snadno sedimentují, jako jsou druhy z rodů *Chlorella* a *Chlamydomonas*. [18]

Jinou variantou otevřených systému jsou tenkovrstvé **kaskádové systémy**, navržené tak, aby tloušťka vrstvy kultury byla pouze několik centimetrů a došlo k dobrému osvětlení buněk v celém objemu (Obr. 4-3). Turbulence je zajištěna cirkulací kultury pomocí čerpadla, dopravujícího médium z konce kaskády na začátek. V těchto systémech, kde mikrořasy rostou v tenké vrstvě, je poměr osvětleného povrchu k celkovému objemu obvykle větší než 100, což umožňuje dosažení vysokých hustot biomasy (15–35 g/l). Kaskády založené na kultivaci mikrořas v tenké vrstvě suspenze kombinují výhody otevřených systémů, jako je přímé sluneční osvětlení a snadný odvod tepla a kyslíku, s některými výhodami uzavřených systémů,

včetně dostatečné turbulence kultury a vysoké hustoty kultury, vedoucí k dosažení vysoké produktivity. [1]



Obr. 4-3 Schéma kaskádového systému [18]

Existuje mnoho variant uspořádání nakloněných rovin, které mohou být složeny z jedné nebo více rovin umístěných pod sebou [18].

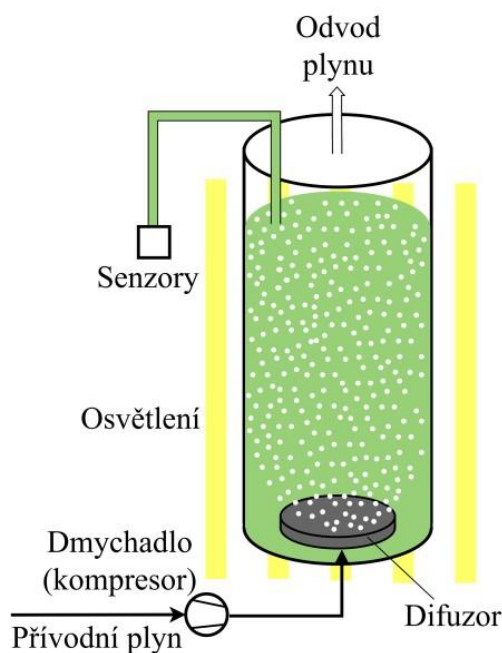
#### 4.2. Uzavřené kultivační systémy (fotobioreaktory)

Fotobioreaktory představují uzavřené nebo polouzavřené systémy, které umožňují kultivaci mikrořas za kontrovaných podmínek osvětlení a životního prostředí. Jsou konstruovány ve formě průhledných trubec, válců nebo plochých panelů, které jsou vyrobeny ze skla nebo průhledných plastů odolných proti působícím vlivům. Tyto systémy umožňují cirkulaci kultury pomocí čerpadel nebo vzduchovacích proudů, což zajišťuje dobré míchání kultury a dobrou distribuci živin a  $\text{CO}_2$ . Pro udržení vhodné teploty pro růst mikrořas je často nezbytné chlazení, které může být řešeno pomocí tepelných výměníků, stříkáním vody na povrch nebo ponořením kultivační smyčky do chladičského média. [1]

Fotobioreaktory nabízejí řadu výhod, jako jsou reprodukovatelné kultivační podmínky, snížené riziko kontaminace, nižší ztráty  $\text{CO}_2$  a menší požadavky na prostor ve srovnání s otevřenými systémy, avšak vyžadují pravidelnou údržbu a mají vyšší náklady spojené zejména s výstavbou, kvůli konstrukční ceně, a nákladům na chlazení a čištění [1].

Nejčastěji využívanými uzavřenými systémy pro masovou kultivaci jsou **trubkové fotobioreaktory** [18]. Skládají se z řady průhledných trubek, které umožňují osvětlení proudu kultivačního média, tyto trubky mohou být uspořádány horizontálně, vertikálně nebo spirálovitě. Proudění média je zajištěno čerpadlem a aeračním systémem, který umožňuje lepší přístup oxidu uhličitého. Aerační plyn také slouží k promíchávání média, což předchází usazování řas. Fotobioreaktor se skládá ze dvou základních částí: provzdušňovací a ozařovací. Provzdušňovací část absorbuje oxid uhličitý a odvádí vyprodukovaný kyslík, zatímco ozařovací část zajišťuje osvětlení proudu média. [2]

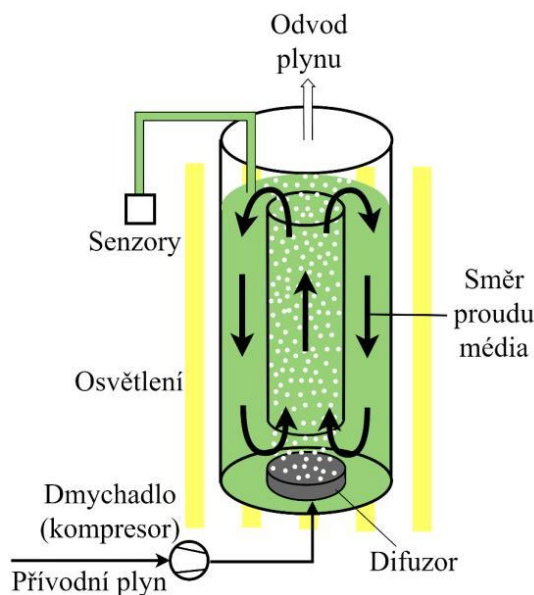
Jednoduchým příkladem trubkového systému je **válcový fotobioreaktor**. Skládá se z vertikálně položeného průhledného válce naplněného médiem a difuzoru na dně, který vylučováním bublin obohacuje kulturu o  $\text{CO}_2$  a zároveň míchá médium (Obr. 4-4).



Obr. 4-4 Schéma válcového fotobioreaktoru [18]

Vertikální trubkové reaktory s bublinkovým sloupcem jsou navrženy s minimálně dvojnásobnou výškou oproti průměru, díky tomuto soustava efektivně využívá rozložení povrchu ku objemu a poskytuje tak vhodnější přenos tepla a proudění hmoty podél reaktoru [20]. Jelikož není nutné pořizovat a provozovat čerpadlo, jsou investiční náklady a náklady na provoz poměrně nízké, nevýhodou je nedokonalé promíchání, což má vliv na osvětlení a sedimentaci kultury [18].

Modifikací předchozího systému je **airlift fotobioreaktor** (viz Obr. 4-5) využívající přepážku nebo průvodní trubku k rozdělení objemu tekutiny v nádobě na dvě propojené zóny, čímž se vytvářejí velké cirkulační proudy [20].

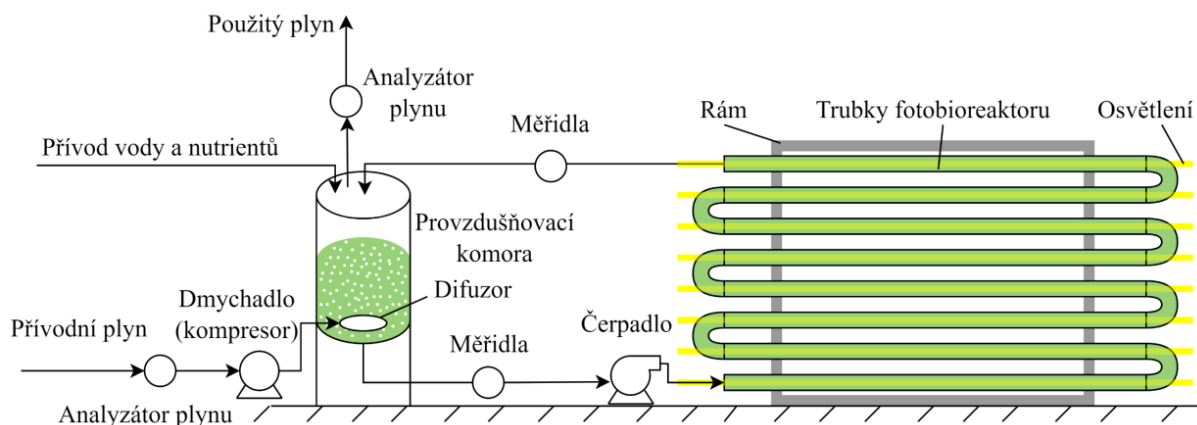


Obr. 4-5 schéma airlift fotobioreaktoru [18]

Rozdíl v průměrných hustotách v jednotlivých sekcích vytváří tlakový spád, který zajišťuje cirkulaci, přičemž médium s bublinkami, které má nižší průměrnou hustotu, stoupá směrem nahoru k hladině [18]. Tyto reaktory mají výhody jako je vysoký přenos hmoty, dobré míchání s nízkým mechanickým namáháním buněk, nízká spotřeba energie a snadné provozování za sterilních podmínek, ale jejich škálování je obtížné kvůli složitému toku tekutiny [20]. Při zvětšování rozměrů tohoto fotobioreaktoru se také projevuje horší využití světla, a to jak z důvodu sníženého pronikání světla do středu reaktoru, tak kvůli stínění mezi jednotlivými fotobioreaktory, což lze řešit zavedením optických vláken jako dalšího zdroje osvětlení. [18]

Vzestupné a sestupné proudění vytváří cyklické efekty neboli periodické změny mezi světlejšími a tmavšími zónami. Tato cyklická dynamika je důležitá pro vhodnou distribuci živin a světla mezi řasami, což je vhodné pro čistou kultivaci řas i pro kultivaci řas v odpadních vodách. Navíc tyto reaktory vhodně využívají rozložení povrchu k objemu a dosahují vysoké hustoty buněk [20].

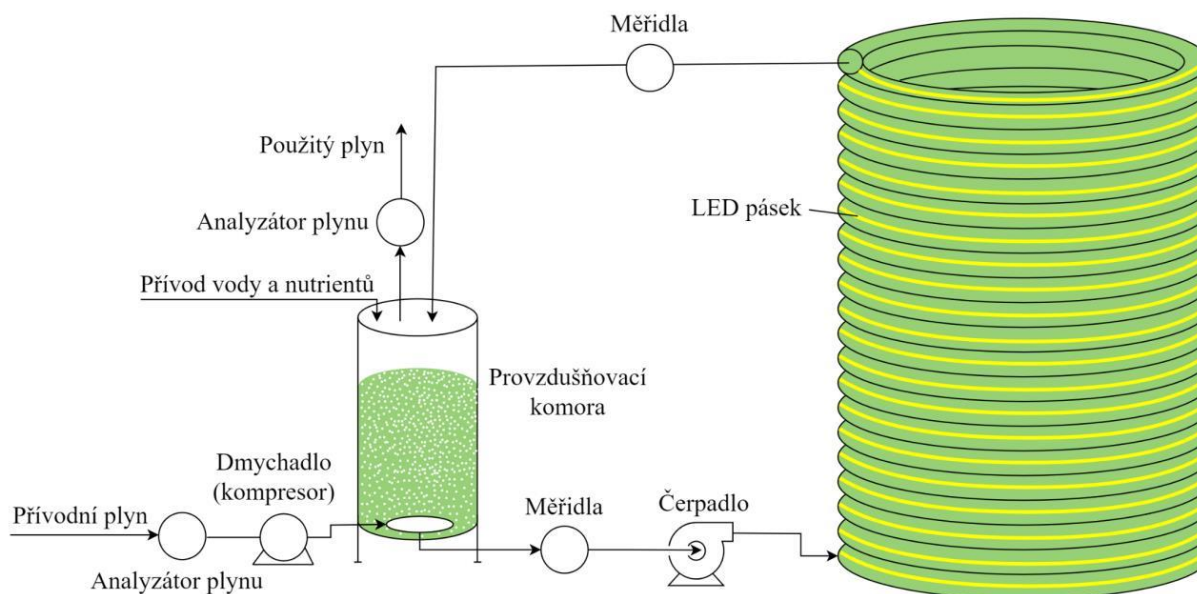
Dalším příkladem trubkového systému jsou **horizontální trubkové fotobioreaktory** (Obr. 4-6), kde průhledné skleněné či plastové trubice jsou uspořádány horizontálně nad sebou, popřípadě vedle sebe podle konkrétní aplikace [18]. Průměr trubek je obvykle menší než 10 centimetrů, aby bylo zajištěno prosvícení média. Tyto konstrukce kultivačních nádob mají velkou povrchovou plochu na jednotku objemu, aby maximalizovaly vystavení mikrořas světlu [20]. Médium z potrubí sloužícího k osvětlování kultury putuje dále do provzdušňovací komory, kde je probubláváním dodán oxid uhličitý a zároveň uvolněn kyslík vytvořený při fotosyntéze [18].



Obr. 4-6 Schéma horizontálního trubkového fotobioreaktoru [18]

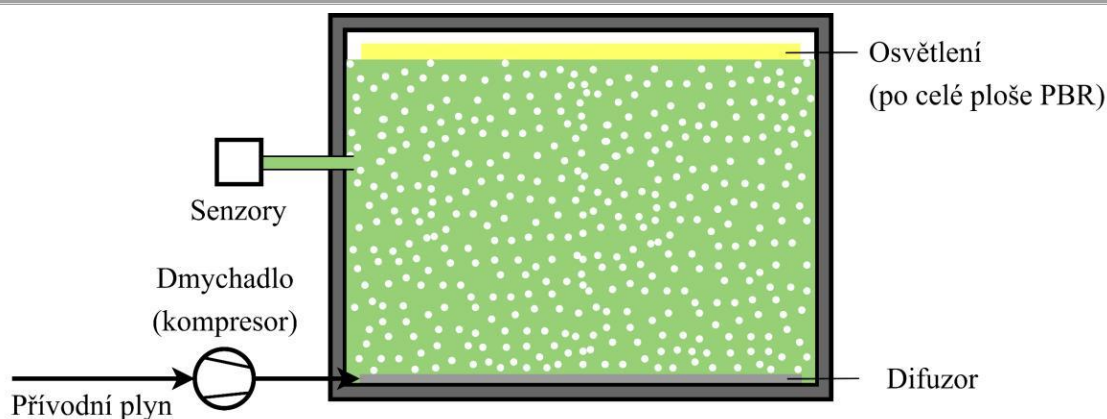
Dmyhadlo nebo kompresor zajišťuje dodávku plynu do probublávané komory. Cirkulaci média obstarává čerpadlo. Rychlost průtoku média je potřeba zvolit tak, aby se dosáhlo turbulentního toku a radiálního míchání, přičemž je nutné vyvážit riziko usazování mikrořas na stěnách a náklady na pohon čerpadla. [18]

Trubky v tomto systému nemusí být pouze přímé, vyrábí se také **šroubovicové trubkové fotobioreaktory** (Obr. 4-7), u kterých je osvětlená část stočena do šroubovice, princip zůstává stejný [18].



Obr. 4-7 Schéma šroubovicového fotobioreaktoru [18]

Jinou variantou uzavřených systémů jsou **deskové fotobioreaktory** (Obr. 4-8). Konstrukce jsou obvykle vyrobené z dvou paralelních transparentních panelů, umožňující přístup světla. Běžně jsou vyrobeny z PVC, polykarbonátu, skla nebo polyethylenu a nabízejí velkou osvětlenou plochu ve srovnání s objemem kultivačního média. Míchání je dosaženo pomocí pumpy nebo aerace umístěné ve spodní části. [3]



Obr. 4-8 Schéma deskového fotobioreaktoru [18]

Osvětlení fotobioreaktoru může být provedeno pomocí slunečního záření, umělého světla, popřípadě může být přidáno umělé interní osvětlení pro maximální využití světla [18]. Nevýhodou oproti jiným uzavřeným systémům může být složitější škálovatelnost, náročné čištění a usazování kultury na stěnách [18].

Vývoj se v poslední době zaměřuje i na fotobioreaktory vytvořené z **jednorázových pytlů**. Jejich konstrukce zahrnuje průhledné polyethylenové pytle, které jsou zavěšeny vertikálně na ocelovém rámu, položeny horizontálně na zemi nebo uloženy v oceánu, což umožňuje regulaci teploty a míchání pomocí vln [18]. Na dno pytle je přivedena vzduchovací hadice na provzdušnění, čímž se zároveň médium promíchává, z důvodu lepšího promíchání mohou být instalované přepážky pro cirkulaci (Obr. 4-9) [20]. Výhodou je nízká pořizovací cena, jednoduchá instalace, škálovatelnost a žádné náklady na čištění. Nevýhodou je naopak usazování média, omezený přístup k světlu a časté úniky média, kvůli kterým systémy vyžadují neustálou kontrolu, lepení nebo výměnu pytlů, to pak vede k tvorbě odpadů, které zatěžují životní prostředí [21].



Obr. 4-9 Pytlový fotobioreaktor s různými druhy přepážek [47]

**Hybridní fotobioreaktory** spojují uzavřené a otevřené systémy. Otevřené soustavy jsou ekonomicky výhodné, ale náchylné ke kontaminaci, uzavřené eliminují toto riziko, ale jsou nákladnější. Cílem hybridních systémů je dosáhnout vyšší produktivity otevřených systémů za zachování nízkých nákladů. Jedním z příkladů je traťový systém, který je zakrytý, aby oddělil plyny nad médiem od vnějšího prostředí a minimalizoval riziko kontaminace. Další možností je kombinace uzavřeného fotobioreaktoru s traťovým systémem, kde uzavřený



systém poskytuje kontrolu kontaminace a stabilní dodávku živin pro mikrořasy, zatímco traťový umožňuje růst mikrořas ve větším měřítku. Hybridní fotobioreaktory kombinují různé kultivační systémy s cílem optimalizovat provoz a zvýšit výkon. [18]

**Fermentory** jsou zařízení používaná k produkční kultivaci mikrořas, které rostou heterotrofně, což znamená, že získávají energii a uhlík z organických sloučenin v médiu namísto ze světla a CO<sub>2</sub>. Tyto fermentory umožňují růst mikrořas v dobře kontrolovaných podmínkách bez světla a jsou charakteristické intenzivním mícháním a dostatečným přísunem kyslíku pro katabolické procesy. Fermentory umožňují produktivní produkci biomasy s vysokou hustotou, což je výhodné zejména pro průmyslovou výrobu mikrořas a k produkci látek jako je například kyselina dokosaheptaenová. Fermentory používají dvě fáze: nejprve rostou buňky v plném růstovém médiu a potom se omezí přísun dusíku, což způsobuje nadprodukcí lipidů. [1]

### 4.3. Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých systémů

Každý typ kultivačního systému má své vlastní výhody a nevýhody, a proto nelze jednoznačně určit, který systém je nejlepší. Při rozhodování o vhodném kultivačním systému je důležité zvážit potřeby, požadavky, dostupné podmínky, lokalitu a finanční prostředky určené k investici. Každý systém má své místo a uplatnění v závislosti na konkrétní situaci a požadavcích uživatele. Je třeba pečlivě posoudit všechny faktory před rozhodnutím o výběru kultivačního systému pro úspěšnou a efektivní produkci mikrořas.

Tabulka 4.1 Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých systémů [2] (upraveno),

Typ systému	Výhody	Nevýhody
Traťový systém	Velké množství zpracovávaného média Nízké provozní náklady Snadná konstrukce a údržba	Sedimentace řas v kanále Neefektivní prozáření média Možnost kontaminace média Slabé míchání Ztráty vody odpařováním
Kaskádový systém	Prozáření celého objemu média Dobré míchání Vysoká hustota média	Malé množství zpracovávaného média Možnost kontaminace média Malá ozářená plocha Vyšší pořizovací a provozní náklady Ztráty vody odpařováním
Válcový fotobioreaktor	Jednoduchá konstrukce Velké množství zpracovávaného média Zamezení kontaminace média Velká ozářená plocha	Neefektivní prozáření média Sedimentace řas Znečištění transparentních ploch
Airlift systém	Lepší míchání oproti válcovému Nízké namáhání buněk Nízká spotřeba energie Snadné provozování za sterilních podmínek	Složitější konstrukce Obtížné škálování Horší využití světla Vyšší náklady na výstavbu oproti válcovému
Trubkový systém	Prozáření celého objemu média	Znečištění transparentních ploch

	Zamezení kontaminace Velká ozářená plocha Dobrá možnost kontroly prostředí	Vyšší náklady na provoz a pořízení Obtížnější údržba Složitá konstrukce
Deskový fotobioreaktor	Velké množství zpracovávaného média Prozáření celého objemu média Zamezení kontaminace média Velká ozářená plocha	Znečištění transparentních ploch Vyšší náklady na provoz a pořízení Omezená možnost míchání Obtížná regulace teploty
Pytlový fotobioreaktor	Nízké provozní a pořizovací náklady Jednoduchá konstrukce Dobrá škálovatelnost	Nižší kontrola prostředí Omezená možnost míchání Úniky média do okolí Vznikající odpad po vyřazení pytlů
Hybridní fotobioreaktor	Kombinace výhod různých systémů Flexibilita v řízení podmínek Možnost optimalizace	Složitější konstrukce a údržba Vyšší náklady na provoz
Fermentor	Přesná kontrola prostředí Možnost růstu bez světla Vyšší hustota biomasy	Vyšší náklady na provoz Potřeba intenzivního míchání

#### 4.4. Komerčně dostupné fotobioreaktory

Ačkoli je mnoho druhů kultivačních systémů, tak komerčně dostupné FBR pro kultivaci v malém měřítku a domácích podmínkách jsou pouze zřídka k dispozici. Kultivační systémy s malým objemem jsou dostupné pro laboratorní účely a průmyslovou kultivaci vzácných druhů mikrořas, čemuž odpovídá i jejich pořizovací cena. Například firma Subitec nabízí laboratorní systémy o velikostech 6, 28, 112 a 180 litrů, které je možné modulově skládat za sebe. Jsou vybaveny LED osvětlením, regulací vzduchu a CO<sub>2</sub>, a dalšími pokročilými funkcemi (Obr. 4-10 vlevo). Tyto systémy stojí desítky tisíc korun a jsou určeny pro specifické aplikace ve farmacii, kosmetice a potravinářství. Společnost Photon Systems Instruments nabízí systémy jako Multi-Cultivator MC 1000-OD MIX (Obr. 4-10 vpravo), jehož cena začíná na 5 950 €, a FMT 150 s cenou od 12 960 € do 21 599 €, v závislosti na jejich kapacitě a množství funkcí, kterými systém disponuje. [18]



Obr. 4-10 Vlevo laboratorní systém Subitec CM6 o objemu 6 l [48], vpravo Multi-Cultivator MC 1000 od firmy PSI [25]

## 5. Sklizení řasové biomasy

Četnost sklizně se odvíjí od denní rychlosti růstu, která je závislá na dostupnosti živin a světla [7]. Prvním krokem je promývání média za účelem oddělení biomasy od látek obsažených v kultivačním médiu a dalších nežádoucích částic. Tento proces zahrnuje speciální zařízení, jako mikro síta a vibrační síta s póry (pro spirulinu o velikosti 0,05 mm), k získání čisté řasové biomasy. [22][23]

Dalším krokem je zahuštění objemu suspenze. Tento krok zajistí snížení zpracovávaného objemu, což vede k úsporám v navazujících procesech. Typicky se zahušťování provádí flokulací, gravitační sedimentací a flotací. [22]

Před sušením je ještě nutné odstranit zbytkovou vodu od biomasy. Odvodnění se dosahuje mechanickými procesy jako je filtrace a centrifugace. Po odvodnění je řasový koláč dosušován za účelem zvýšení stability pro další zpracování. Sušení může být provedeno na vzduchu, mrazem nebo pomocí sprejových sušiček. [22]

## 6. Požadavky na kultivační zařízení

### 6.1. Průměr a délka trubek

Pro trubkový FBR je důležité určit vyhovující průměr a délku trubek, a to nejen kvůli příjmu světla kulturou, ale i pro koncentraci kyslíku v kultuře, objemovou produktivitu a koncentraci biomasy viz Tabulka 6.1.

Tabulka 6.1 Produktivita *A. plantensis* v různých průměrech trubky ve venkovních fotobioreaktorech [24]

Vnitřní průměr trubky (cm)	Litr/m	Doporučená koncentrace biomasy (g/l)	Průměrná čistá objemová produktivita (g/l/d)	S/V (m <sup>-1</sup> )
14,0	15,4	0,4–0,6	0,2	9
13,1	13,3	0,6–0,8	0,23	10
7,4	4,3	1,2–1,4	0,40	17
5,0	1,96	1,4–2,0	0,65	25
2,5	0,49	3,5–6,0	1,4	50

## 6.2. Materiál

Materiály používané pro FBR musejí být netoxické, UV, teplotně a chemicky stabilní, musejí dosahovat vysoké životnosti a mít nízkou pořizovací cenu. Na osvětlené části reaktoru je kladen požadavek vysoké transparentnosti a nízkého indexu lomu.

Jedním z materiálů používaných pro výstavbu FBR je sklo, které vyniká vysokou chemickou odolností, tepelnou stabilitou a dlouhou životností, nevýhodou je vysoká pořizovací cena a křehkost. Mechanicky odolnějším materiálem jsou PVC–U a PE, které vynikají nižší cenou oproti sklu, dlouhou životností a jednoduchostí při sestavování, nevýhodou těchto materiálů je nižší transparentnost a nízká teplotní odolnost.

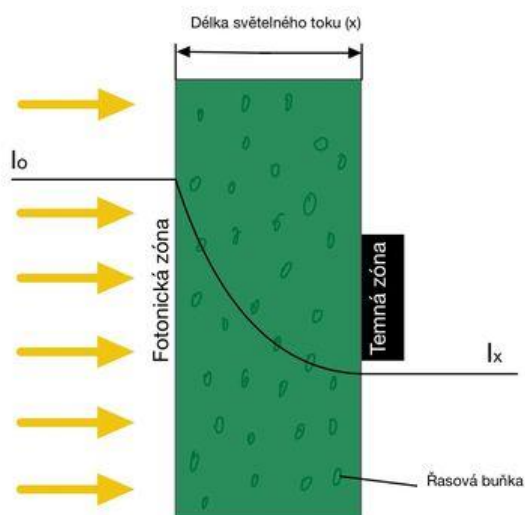
## 6.3. Osvětlení

Světlo je primárním zdrojem energie pro všechny fotosyntetické organismy, je tedy důležité poskytnout světlo všem buňkám. Jeho dostupnost je ovšem omezena faktory jako koncentrace biomasy, délka světelného průchodu, intenzita dopadajícího světla a přítomnost bublin. Hlavním problémem je, že si buňky navzájem stíní, proto se délka světelného průchodu rapidně snižuje v závislosti na vzdálenosti (Obr. 6-1)[25]. Světelný průchod popisuje Lambertův-Beerův zákon (6.1):

$$I_x = I_o e^{-a_c C_b b} \quad (6.1)$$

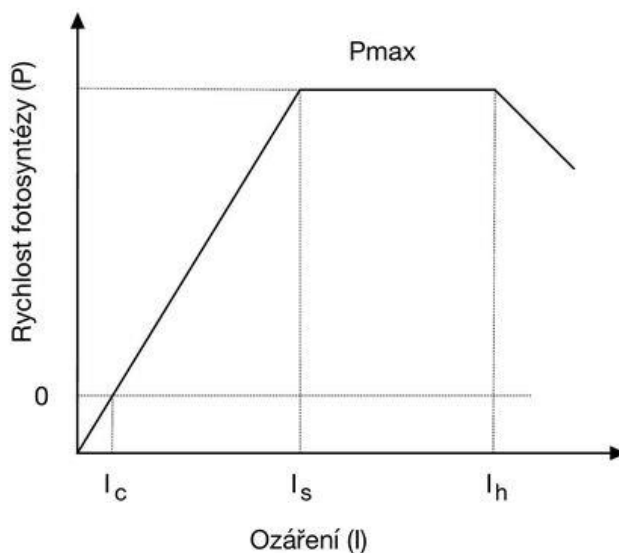
kde:

- $a_c$  schopnost biomasy absorbovat světlo (m<sup>2</sup>/g)
- $C_b$  koncentrace biomasy (g/l)
- $b$  délka světelného průchodu od povrchu do bodu x ve fotobioreaktoru (m)
- $I_o$  intenzita světla na povrchu, ve vzdálenosti x (μW/m<sup>2</sup>)



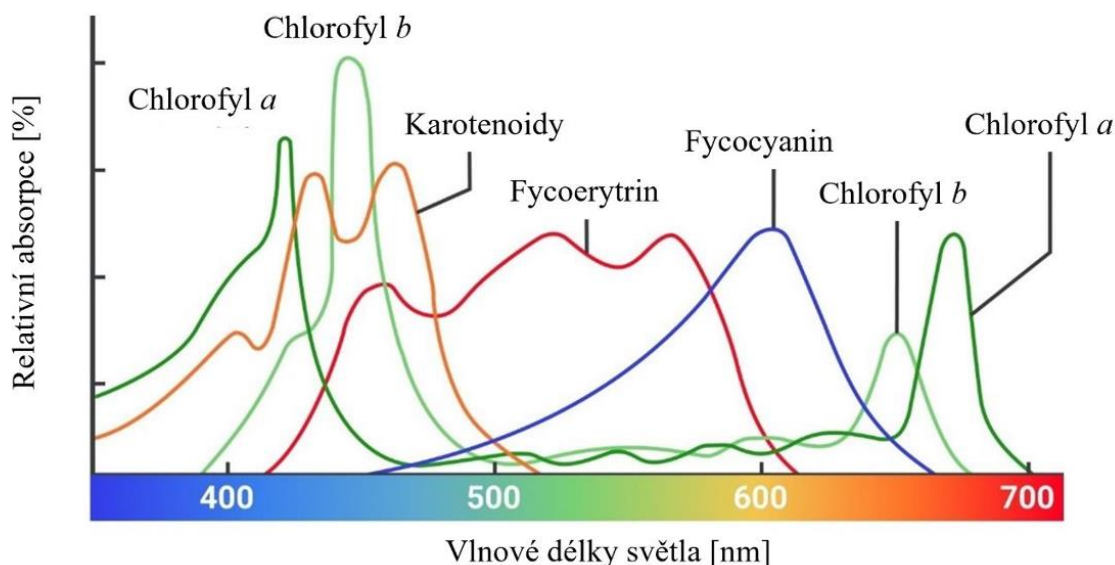
Obr. 6-1 Prostup světla fotobioreaktorem [26](upraveno)

Ze světelné závislosti fotosyntézy (Obr. 6-2) je zřejmé, že při nízké intenzitě světla (pod  $I_c$ ) jsou fotosyntetické reakce omezeny nedostatkem fotonů, které jsou absorbovány fotosyntetickými pigmenty. Jakmile intenzita ozáření stoupá, zvyšuje se počet fotonů absorbovaných pigmenty, což vede k vyšší rychlosti fotosyntézy. Rychlost stoupá až od bodu, kdy dojde k světelnému nasycení ( $I_s$ ), kde dosahuje fotosyntéza maximální úrovně. Nad tímto bodem jsou enzymy a další faktory řídící fotosyntézu již nasycené a další zvyšování ozáření (nad  $I_h$ ) vede k fotoinhibici (poškození fotosyntetického aparátu buněk). [26]



Obr. 6-2 Schéma světelné závislosti fotosyntézy [27]

Při fotosyntéze mikroorganismy mohou používat pouze fotosynteticky aktivní záření (PAR) v rozsahu od 350 do 700 nm [3]. K zachycení PAR dochází absorpcí světla fotosyntetickými pigmenty. Každý druh mikrořas obsahuje jiné pigmenty, a proto vyžaduje jiné vlnové délky (viz Obr. 6-3). Vlnové délky kratší než 350 nm mají moc energie a mohly by poškodit fotosyntetické buňky, naopak světlo o vlnové délce nad 700 nm neobsahuje dostatek energie k zahájení procesu fotosyntézy [25].



Obr. 6-3 Relativní absorpce světla fotosyntetickými pigmenty [27]

Jednotkou pro určování intenzity osvětlení mikrořas je intenzita fotonového toku (*PPFD*), jedná se o počet PAR fotonů dopadajících na plochu za čas [27]. Poskytuje přesnější informace o množství světla, které je k dispozici pro fotosyntézu mikrořas než měření intenzity světla ve všeobecných jednotkách, jako je lux nebo lumen.

Doba osvětlení je rovněž důležitá pro správný růst. Provedené experimenty ukazují, že při kombinaci nepřetržitého a blikajícího LED bílého světla bylo dosaženo více než 50% nárůst v energeticko-sklizňové efektivitě, tedy nižší spotřeba energie na vyprodukování stejného množství řas, jako u případu s pouze stálým, či blikajícím světlem [28].

U systémů jako je například airlift trubkový fotobioreaktor dochází k efektu blikajícího světla, který vniká při proudění buněk řas mezi světlými a tmavými částmi reaktoru. Díky tomuto efektu lze navýšit objem reaktoru při zachování nákladů na osvětlení a předcházet fotoinhibici. Využívat tento jev, aniž by měl vliv na rychlost růstu mikrořas je možné, pokud je zachována doba vystavení buněk temnému cyklu kratší než několik desítek sekund (např. 40 s pro sinici *Chlamydomonas reinhardtii*). [29]

### Běžně využívané zdroje světla:

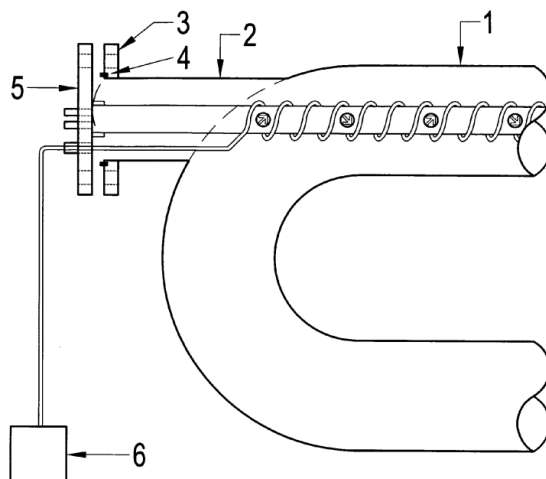
**Sluneční světlo** je zdroj využívaný zejména v masové kultivaci, a to díky dostupnosti a jednoduchosti. Nevýhodou je jeho časová nestálost a ovlivnitelnost počasím. Sluneční světlo je širokospektrální a pokrývá celý rozsah viditelného záření [27]. Jelikož Země mění svou vzdálenost a náklon vůči Slunci v průběhu roku, tak je energie přijatá tímto způsobem velmi proměnlivá a na použití pro bioreaktor navrhnutý v rámci této práce nevhodná.

**Zářivka** je označení pro nízkotlaké rtuťové výbojky. Viditelné světlo vzniká úpravou ultrafialového záření z výboje vrstvami luminoforu. Zářivky mohou být lineární (trubicové) a tvarované. Spektrum vyzařovaného světla je závislé na druhu luminoforu, tudíž je neměnné. Zářivky lze charakterizovat jako ekologicky šetrný zdroj světla s dlouhou životností (až 20 000 h) a výbornými světelnými parametry. [27]

**LED (světlo emitující dioda)** je polovodičová součástka s PN přechodem, jež při průchodu proudem v propustném směru emituje světlo ve viditelné části spektra a jeho blízkém okolí.

Diody se specifickým zabarvením (červené, zelené, modré) jsou schopné vyzařovat světlo v úzkém spektrálním složení, lze je tedy nazvat monochromatické. Také lze pomocí LED simulovat denní světlo v celém rozsahu viditelného spektra. Výhodou LED diod je vysoká jednoduchost konstrukce, umožňující širokou škálu použití. [27]

**Optickými vlákny** lze přivádět záření do média mikrořas ze zdroje, kterým může být například slunce nebo LED. Optická vlákna bývají vyrobené z plastu, popřípadě skla, s vysokou transparentností, takže dokážou vodit světlo po své délce a emitovat jeho část na svém obvodu. Vložením několika vláken do kultivovaného média lze osvětlovat blízké okolí vláken a dosáhnout lepšího osvětlení než při externím osvětlení (Obr. 6-4). [27]



Obr. 6-4: Systém pro zvýšení produktivity fotobioreaktoru s použitím optických vláken [30]

Na Obr. 6-4 je systém pro zvětšení produktivity horizontálního FBR (1), po přidání rozšíření s přírubou (2,3) je vložena trubka omotaná optickým kabelem se zdrojem světla (6), která zároveň plní funkci trysky pro vsázkou nutrientů a míchání média (5), mezi přírubami je vloženo těsnění (4). Toto uspořádání zajišťuje dobrou distribuci světla médiem a rovnoměrnou distribuci živin v celé délce potrubí. [30]

#### 6.4. Míchání

Mícháním se udržuje jednotná teplota, konzistentní pH, distribuují se živiny a zajišťuje se lepší přenos plynu mezi plynovými bublinami a kultivačním médiem. Bývá provedeno za pomoci čerpadel, oběžných či lopatkových kol, magnetických mixérů a probublávání plynu do média [28]. Důležité je při míchání dosáhnout dostačujících vířivých proudů, vznikajících při turbulentním proudění, zejména pokud jsou kultury citlivé na hydrodynamické a mechanické smykové síly. Citlivost ovlivňuje například přítomnost křehkých bičíků, složení a tloušťka buněčné stěny a přiměřenost kultivačních podmínek [3].

Při aerobním míchání obecně platí, že čím větší je poměr výška/průměr FBR, tím je nižší poškození spojené s bublinami. Tento efekt lze snížit minimalizací rychlosti proudění vzduchu, přičemž se obecně pro provzdušňovací FBR doporučují hodnoty 0,1 vvm<sup>1</sup> [3], [31].

<sup>1</sup> vvm (volume per volume per minute) tato jednotka specifikuje, jaký objem plynu je dodáván na jednotku objemu kapaliny za minutu.

S ohledem na provozní náklady je potřeba dbát na optimalizaci spotřebované energie vynaložené na míchání.

### 6.5. Provzdušňování

Hlavní zdroj uhlíku pro fotosyntetický růst je oxid uhličitý, který bývá dodáván do média plynovým provzdušňovačem. Z bublin  $\text{CO}_2$  difunduje do kultivačního média, kde ho v rozpuštěné formě absorbují buňky mikrořas a dále využívají.[31]

K provzdušňování bývá nejčastěji používán vzduch obsahující 0,04 obj. %  $\text{CO}_2$ , popřípadě je možné vzduchování plynem bohatším na oxid uhličitý s vhodnějším poměrem  $\text{CO}_2$  ke vzduchu 0,2–5 obj. % [28]. Zároveň je důležité brát v potaz, že  $\text{CO}_2$  ovlivňuje pH, jeho příliš velké množství může snížit hodnotu pH až do bodu, kdy většina průmyslově využívaných mikrořas a sinic nepřežije, a naopak nedostatek  $\text{CO}_2$  může zapříčinit nárůst pH, což může vést k buněčné smrti [28].

**Velikost bublin** je důležitým aspektem pro správnou a efektivní kultivaci v FBR. Bubliny o malém průměru mohou snížit produktivitu, protože nejen že zabraňují prostupu světla, ale také protože bubliny o podobné velikosti jako mikrořasy ji mohou zachytit a poté může dojít k jejímu poškození při prasknutí bubliny na hladině. Velké bubliny naopak mají příliš velký poměr objemu k povrchu bubliny, tudíž přenos plynu mezi médiem a bublinou není efektivní. [28]

### 6.6. Živiny

Pro svou kultivaci vyžaduje spirulina živiny, které jsou ji dodávány v podobě kultivačního média. Obsah prvků v tomto médium rovněž ovlivňuje pH. Typické složky kultivačního média zahrnují:

**Uhlík** je důležitý vstupní zdroj pro fotosyntézu, bývá zajištěn pomocí látek jako hydrogenuhličitan sodný ( $\text{NaHCO}_3$ ) nebo uhličitan sodný ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) [32], [5].

**Dusík** je nezbytný pro tvorbu proteinů a nukleových kyselin, zdrojem jsou dusíkaté soli jako dusičnan amonný ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) nebo dusičnan sodný ( $\text{NaNO}_3$ ) [32], [5].

**Fosfor** zajišťuje syntézu nukleových kyselin, zdrojem jsou fosforečnany jako je dihydrogenfosforečnan draselný ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), popřípadě hydrogenfosforečnan draselný ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) [32], [5].

**Draslík** je důležitý pro různé metabolické procesy, zdrojem může být chlorid draselný ( $\text{KCl}$ ) [5].

Stopové prvky jako železo, měď, zinek, mangan a vitaminy (například B12) jsou nezbytné pro enzymatické reakce a další metabolické procesy [5].

Jednotlivá média se liší obsahem jednotlivých prvků, svým pH, ale i cenou. Nejpoužívanější je Zarroukovo médium, jehož složení je v Tabulka 6.2, konkrétně pro použití na kultivaci spiruliny je nutné ho upravit, popřípadě dle konkrétních požadavků lze využít i jiná média [32].

Tabulka 6.2 Složení Zarroukova kultivačního média [32]

Sloučenina	Název	Koncentrace (g/l)
$\text{NaHCO}_3$	hydrogenuhličitan sodný	16,8
$\text{NaNO}_3$	dusičnan sodný	2,5



NaCl	chlorid sodný	1,0
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	síran draselný	1,0
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	dihydrogenfosforečnan draselný	0,5
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	síran hořečnatý heptahydrát	0,2
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	síran železnatý heptahydrát	0,01
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	chlorid vápenatý dihydrát	0,04
EDTA	ethylendiamintetraoctotá kyselina	0,08

## 6.7. Sterilizace

Sterilizace FBR je při kultivaci produktů určených ke konzumaci klíčová. Sterilizací se předchází kontaminaci, zajišťuje se čistota kultury a eliminuje se konkurence mezi mikroorganismy. Sterilizace se dělí na tepelnou, chemickou, filtrační a elektromagnetickou. Při výběru způsobu sterilizace je nutné brát ohledy na materiál FBR, nejsou tedy vhodné všechny dostupné technologie.

Nejčastěji se sterilizace provádí pomocí vodní páry při teplotě kolem 120 °C, kdy je systém vystaven vysoké teplotě a zvýšenému tlaku po dobu několika minut, tato metoda je vhodná převážně pro skleněné fotobioreaktory. [5]

Na chemické čištění se nejčastěji využívá chloran sodný (například komerčně dostupný prostředek SAVO). Jedná se o účinný prostředek, který zabíjí většinu organismů [18]. Slabý roztok chloranu v teplé vodě se využívá například k sanitaci hladkých povrchů zařízení na výrobu piva a vína [33]. Při používání je nutné dostatečně opláchnout povrchy a zbavit se zbytků použitého roztoku v souladu s bezpečnostním listem chemikálie [33].

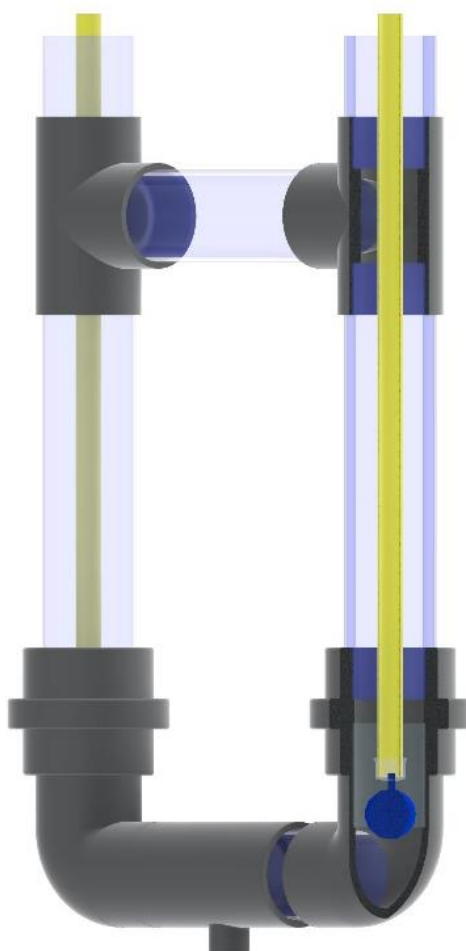
Dalším způsobem sterilizace je využití ozonu. Ozon je nestabilní molekula složená ze tří atomů kyslíku (O<sub>3</sub>). Toto uspořádání molekuly kyslíku je poměrně reaktivní a má schopnost rozkládat se zpět na běžnou formu kyslíku (O<sub>2</sub>) za uvolnění jednoho atomu kyslíku. Tento rozklad je klíčovým faktorem pro jeho účinnost při dezinfekci a sterilizaci, protože při tomto procesu dochází k odstranění mikroorganismů a organických látek. K vytváření ozonu se využívá speciální zařízení tzv. ozonizér, ze kterého je ozon následně veden do prostředí fotobioreaktoru. [34] [18]

## 7. Návrh fotobioreaktoru

### 7.1. Volba tvaru

S ohledem na vyšší čistotu a požadavek relativně malého množství biomasy byl zvolen uzavřený FBR typu airlift složený z válcových trubek.

Fotobioreaktor bude sloužit pro pěstování spiruliny v domácím měřítku, proto vysoko objemové a otevřené kultivační systémy nejsou vhodné a byl zvolen uzavřený trubkový systém s vnitřním osvětlením a mícháním pomocí probublávajícího plynu. Návrh tvaru (Obr. 7-1) bere v potaz jednoduchost konstrukce, složené z dostupných dílů, požadavek na minimum „mrtvých“ prostorů, kde by se mohly usazovat buňky mikrořasy, maximální efektivitu spotřebované energie a jednoduché vypouštění média.



Obr. 7-1 Návrh tvaru fotobioreaktoru

Za předpokladu, že bioreaktor bude produkovat 0,4 g/l/d sušené biomasy a doporučená denní dávka se pohybuje kolem 5 g/d pro dospělého člověka [35], tak objem zvolený pro velikost FBR by se měl pohybovat kolem 12,5 l.

$$V_{FBR} = \frac{r}{p} = \frac{5}{0,4} = 12,5 \text{ l} \quad (7.1)$$

Kde:

$V_{FBR}$	požadovaný objem fotobioreaktoru	[l]
$r$	doporučená denní dávka	[g/d]
$p$	produkce	[g/l/d]

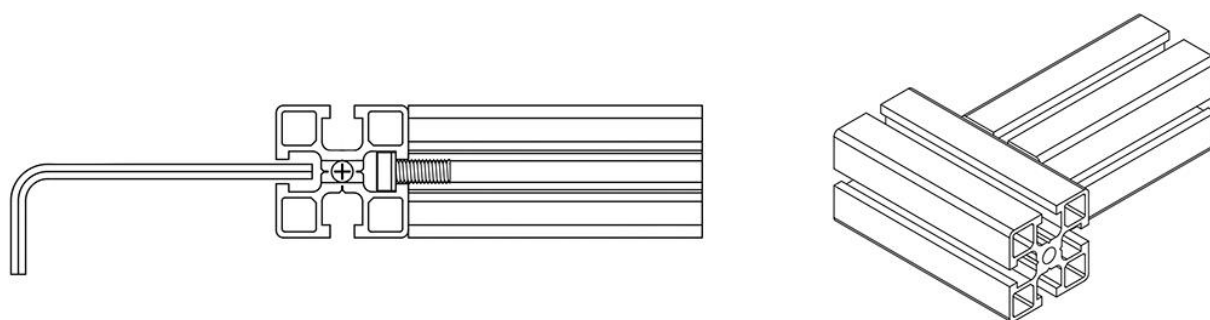
Průměr trubek pro FBR, ve kterých bude proudit médium je zvoleno dle experimentů s vnitřním osvětlením, kde se uvádí, že délka světelné dráhy v médiu se pohybuje kolem 35–55 mm [36]. Délka světelného paprsku bude dráha mezi vnitřní osvětlovací trubicí ( $d = 25 \text{ mm}$ ) a vnitřním povrchem vnější trubice. Jelikož v použitém médiu bude rovněž spousta bublin rozptylujících světelný paprsek, tak je vhodné zvolit nejmenší možný průměr vnější trubky dle katalogu výrobce

$D = 90$  mm [37]. Pro maximální využití světla by bylo možné zvolit větší průměr vnější trubky, to by ovšem navýšilo objem a velikost na větší rozměry, než je požadováno.

Spojení trubek je provedeno lepidlem od značky Tangit, lepidlo je vhodné pro lepení trubek z materiálu PVC-U, vyniká především dobrou chemickou odolností a vhodností pro potravinářské aplikace [38]. Pro očištění spojů od mastnot a naleptání povrchu byl použit čistič od stejného výrobce určený na tuto aplikaci.

## 7.2. Návrh rámu

Pro uložení trubek byl zhotoven rám z hliníkového profilu 40x40 mm, pospojovaný pomocí šroubových spojů (Obr. 7-2), jedná se o jednoduchý způsob spojení profilů, zajišťující kolmost v závislosti na řezu. Před spojením je potřeba provrtat díru do profilu na vložení klíče a do druhého vyřezat závit. K samotnému spojení byl využit šroub s imbusovou hlavou a podložka. [39]



Obr. 7-2 Spoj pomocí šroubů v drážce [39]

Samotný návrh rámu je na Obr. 7-3. Konstrukce byla navržena tak, aby bylo možné pod vypouštěcí kohout umístit nádobu na vypouštěné médium a zároveň připevnit k rámu kompresor a ostatní komponenty. Celý rám je z hliníkových profilů, které se vyznačují nízkou hmotností a možností jednoduché modifikace.



Obr. 7-3 Návrh rámu fotobioreaktoru

### 7.3. Volba vzduchování

K mixování a provzdušňování média bude sloužit kompresor, silikonové hadičky a keramické vzduchovací kameny. Pro nižší náklady a vyšší efektivitu byl zvolen systém který využívá provzdušňování zároveň pro míchání média (airlift systém). V reaktoru jsou dva vzduchovací kameny, které probublávají vertikální části reaktoru, přičemž průtok vzduchu do jednoho z nich bude značně nižší než do druhého, tím je zajištěno proudění média a zároveň tím lze upravit rychlost proudění média ve smyčce. Přizpůsobení nastavení zajišťují škrtící ventily.

#### Výpočet požadovaného průtoku plynu kompresorem:

Kompresor je volen v závislosti na požadovaném průtoku plynu, objemu reaktoru a maximálním výstupním tlaku (tedy hydrostatickém tlaku). Požadovaný průtok plynu pro kultivaci spiruliny autor zvolil  $0,5 \frac{l_{\text{plynu}}}{(l_{\text{média}} \cdot \text{min})}$ . Hydrostatický tlak při maximální výšce FBR 70 cm bude přibližně 0,007 MPa.

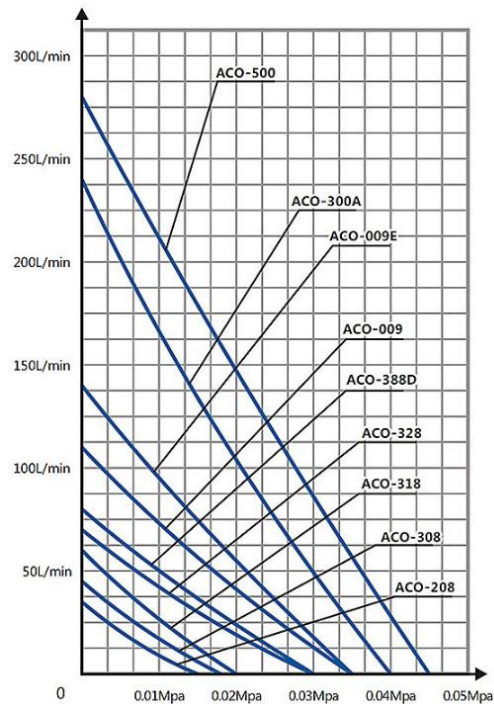
$$\dot{V}_{\text{plynu}} = k_p * V_{\text{FBR}} = 0,5 * 13 = 6,5 \frac{l_{\text{plynu}}}{\text{min}} = 389,4 \frac{l_{\text{plynu}}}{\text{hod}} \quad (7.2)$$

kde:

$\dot{V}_{\text{plynu}}$	objem přivedeného plynu	[l]
$k$	konstanta průtoku plynu	[-]

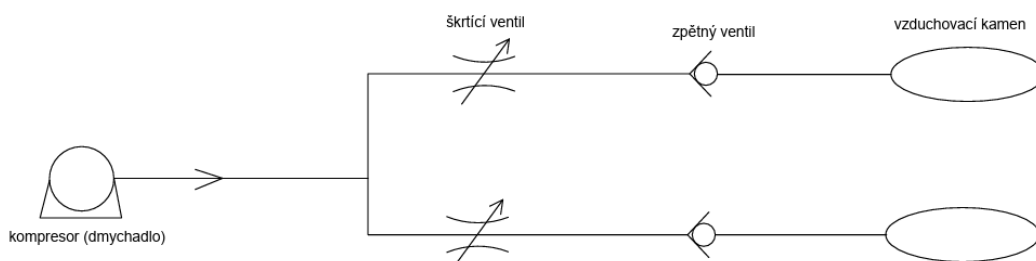
$V_{FBR}$                       objem fotobioreaktoru                      [l]

Vybraný byl kompresor pro vzduchování jezírek Hailea ACO 208 (Obr. 7-4). Jedná se o bezolejový, membránový, elektromagnetický kompresor. Dle schématu průtoku plynu v závislosti na tlaku je při zatížení hydrostatickým tlakem 0,07 MPa průtok přibližně 10 l/min, přebytečný vzduch bude využit na chlazení osvětlení nebo vypuštěn ven ze systému. Výhodou oproti jiným akvaristickým kompresorům je nízká pořizovací cena, odolnost vůči extrémním podmínkám a možnost napojení přívodu vzduchu do sání, to je důležité zejména v případě pozdějšího testování vzduchování plynu s vyšším obsahem oxidu uhličitého, než je ve vzduchu. [40]



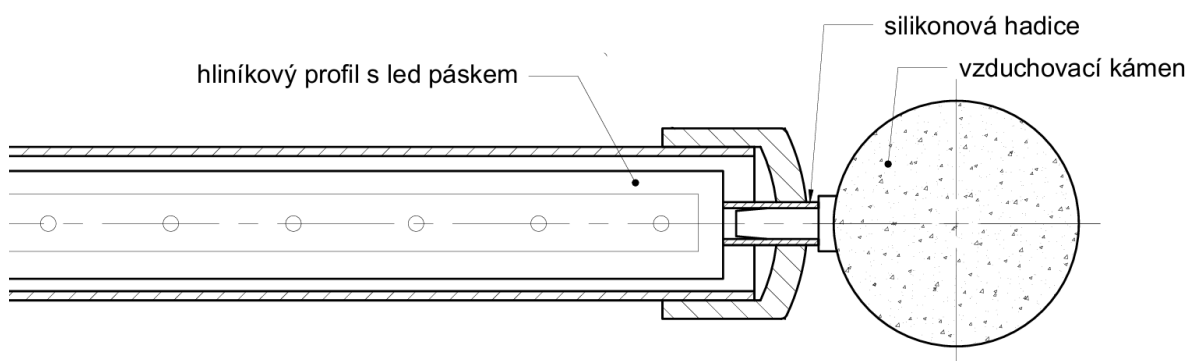
Obr. 7-4 Kompresor Hailea ACO 208, schéma výkonu kompresoru [49]

Mezi kompresor a vzduchovací hadičky je umístěn zpětný ventil, který bude chránit kompresor v případě výpadu proudu proti zaplavení. Průtok do jednotlivých vzduchovacích kamenů je v každém ramenu vzduchování ovládaný škrticími ventily, tím bude ovládaný i směr a rychlost proudění média. V průběhu kultivace bude nastaven poměr přiškrcení ventilů pro vhodnou rychlost oběhu média a dostatečné promíchání obou sloupců. Schéma na Obr. 7-5. V případě pění média, popřípadě usazování mikrořas, je také možné škrticími ventily ovládat směr, kterým médium proudí v systému.



Obr. 7-5 schéma zapojení vzduchování

Pro zajištění dostatečně malých bublin jsou na konci vzduchového rozvodu vzduchovací kameny (Obr. 7-6). Vzduchovací kameny jsou zavěšeny pod osvětlovacími trubicemi. Vybrány byly keramické kameny ve tvaru koule o průměru 25 mm a 40 mm, pro prvotní kultivaci autor zvolil kameny o průměru 40 mm. Kameny jsou usazeny v silikonových hadicích, které dopravují plyn trubicemi a zároveň slouží pro utěsnění trubic. Kameny jsou vloženy do hadic s přesahem, aby byla vyvinuta dostatečná síla na těsnící hadici. Jelikož jsou v hadicích pouze vsunuty, tak je lze jednoduše vyjmout za účelem vyčištění, popřípadě výměny. Schéma sestavení je na Obr. 7-6.



Obr. 7-6 Osvětlovací trubice se vzduchovacím kamenem

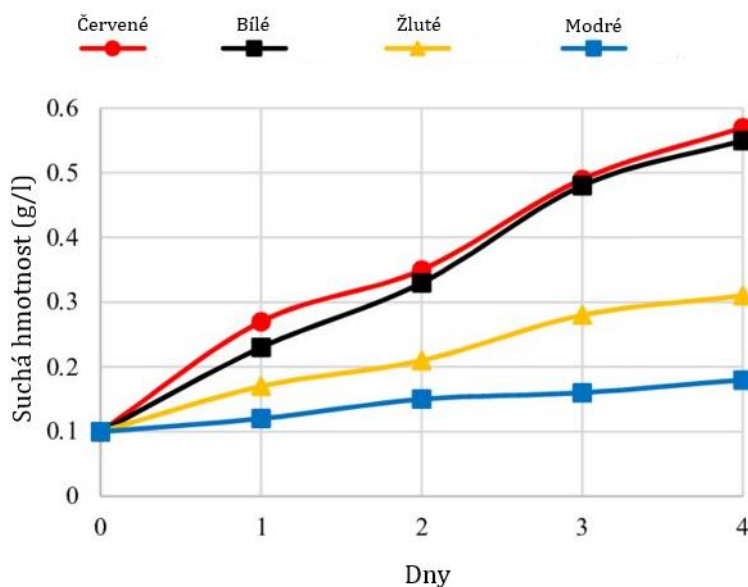
#### 7.4. Návrh osvětlení

Pro vyšší efektivitu spotřebované energie na osvětlení byly zvoleny LED pásy, umístěné uvnitř FBR. Osvětlení se skládá z trubky, hliníkového profilu a LED pásků (Obr. 7-7). LED pásy budou nalepeny na hliníkovém profilu pro zajištění odvodu tepla a celý systém bude oddělen od média trubicí. Zároveň osvětlovací trubice slouží k dovedení vzduchování do média. Uvnitř trojúhelníkového profilu je vedena hadice se stlačeným plynem pro provzdušňování až na konec trubice, kde je vzduchovací kámen.



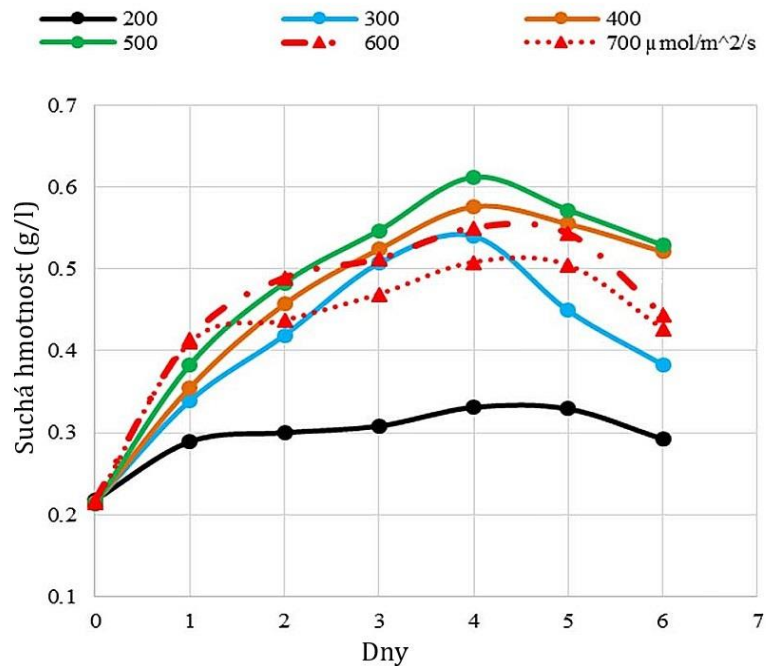
Obr. 7-7 Osvětlovací trubice před složením

Pro největší růst spiruliny bylo experimentálně zjištěno že se vyplatí používat červené (660 nm) a bílé světlo (Obr. 7-8) [41]. Použité spektrum ovlivňuje nejen přírůstek biomasy, ale také její složení [42]. Byly zvoleny bílé LED pásky. Při bílém světle má biomasa největší obsah proteinů, zároveň vyvážený obsah ostatních látek, protože nejlépe nahrazuje denní světlo [42].



Obr. 7-8 Přírůstek biomasy v závislosti na čase pro různé barvy osvětlení [41]

Na Obr. 7-9 jsou vidět přírůstky biomasy při různých intenzitách osvětlení, při intenzitě  $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  je přírůstek nejnižší, naopak při intenzitě  $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  je přírůstek nejvyšší, proto při navrhování osvětlení bylo navrženo maximální  $PPFD$   $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Z ekonomického hlediska by se intenzita měla pohybovat v rozmezí  $300\text{-}400 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . [41]



Obr. 7-9 Přírůstky biomasy pro různé intenzity osvětlení [41]

**Výpočet osvětlené plochy (S):**

Jelikož použité LED pásy mají úhel osvětlení 120° a jsou nalepeny na trojúhelníkovém profilu, tak pro zjednodušení výpočtu je uvažován dokonale rovnostranný trojúhelník a nepřekrývání paprsků světla z okolních pásků.

Osvětlená plocha média je spočítána jako vnější plocha osvětlovací trubice.

$$S = \pi dl = \pi * 0,025 * 0,5 = 0,03927 \text{ m}^2 \tag{7.3}$$

Kde:

- $d$  Průměr osvětlovací trubice [m]
- $l$  Návrhová délka části osvětlené trubice [m]

Osvětlená plocha jedné trubice je 0,3927 m<sup>2</sup>

**Výpočet světelného toku (Φ<sub>W</sub>):**

$$\Phi_W = n * \Phi_{Wm} * l = 3 * 770 * 0,5 = 1155 \text{ lm} \tag{7.4}$$

Kde:

- $n$  Počet pásků v jedné trubici
- $\Phi_{Wm}$  Metrický světelný tok LED pásu zadaný výrobcem [lm/m]
- $l$  Návrhová délka části osvětlené trubice [m]

**Výpočet intenzity osvětlení (E<sub>W</sub>):**

$$E_W = \frac{\Phi_W}{S} = \frac{1155}{0,03927} = 29412 \text{ lux} \tag{7.5}$$



Jelikož pro kutivační účely je zapotřebí PAR světlo, tak je potřeba převést intenzitu osvětlení z luxu na mikromoly na metr čtvereční za sekundu, tím získáme požadované *PPFD*. K převodu byl použit [online převodník jednotek osvětelní pro rostliny](#) [43]. Po převodu je výsledné  $PPFD = 524 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ .

Vybrané LED pásy mají požadované vstupní napětí 12 V a dosahují výkonu 9,6 W/m. Teplota světla je denní bílá (4500 K) a maximální světelný tok je 770 lm/m. Před nalepením pásků na hliníkový profil bylo nutné pásek nakrátit na 60 cm dlouhé kousky a ty navzájem propojit připájením kabelu (Obr. 7-10), celé schéma zapojení pásků je na Obr. 7-14.



Obr. 7-10 Spájené LED pásy

### Výpočet výkonu zdroje ( $P$ )

LED pásy je potřeba napojit na 12V stejnosměrný zdroj napětí. Výkon zdroje je dle doporučení výrobce o 30 % větší, než potřebný vypočítaný výkon z délky LED pásků.

$$P = 1,3 * 2 * n * l_r * P_m = 1,3 * 2 * 3 * 0,6 * 9,6 = 44,9 \text{ W} \quad (7.6)$$

Kde:  $k$  Bezpečnostní součinitel (zadaný výrobcem)

$n$  Počet pásků v jedné trubici

$l_r$  Reálná délka jednoho pásku [m]

$P_m$  Metrický výkon pásku [W/m]

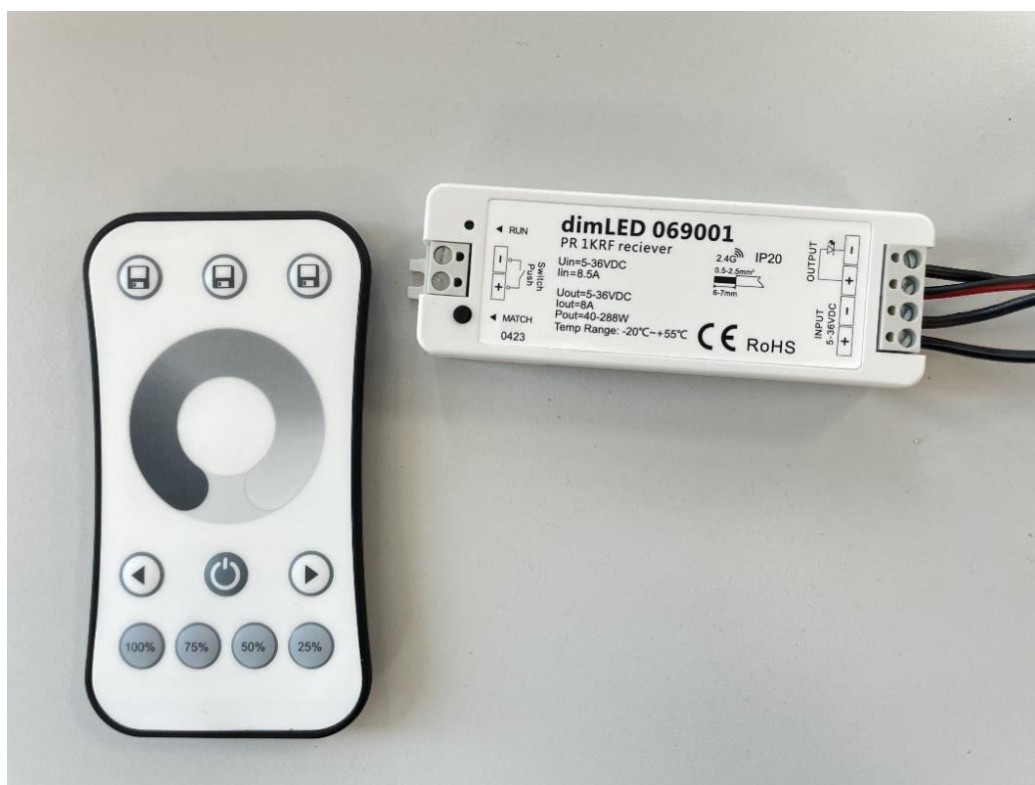
Minimální potřebný výkon zdroje je 44,9 W.

Zvolen byl elektronicky spínaný zdroj o výkonu 50 W. Zvolený zdroj převádí napětí ze sítě 230 V AC na napětí 12 V DC. Zdroj je opatřen tepelnou pojistkou, pojistkou proti přetížení a pojistkou proti zkratu a také vyniká krytím IP67 (voděodolnost). Zvolený zdroj je na Obr. 7-11.



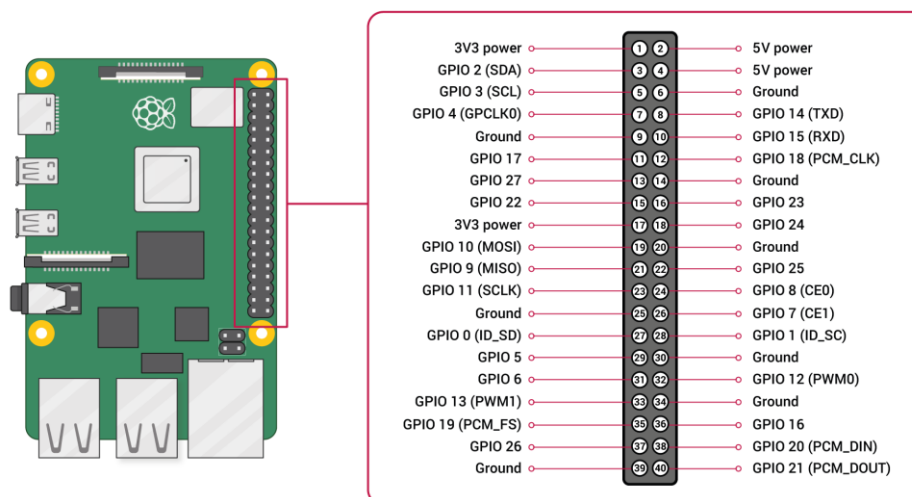
Obr. 7-11 Zdroj na napájení LED

Pro ovládání osvětlení slouží radiofrekvenční přímač DimLED a dálkový ovladač (Obr. 7-12). Jelikož jsou zde pouze jednobarevné LED, tak přímač slouží pouze na ovládání intenzity osvětlení. Přímač komunikuje s ovladačem na přenosové frekvenci 2,4 GHz, s dosahem 30 m. Maximální proudové zatížení přímače je 96 W při 12 V, což je dostačující pro zvolené využití. Na dálkovém ovladači je možné kontinuálně měnit intenzitu osvětlení, popřípadě nastavit procentuální intenzitu osvětlení na stupnici jdoucí po 25 %.



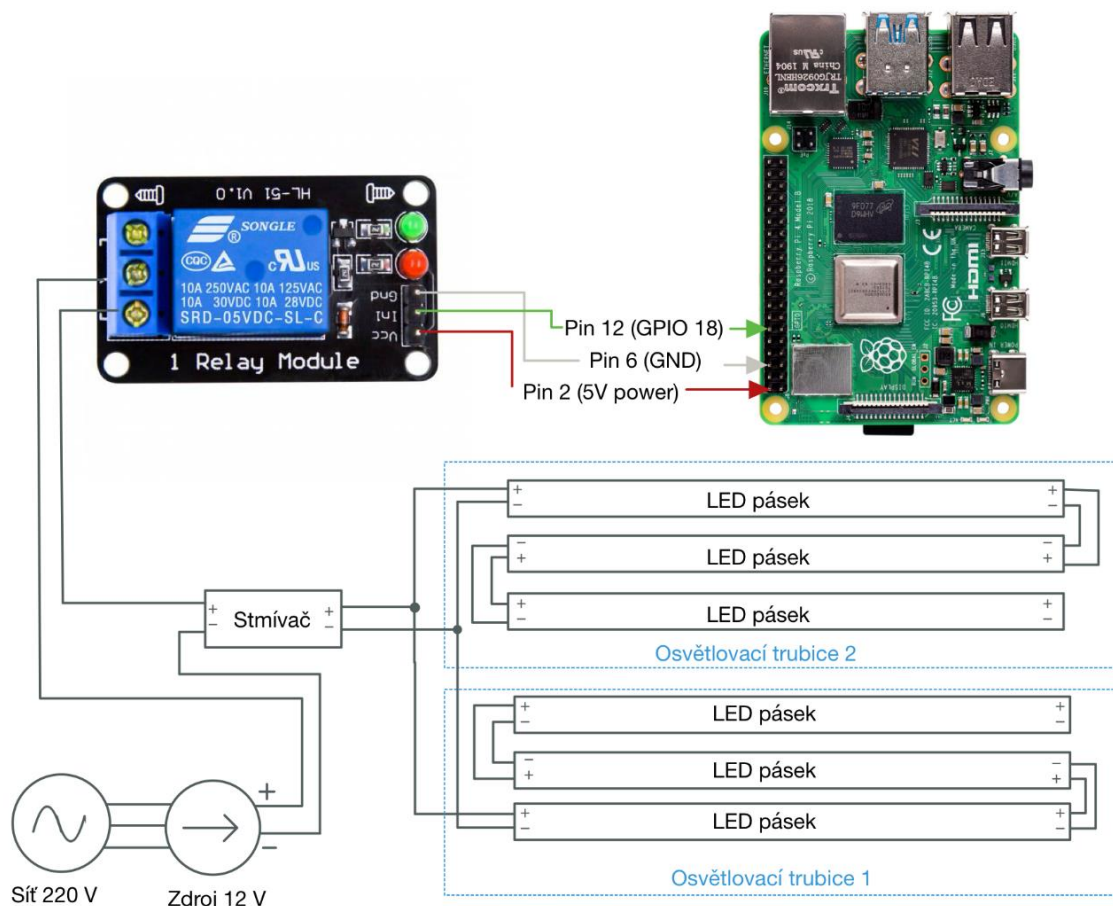
Obr. 7-12 Ovladač s přijímačem

Pro nastavení periody osvětlení a měření teploty bylo naprogramováno jednoduché zařízení skládající se z mikropočítače Raspberry Pi 4 B, relé a teplotní sondy (Obr. 7-13). Mikropočítač Raspberry byl vybrán z důvodu snadného připojení zařízení k internetu pomocí WiFi/Ethernetu, možnosti jednoduchého připojení teplotních sond a relé na GPIO porty, možnosti připojení obrazovky pomocí HDMI, malé velikosti a nízké pořizovací ceně. Zařízení běží na vlastním operačním systému, zvaném Raspbian, jež je volně dostupný a není tedy potřeba dalšího zařízení pro jeho ovládání.



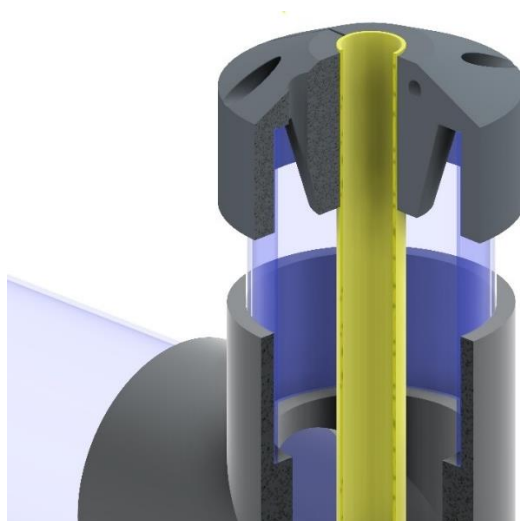
Obr. 7-13 Schéma GPIO pinů mikropočítače Raspberry Pi 4 model B [50]

Před samotným programováním bylo nutné na zařízení stáhnout operační systém. K tomu slouží instalační program Raspberry Pi Imager volně dostupný jak pro operační systém Windows, tak i pro macOS. Po nainstalování operačního systému na mikropočítač bylo v programovacím jazyce Python naprogramováno ovládání relé společně s tepelnými sondami, připojené na mikropočítač. Relé je naprogramováno na zapínání a vypínání v nekonečné smyčce na vhodné časové intervaly. Zvolen byl 1-kanálový relé modul 5V s maximálním spínaným napětím 250 V střídavého proudu s proudem 10 A. Relé je také vybaveno LED diodami pro signalizaci stavu sepnutí. Schéma zapojení relé je na Obr. 7-14.



Obr. 7-14 Schéma zapojení osvětlení

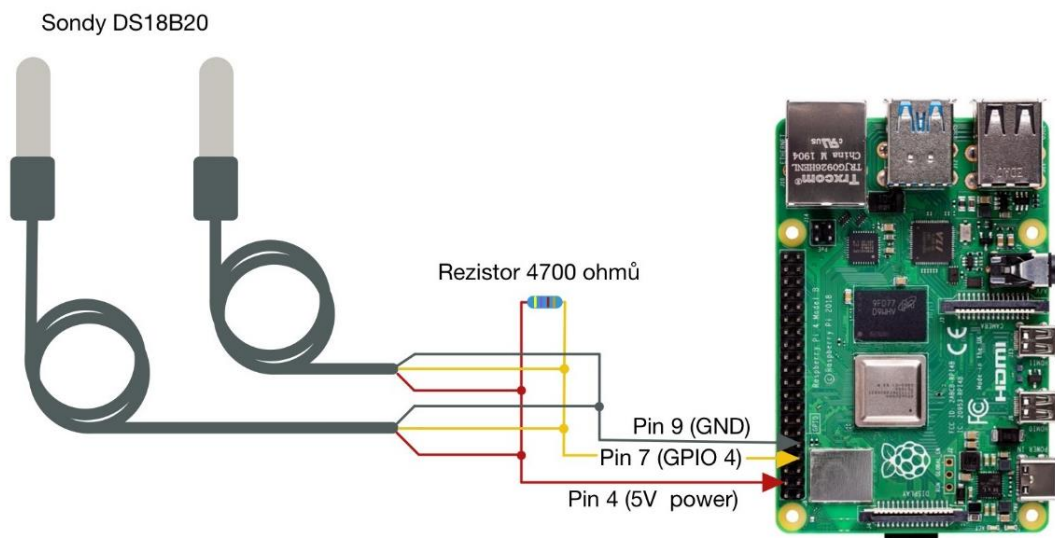
Osvětlovací trubice kotví na místě rozebíratelná spojka (Obr. 7-15), která spojuje osvětlovací trubice s vnější trubkou fotobioreaktoru. Spojky se skládají ze dvou polovin, vytištěných z materiálu PETG na 3D tiskárně a dvou šroubů M6 x 30, jež poloviny přitahují k sobě. Pro odvod plynu má spojka průchozí díru na vložení hadice o průměru 10 mm.



Obr. 7-15 Spojka přidržující osvětlovací trubici

### 7.5. Snímání teploty

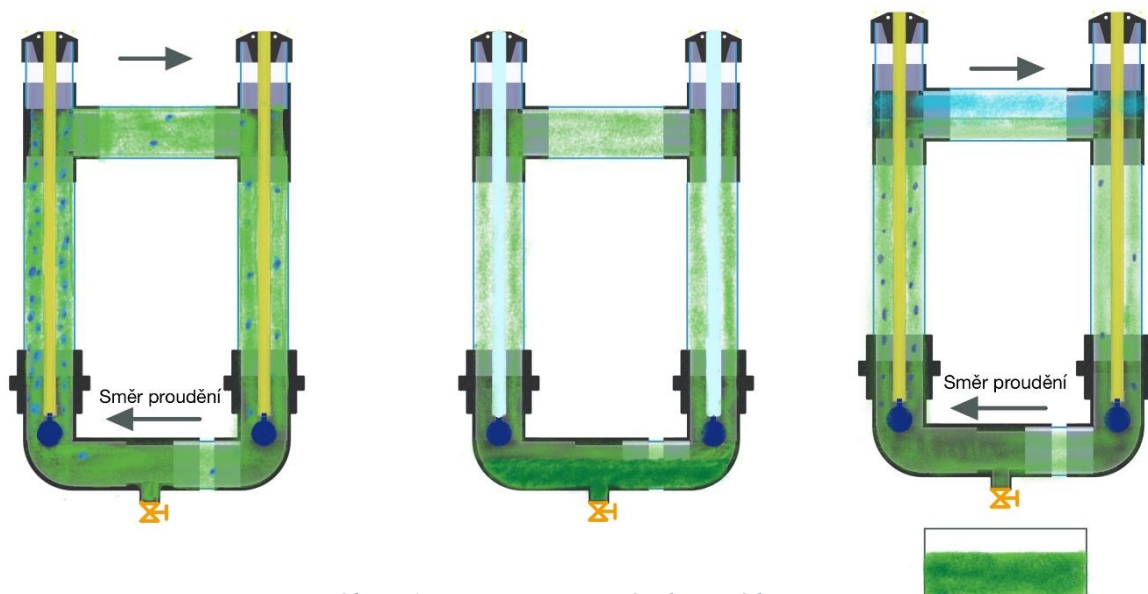
Pomocí mikropočítače je také zaznamenávána teplota kultivačního média a okolí. Pro snímání teploty byla zvolena voděodolná sonda DS18B20. Sonda disponuje přesností měření  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  v rozsahu teplot  $-10$  až  $+85^{\circ}\text{C}$  [44]. K čidlu je potřeba připojit odpor o velikosti 4700 ohmů. Schéma zapojení je na Obr. 7-16. Mikropočítač je naprogramovaný na snímání teploty každých 20 minut a následně zapsání teploty do tabulky v paměti zařízení společně se stavem sepnutí relé na osvětlení. Celý program ovládající relé i sondy je nastaven, aby automaticky po spuštění zařízení pokračoval a nebylo tedy nutné ho manuálně zapínat.



Obr. 7-16 Schéma zapojení teplotních sond DS18B20 do mikropočítače Raspberry Pi 4 B

### 7.6. Vypouštění biomasy

Vypouštění biomasy je provedeno pomocí kohoutu na dně reaktoru. Pro efektivitu sklizně je nejdříve vypnuto vzduchování, v krátkém časovém intervalu mikrořasa sedimentuje na dně a pomocí kohoutu je odpuštěna pouze zahuštěná biomasa s minimem kultivačního média.



Obr. 7-17 Postup vypouštění zahuštěné biomasy

Zbylé kultivační médium zůstane v reaktoru a po zapnutí vzduchování, doplnění média a živin kultivace začíná od začátku. Díky tomuto postupu jsou minimalizovány náklady na médium a následné zpracování biomasy. Postup je znázorněn na Obr. 7-17.

Celý design tvaru je tvořený tak, aby docházelo k obíhání média v reaktoru jak je znázorněno na Obr. 7-17. Díky tomu je docíleno nejen lepší promíchání média, ale také střídání temných a světlých zón, kterými buňky prochází. Tímto se vytváří tzv. efekt blikajícího světla, který je popsán v kapitole 6.3 Osvětlení. Směr proudění lze ovládat škrtkovými ventily ve vzduchovacím rozvodu.

## 7.7. Možnosti optimalizace

Tato kapitola obsahuje návrh na další optimalizaci systému a budoucí možnosti úprav a rozšíření. Jelikož se tato práce zabývá pouze návrhem fotobioreaktoru, tak přidání dalších prvků by vyžadovalo pochopení a znalost témat, kterým nebylo možné se věnovat. Ačkoli kultivace v systému probíhá téměř automaticky, tak je možné přidat další prvky pro jednodušší provoz, rozšířit objem dle požadavků zákazníka, sledovat biologickou aktivitu mikrořas, či minimalizovat výrobní náklady.

### Sklízení

V rámci další práce je možné vyměnit manuální kohout za elektromagnetický, který by měl za úkol sklízení média. Kohout by byl naprogramován společně s vzduchováním, aby docházelo ke sklízení, jak je popsáno v předchozí kapitole. Sklízecí systém je možné naprogramovat na sklízení po určitých časových intervalech, ale vhodnější variantou by bylo osadit systém LED diodou a senzorem osvětlení pro snímání zákalu a v návaznosti na toto sklízet biomasu. Zároveň by se dále dalo pracovat s hodnotami z měření zákalu a zkoumat například různé druhy a intenzity osvětlení v závislosti na rychlosti růstu.

### Senzory

Do systému je také možné nainstalovat pH senzor, senzor rozpuštěného kyslíku či oxidu uhličitého, které budou snímat podmínky v systému.

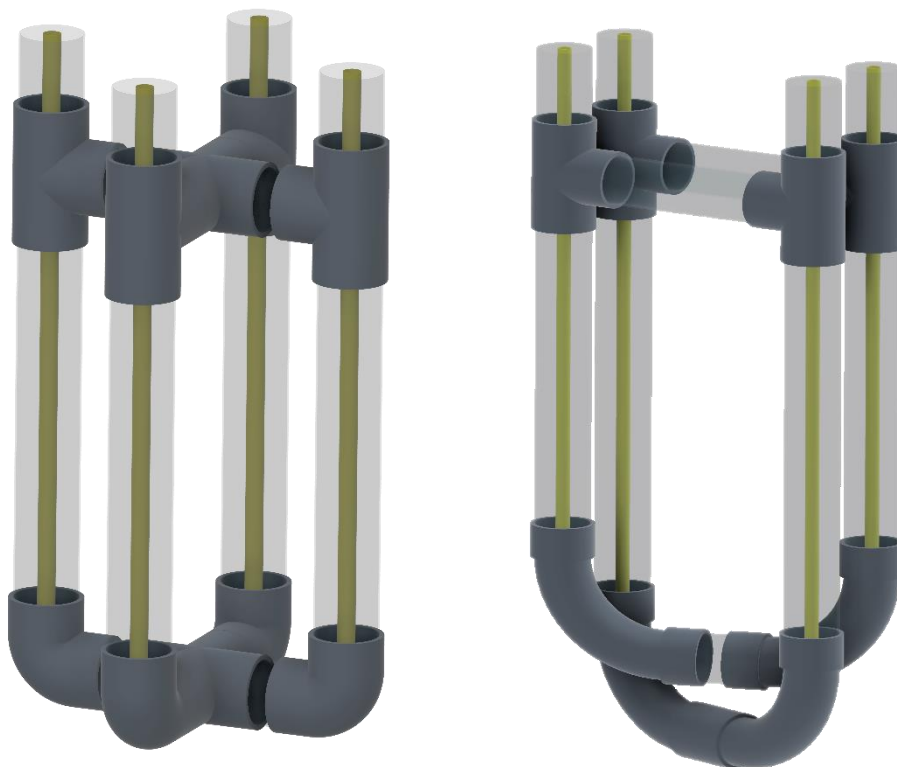
### Ovládání světla

Ovládání intenzity osvětlení v FBR je řešeno pomocí manuálního ovladače. Do budoucna za účelem snížení provozních nákladů by také bylo možné využití snímače intenzity vnějšího osvětlení a v návaznosti na to ovládat intenzitu osvětlení vnitřních LED diod. Toto by ušetřilo náklady na provoz zejména pokud by FBR byl umístěn na slunném místě.

### Optimalizace objemu

Rychlost růstu mikrořas v systému je ovlivněna mnohými proměnnými, a proto nelze přesně určit potřebný objem FBR na vyprodukování přesné dávky biomasy. Objem systému je možné změnit při stavbě nového systému například změnou délky vertikálních trubek, ale také změnou průměru trubek reaktoru. Při změně průměru za účelem zvětšení objemu dojde k optimálnějšímu využití světla v reaktoru, ovšem toto platí jen do určitého objemu, protože může dojít k vzájemnému stínění si buňkami a vzniku temných zón. Při změně průměru trubek za účelem snížení objemu FBR, by bylo vhodné využít vnější osvětlení, protože světelná dráha při vnitřním osvětlení by se snížila do bodu, kdy by využití světla nebylo nejefektivnější.

Za účelem značného navýšení objemu, na které nedostačuje úprava rozměrů lze využít složitější konstrukci. Ideový návrh takovéto konstrukce je na Obr. 7-18. Touto úpravou tvaru systému je možné se dostat na více než dvojnásobek původního objemu (možnost vlevo), možností vpravo je možné, přidáním více smyček, se dostat ještě na poněkud větší objem, ovšem při potřebě vyššího objemu je vhodné zvážit zvolení jiného systému.



Obr. 7-18 Návrhy tvarů FBR za účelem navýšení objemu

### Možnosti dalšího využití

Sestavený FBR je možné využít nadále na již zmíněnou produkci spiruliny za účelem konzumace, ale také například na další práce, zaměřené na čištění nízkotlakých spalin, připojených na sání kompresoru, výzkumem zaměřeným na rychlost růstu při různých intenzitách, popř. vlnových délkách osvětlení.

## 8. Ekonomické zhodnocení

Celé zařízení bylo postaveno a zprovozněno (Obr. 8-1), lze tedy určit náklady na výrobu. Nejdražší položkou v materiálovém seznamu činily trubky a armatury. Jelikož se jedná o transparentní trubky o velkém průměru, které jsou vhodné pro potravinářskou aplikaci, tak tomu odpovídá i cena, která činí téměř polovinu celkové ceny (44,5 %). Při požadavku na snížení nákladů by bylo možné odstranit spojky, které jsou v systému umístěny zejména z důvodu zjednodušení čištění, ovšem jedná se o nákladnou položku a díky jednoduchému tvaru FBR je možné čištění i bez rozpojení spojek. Odebráním spojek by se snížily náklady na výrobu o 8 %. Také by bylo možné využít trubky s menší tloušťkou stěny, které nebyly dostupné u dodavatele v době stavby FBR, z toho důvodu byly použity trubky s větší tloušťkou stěny, které jsou mírně dražší.



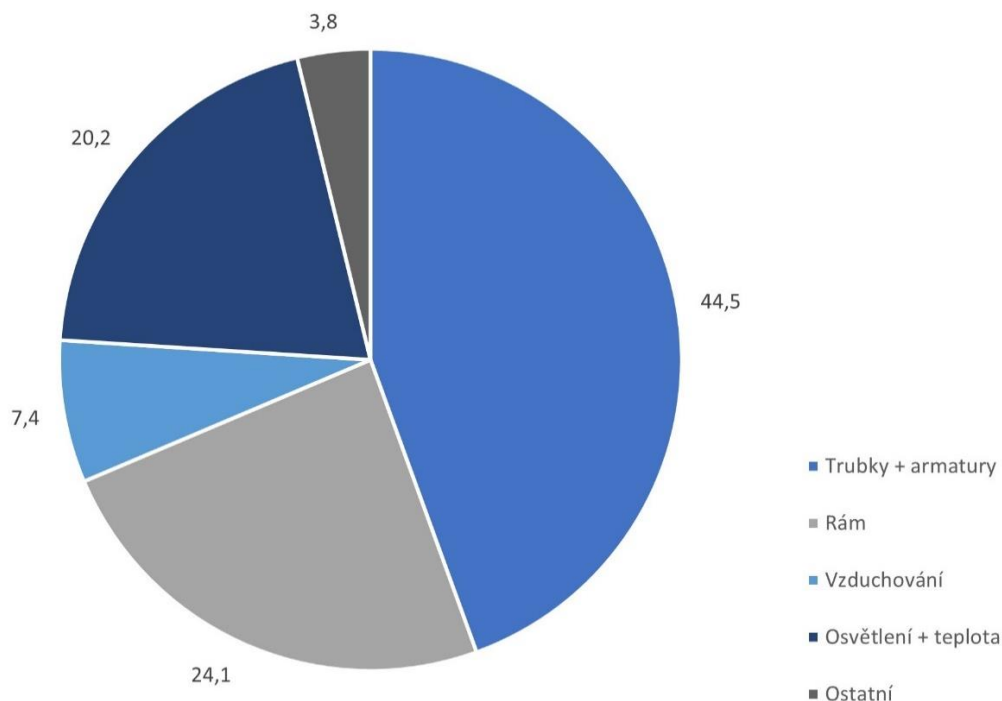
Obr. 8-1 Navržený fotobioreaktor

Další nákladnou položkou je rám, na kterém je FBR ukotven. Cena tvoří 24 % z celkových nákladů na stavbu, je tomu z důvodu použití hliníkových profilů. Byly vybrány díky své snadné modifikovatelnosti a jednoduché sestavitelnosti, nicméně i zde by bylo možné snížit náklady zjednodušením rámové konstrukce, popřípadě využitím ocelové konstrukce namísto hliníkové, za cenu snížení možnosti modifikovatelnosti a zvýšení hmotnosti. Další možností by bylo využití dřevěného rámu, díky kterému by FBR budil více ekologický dojem.

Podobně nákladná položka (20 % z celkových nákladů) je osvětlení. Do této kategorie jsou započítány i teplotní sondy a mikropočítač, který tvoří 50 % nákladů této kategorie. Za účelem snížení nákladů by bylo možné využít cenově dostupnější řídicí systém, např.: Arduino. Zvolený mikropočítač Raspberry Pi byl dostupný z předchozího projektu, jeho použitím, tak bylo dosaženo efektivního využití dostupných zdrojů a urychlení procesu vývoje.

Vzduchování a ostatní položky jsou nejméně nákladné, tvoří pouze pár procent z celkových nákladů. Graf rozložení nákladů je na Obr. 8-2.



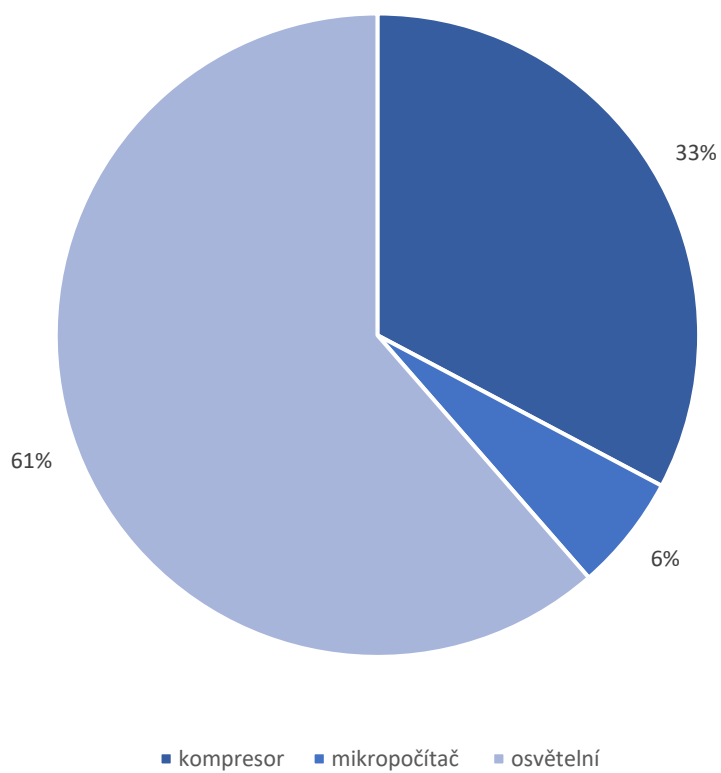


Obr. 8-2 Procentuální vyjádření výrobních nákladů

Výrobní náklady se pohybují v řádu nižších desítek tisíc, což je v porovnání s komerčně dostupnými systémy několikanásobně levnější. Ovšem výrobní náklady jsou pouze náklady na materiál, není v nich promítnuta odvedená práce na sestavení, naprogramování a zprovoznění. Pokud by tomu tak bylo, tak se celková cena za zkompletovaný systém výrazně navýší. Ačkoli je pořizovací cena systému nižší oproti dostupným variantám, tak pořízení tohoto systému může být překážkou pro mnoho spotřebitelů a je potřeba výrazné snížení nákladů.

Dalším finančním výdajem je provoz systému. V nákladech na provoz je započteno kultivační médium a energie spotřebované na samotný provoz. Cena startovací kultury je jednorázový náklad, z toho důvodu ji nezapočítávám do provozních nákladů. Při výběru kultivačního média je možnost zakoupení vysušené předpřipravené směsi sloučenin, kterou stačí pouze naředit destilovanou vodou [44]. Při uvažování této varianty se pohybuje cena za směs kolem 20 Kč/l [45]. Další možností je zakoupit jednotlivé sloučeniny a kultivační médium si namíchat. Při této variantě je nutné brát v potaz, že sloučeniny jsou dostupné v 0,5 až 1 kg balení. Pro namíchání byl využit recept [46]. Při použití vlastní směsi se docílí snížení nákladů oproti kupované o 75 %. Směs prvků je potřeba naředit destilovanou vodou, pro kterou se cena za litr pohybuje kolem 30 Kč. Náklady na vlastní kultivační médium potřebné na jedno naplnění FBR pohybuje kolem 60 Kč za směs prvků a 370 Kč za destilovanou vodu.

Z energetického hlediska je nejvíce energie spotřebováno na osvětlení, při maximálním výkonu LED pásků a periody 16:8 (světlo tma) je denní spotřeba 61 % z celkové spotřeby. Kompresor zajišťuje míchání a z toho důvodu musí běžet nepřetržitě. Cena provozu kompresoru pokrývá pouze 33 % nákladů z celkové spotřeby. Díky promíchávání pomocí vzduchu hnaného kompresorem odpadá nutnost využití čerpadla, a je tak ušetřeno značné množství energie. Celková odhadovaná spotřeba je 1,2 kW/h za den (427,9 kW/h za rok), procentuální vyobrazení jednotlivých položek je na Obr. 8-3.



Obr. 8-3 Procentuální vyjádření energetických nákladů

## Závěr

Tato práce je zaměřena na výzkum a návrh fotobioreaktoru pro domácí kultivaci spiruliny s cílem poskytnout ekonomicky dostupné řešení produkce čerstvé mikrořasy pro konzumní účely.

V úvodní části se autor zabývá literární rešerší vlastností mikrořas, se zaměřením na rod *Arthrospira*, známý jako spirulina. Díky svému vysokému obsahu bílkovin, esenciálních mastných kyselin, minerálů a antioxidantů představuje spirulina významný potravinový doplněk s širokým spektrem využití, sahající od doplňků stravy po biopaliva a čištění odpadních vod. V práci jsou také popsány možnosti kultivace a sklizně, čímž byl položen základ pro další část práce, zaměřenou na návrh zařízení.

Hlavní přínos této práce je návrh a sestavení fotobioreaktoru pro domácí kultivaci s účelem dosáhnout co nejvyšší kvality mikrořasy určené pro konzumaci. Při návrhu autor zohlednil technické aspekty jako je jednoduchost tvaru, nezávadnost použitých materiálů, efektivita osvětlení a využití provzdušňování k míchání. Pro ovládání osvětlení a zaznamenávání teploty v systému a okolí byl využit mikropočítač Raspberry Pi, který umožňuje automatizaci těchto procesů a dává možnost k automatizaci případných dalších parametrů při optimalizaci systému v budoucnu.

Navržený fotobioreaktor je možné rozebrat na dvě části pomocí šroubovacích spojek, což usnadňuje čištění zařízení. K snadnější údržbě rovněž přispívá možnost jednoduchého vyjmutí a rozložení osvětlovacích trubíc a vzduchovacích kamenů. Kohout na dně reaktoru umožňuje sklízení zahuštěné biomasy spiruliny, čímž se šetří nutriční médium a zvyšuje se efektivita celého procesu. Po sestavení bylo provedeno testování systému pro ověření těsnosti spojů a dobré cirkulace média.

Ačkoli se podařilo navrhnout zařízení, které je značně levnější, než komerčně dostupné systémy, tak ekonomická analýza ukázala, že pořizovací náklady na toto zařízení jsou stále vysoké a představují významnou překážku pro pořízení tohoto systému běžnými spotřebiteli. Závěry této práce naznačují, že ačkoli domácí produkce spiruliny v navrženém fotobioreaktoru má potenciál, je zapotřebí další optimalizace za účelem snížení výrobních nákladů. Tato optimalizace by mohla zahrnovat využití levnějších materiálů, komponent a přizpůsobení velikosti. Objem fotobioreaktoru je odhadnut tak, aby pokryl denní spotřebu spiruliny jednoho dospělého člověka, ovšem autor očekává značně vyšší výnos systému, který spotřebu pokryje několikanásobně. V takovém případě se značně zkrátí návratnost.

Přestože se ukázaly výzvy spojené s ekonomickou stránkou projektu, tak práce vede k lepšímu porozumění problémů spojených s návrhem kultivačních zařízení. Sestrojený fotobioreaktor může sloužit jako základní systém pro další výzkum a vývoj v oblasti kultivace mikrořas.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MASOJÍDEK, J.; LHOTSKÝ, R.; KOPECKÝ, J. a PRÁŠIL, O. *Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce*. Věda kolem nás, 11987. Středisko společných činností AV ČR, 2016. ISSN 2464-6245. Dostupné také z: <http://www.vedakolemnas.cz/vyzvy-a-otazky/160427-mikrorasy-solarni-tovarna-v-jedne-bunce.html>. [cit. 2023-11-28]
- [2] BĚLOHLAV, V.; JIROUT, T. a KRÁTKÝ, L. Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku. Online. *Chemické listy*. 2018, roč. 112, č. 3, s. 183-190. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3030>. [cit. 2023-11-28].
- [3] F.G. ACIÉN; E. MOLINA; A. REIS; G. TORZILLO; G.C. ZITTELLI et al., GONZALEZ-FERNANDEZ, Cristina a MUÑOZ, Raúl (ed.). *Photobioreactors for the production of microalgae*. Online. In: *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*. Licence: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7>. Woodhead Publishing, 2018, s. 1-44. ISBN 9780081010235. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101023-5.00001-7>. [cit. 2023-11-28].
- [4] MOBIN, Saleh a ALAM, Firoz. Some Promising Microalgal Species for Commercial Applications: A review. Online. *Energy Procedia*. 2017, roč. 110, s. 510-517. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.177>. [cit. 2024-04-19].
- [5] RICHMOND, Amos (ed.). *Handbook of Microalgal Culture*. Online. Blackwell Publishing, 2003. ISBN 9780632059539. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9780470995280>. [cit. 2023-12-19].
- [6] CIFERRI, O. Spirulina, the edible microorganism. Online. *Microbiological Reviews*. 1983, roč. 47, č. 4, s. 551-578. ISSN 0146-0749. Dostupné z: <https://doi.org/10.1128/mr.47.4.551-578.1983>. [cit. 2023-12-25].
- [7] SONI, Ruma Arora; SUDHAKAR, K.; RANA, R. S. a BAREDAR, P. Food Supplements Formulated with Spirulina. Online. In: MANDOTRA, Sachin Kumar; UPADHYAY, Atul Kumar a AHLUWALIA, Amrik Singh (ed.). *Algae*. Singapore: Springer Singapore, 2021, s. 201-226. ISBN 978-981-15-7517-4. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7518-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7518-1_9). [cit. 2024-04-10].
- [8] LUCÁKOVÁ, Simona a BRÁNYIKOVÁ, Irena. *Kultivace spiruliny pro lidskou výživu*. Online. Akademie věd ČR. 2022. Dostupné z: <https://vodaav21.cz/2023/02/07/kultivace-spiruliny-pro-lidskou-vyzivu/>. [cit. 2024-05-04].
- [9] KARKOS, P. D.; LEONG, S. C.; KARKOS, C. D.; SIVAJI, N. a ASSIMAKOPOULOS, D. A. Spirulina in Clinical Practice: Evidence-Based Human Applications. Online. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2011, roč. 2011, s. 1-4. ISSN 1741-427X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/ecam/nen058>. [cit. 2023-12-27].
- [10] LAFARGA, Tomas; FERNÁNDEZ-SEVILLA, José María; GONZÁLEZ-LÓPEZ, Cynthia a ACIÉN-FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel. Spirulina for the food and

- functional food industries. Online. *Food Research International*. 2020, roč. 137. ISSN 09639969. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356>. [cit. 2024-03-24].
- [11] LUCÁKOVÁ, Simona a BRÁNYIKOVÁ, Irena. *Recepty z čerstvé spirulíny*. Online. Akademie věd ČR. 2022. Dostupné z: <https://vodaav21.cz/wp-content/uploads/2023/02/Recepty-z-cerstve-spiruliny-E-book.pdf>. [cit. 2024-05-04].
- [12] ALTMANN, Brianne A. a ROSENAU, Simon. Spirulina as Animal Feed: Opportunities and Challenges. Online. *Foods*. 2022, roč. 11, č. 7. ISSN 2304-8158. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/foods11070965>. [cit. 2024-03-24].
- [13] NAKAMOTO, Monica Masako; ASSIS, Marcelo; DE OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves a BRAGA, Anna Rafaela Cavalcante. Spirulina application in food packaging: Gaps of knowledge and future trends. Online. *Trends in Food Science & Technology*. 2023, roč. 133, s. 138-147. ISSN 09242244. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.001>. [cit. 2024-04-10].
- [14] SINGH, Uday Bhan a AHLUWALIA, A. S. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. Online. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2013, roč. 18, č. 1, s. 73-95. ISSN 1381-2386. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9393-3>. [cit. 2024-03-29].
- [15] LIM, Hooi Ren; KHOO, Kuan Shiong; CHEW, Kit Wayne; CHANG, Chih-Kai; MUNAWAROH, Heli Siti Halimatul et al. Perspective of Spirulina culture with wastewater into a sustainable circular bioeconomy. Online. *Environmental Pollution*. 2021, roč. 284. ISSN 02697491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117492>. [cit. 2024-03-26].
- [16] ABDO, Sayeda M.; ABO EL-ENIN, S.A.; EL-KHATIB, K.M.; EL-GALAD, M.I.; WAHBA, S.Z. et al. Preliminary economic assessment of biofuel production from microalgae. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, roč. 55, s. 1147-1153. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.119>. [cit. 2024-03-29].
- [17] VERBYLA, Matthew E.; VON SPERLING, Marcos; MAIGA, Ynoussa; MIHELICIC, James R.; ROSE, Joan B. et al. Waste Stabilization Ponds. Online. In: *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*. Michigan State University, 2019. ISBN 9780996725286. Dostupné z: <https://doi.org/10.14321/waterpathogens.65>. [cit. 2024-05-23].
- [18] ŠURÁŇ, Michal. *Návrh a testování horizontálního fotobioreaktoru*. Online, Diplomová práce, vedoucí Pavel Lošák. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního inženýrství, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/212372>. [cit. 2024-02-01].
- [19] COSTA, Jorge Alberto Vieira; FREITAS, Barbara Catarina Bastos; ROSA, Gabriel Martins; MORAES, Luiza; MORAIS, Michele Greque et al. Operational and economic aspects of Spirulina-based biorefinery. Online. *Bioresource Technology*. 2019, roč. 292.

- ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121946>. [cit. 2024-03-29].
- [20] ABDUR RAZZAK, Shaikh; BAHAR, Khairul; ISLAM, K.M. Oajedul; HANIFFA, Abdul Khaleel; FARUQUE, Mohammed Omar et al. Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future. Online. *Green Chemical Engineering*. 2023. ISSN 26669528. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004>. [cit. 2024-03-08].
- [21] HUANG, Qingshan; JIANG, Fuhua; WANG, Lianzhou a YANG, Chao. Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. Online. *Engineering*. 2017, roč. 3, č. 3, s. 318-329. ISSN 20958099. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>. [cit. 2024-03-18].
- [22] BARROS, Ana I.; GONÇALVES, Ana L.; SIMÕES, Manuel a PIRES, José C.M. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, roč. 41, s. 1489-1500. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>. [cit. 2024-04-14].
- [23] SONI, Ruma Arora; SUDHAKAR, K. a RANA, R.S. Spirulina – From growth to nutritional product: A review. Online. *Trends in Food Science & Technology*. 2017, roč. 69, s. 157-171. ISSN 09242244. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.09.010>. [cit. 2024-04-14].
- [24] TORZILLO, Giuseppe a CHINI ZITTELLI, Graziella. Tubular Photobioreactors. Online. In: PROKOP, Aleš; BAJPAI, Rakesh K. a ZAPPI, Mark E. (ed.). *Algal Biorefineries*. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 187-212. ISBN 978-3-319-20199-3. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_5). [cit. 2024-01-29].
- [25] RAJENDRAN, Anand. *Behavior of Light in a Photobioreactor and Design of Light Guides*. Online, Thesis, vedoucí Gary Anderson. South Dakota State University: South Dakota State University, 2016. Dostupné z: <https://openprairie.sdstate.edu/etd/985/>. [cit. 2024-02-24].
- [26] ANAND RAJENDRAN; GARY A. ANDERSON; XINGZHONG YAN a STEPHEN GENT. Light in a Photobioreactor. Online. In: *2013 Kansas City, Missouri, July 21 - July 24, 2013*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.13031/aim.20131620672>. [cit. 2024-02-24].
- [27] ADAMEC, Matěj. *Vliv osvětlení na růst mikrořas*. Online, Diplomová práce, vedoucí Martin Nadř. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního inženýrství, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/212374>. [cit. 2024-02-01].
- [28] JOHNSON, Tylor J.; KATUWAL, Sarmila; ANDERSON, Gary A.; GU, Liping; ZHOU, Ruanbao et al. Photobioreactor cultivation strategies for microalgae and cyanobacteria. Online. *Biotechnology Progress*. 2018, roč. 34, č. 4, s. 811-827. ISSN 8756-7938. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/btpr.2628>. [cit. 2024-02-01].

- [29] TAKACHE, Hosni; PRUVOST, Jérémy a MAREC, Hélène. Investigation of light/dark cycles effects on the photosynthetic growth of *Chlamydomonas reinhardtii* in conditions representative of photobioreactor cultivation. Online. *Algal Research*. 2015, roč. 8, s. 192-204. ISSN 22119264. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.02.009>. [cit. 2024-04-29].
- [30] *System to improve algae production in a photo-bioreactor* (US). Přihl.: 13.2.2008. Uděl.: 13.8.2009. US 2009/0203116 A1. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US20090203116A1/en>. [cit. 2024-04-29]
- [31] FU, Jingwei; HUANG, Yun; LIAO, Qiang; XIA, Ao; FU, Qian et al. Photo-bioreactor design for microalgae: A review from the aspect of CO<sub>2</sub> transfer and conversion. Online. *Bioresource Technology*. 2019, roč. 292. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121947>. [cit. 2024-03-01].
- [32] DINESHKUMAR, R.; SAMPATHKUMAR, Pitchai; RAJENDRAN a , Narendran. Cultivation of *Spirulina platensis* in different selective media. Online. 2016, article 45. Dostupné z: <https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/40537/1/IJMS%2045%2812%29%201749-1754.pdf>. [cit. 2024-03-03].
- [33] *Chlornan sodný*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Chlornan\\_sodn%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Chlornan_sodn%C3%BD). [cit. 2024-03-24].
- [34] *Ozon*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ozon>. [cit. 2024-03-24].
- [35] *Spirulina Side Effects Clarity: 3 to 5g Per Day To Remove Doubts*. Online. Fresh Spirulina, Australia. 2023. Dostupné z: <https://www.freshspirulina.com.au/spirulina/spirulina-side-effects/>. [cit. 2024-05-18].
- [36] SERGEJEVOVÁ, Magda; MALAPASCUA, José Romel; KOPECKÝ, Jiří a MASOJÍDEK, Jiří. Photobioreactors with Internal Illumination. Online. In: PROKOP, Aleš; BAJPAI, Rakesh K. a ZAPPI, Mark E. (ed.). *Algal Biorefineries*. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 213-236. ISBN 978-3-319-20200-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_6). [cit. 2024-02-08].
- [37] GEORG FISCHER AG. *GF Piping Systems*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.gfps.com/content/dam/gfps.com/product-ranges/en/gfps-9182-product-range-pvc-u-en.pdf>. [cit. 2024-05-21].
- [38] AUTOR, Nenalezený. *Tangit PVC-U*. Online. Tangit. Dostupné z: <https://www.tangit.cz/cs/produkty/lepidla-na-potrubi-a-cistice/tangit-pvc-u.html>. [cit. 2024-02-20].
- [39] *Spojování hliníkových profilů*. Online. Vsk-profil.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.vsk-profil.cz/blog/jak-na-spojovani-hlinikovych-profilu/>. [cit. 2024-03-29].
- [40] MOONLAKE WEB SERVICES, s.r.o. *Hailea ACO 208, pístový kompresor, 35 litrů/min., 16 Watt, OSAGA LK 35*. Online. Vodní Království. Dostupné z:

- <https://www.kojjezirka.cz/vzduchovani-kompresory/pistove-kompresory/pistovy-kompresor-aco208-440.html>. [cit. 2024-03-24].
- [41] NIANGORAN, Urbain; TIAN, Feng; CANALE, Laurent; HABA, Cisse Theodore; BUSO, David et al. Study of the LEDs Spectrums Influence on the Spirulina Platensis Growth in Batch Culture. Online. In: *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. IEEE, 2018, s. 1-4. ISBN 978-1-5386-5186-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493759>. [cit. 2024-02-23].
- [42] MARKOU, Giorgos. Effect of Various Colors of Light-Emitting Diodes (LEDs) on the Biomass Composition of Arthrospira platensis Cultivated in Semi-continuous Mode. Online. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2014, roč. 172, č. 5, s. 2758-2768. ISSN 0273-2289. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12010-014-0727-3>. [cit. 2024-04-05].
- [43] LEDMEGROW. *Převodník jednotek osvětlení pro rostliny*. Online. Ledmegrow.cz. Dostupné z: <https://www.ledmegrow.cz/nase-sluzby-pro-vas/prevodnik-jednotek-osvetleni-pro-rostliny/>. [cit. 2024-02-24].
- [44] ESES. *Vodotěsný teploměr pro jednodeskové počítače*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: [https://dratek.cz/docs/produkty/0/758/eses1500635996.pdf?\\_gl=1\\*\\_1gf53qm\\*\\_up\\*MQ..&gclid=CjwKCAjw\\_e2wBhAEEiwAyFFFo5O0tpYsVbtbp1FCjL3NeLCw3USfJHIZYmZ\\_vYhvzSXsC7aAdurWGhoCq-gQAvD\\_BwE](https://dratek.cz/docs/produkty/0/758/eses1500635996.pdf?_gl=1*_1gf53qm*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjw_e2wBhAEEiwAyFFFo5O0tpYsVbtbp1FCjL3NeLCw3USfJHIZYmZ_vYhvzSXsC7aAdurWGhoCq-gQAvD_BwE). [cit. 2024-04-15].
- [45] HEALTHALGAE. *Spirulina platensis 40 L dry grow medium SSD1 2*. Online. HealthAlgae. Dostupné z: <https://www.healthalgae.com/product/spirulina-platensis-40-l-dry-grow-medium-ssd12/>. [cit. 2024-05-21].
- [46] SAMMLUNG VON ALGENKULTUREN GÖTTINGEN. *Medium Recipe*. Online. 2008. Dostupné z: [https://sagdb.uni-goettingen.de/culture\\_media/02%20Spirulina%20Medium.pdf](https://sagdb.uni-goettingen.de/culture_media/02%20Spirulina%20Medium.pdf). [cit. 2024-05-21].
- [47] CHEN, Yu Pei; HUANG, Yao Hsin a HUANG, Hsiang Chin. Different plastic-bag type photobioreactor for biomass production of Chlorella species. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, roč. 1113, č. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1113/1/012004>. [cit. 2024-03-18].
- [48] SUBITEC GMBH. *Maximum safety and efficiency in laboratory and pre-scale cultivation of microalgae*. Online. Subitec. 2024. Dostupné z: <https://subitec.com/en/products/pre-culture-and-laboratory-systems/>. [cit. 2024-03-22].
- [49] AUTOR, Nenalezený. *Kompresor Hailea ACO 208*. Online. Nase Jezirka. Dostupné z: <https://www.nasejezirka.cz/vzduchovani-do-jezirka/4318-kompresor-hailea-aco-208-6920255810022.html>. [cit. 2024-02-23].



- 
- [50] AUTOR, Nenalezený. *Raspberry Pi Documentation*. Online. Raspberry Pi hardware. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>. [cit. 2024-04-14].

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Název
FBR	Fotobioreaktor
GPIO	General-Purpose Input/Output
HRAP	High rate algal ponds
LED	Light Emitting Diode
PE	Polyethylen
PETG	Polyethylentereftalátglykol
PHB	Polyhydroxybutyrát
PSI	Photon System Instruments
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-U	Nepolymerovaný polyvinylchlorid
UV	Ultrafialové záření
WSPs	Waste Stabilization Pond systems

Symbol	Veličina	Jednotka
$I_x$	Intenzita světla ve vzdálenosti $x$	$\mu\text{W}/\text{m}^2$
$a_c$	Schopnost biomasy absorbovat světlo	$\text{m}^2/\text{g}$
$C_b$	Koncentrace biomasy	$\text{g}/\text{l}$
$b$	Délka světelného průchodu od povrchu do bodu $x$ ve fotobioreaktoru	$\text{m}$
$I_o$	Intenzita světla na povrchu	$\mu\text{W}/\text{m}^2$
$I_c$	Intenzita světla při 0 rychlosti fotosyntézy	$\mu\text{W}/\text{m}^2$
$I_s$	Intenzita světla při světelném nasycení	$\mu\text{W}/\text{m}^2$
$I_h$	Intenzita světla při fotoinhibici	$\mu\text{W}/\text{m}^2$
$V_{FBR}$	Požadovaný objem fotobioreaktoru	$\text{l}$
$r$	Doporučená denní dávka	$\text{g}/\text{d}$
$p$	Produkce	$\text{g}/\text{l}/\text{d}$
$D$	Vnější průměr trubek	$\text{mm}$
$d$	Průměr osvětlovacích trubek	$\text{mm}$

---



---

$L$	Délka osvětlovací části trubice	mm
$S$	Osvětlená plocha trubek	mm <sup>2</sup>
$\dot{V}_{plynu}$	Objem přivedeného plynu	l
$k_p$	Konstanta průtoku plynu	
$n$	Počet pásků v jedné trubici	
$\Phi_{Wm}$	Metrický světelný tok LED pásku zadaný výrobcem	lm/m
$\Phi_W$	Světelný tok LED pásku	lm
$l$	Návrhová délka části osvětlené trubice [m]	
$E_W$	Intenzita osvětlení	lux
$k$	Bezpečnostní součinitel (zadaný výrobcem)	
$n$	Počet pásků v jedné trubici	
$l_r$	Reálná délka jednoho pásku	m
$P_m$	Metrický výkon pásku	W/m
$PAR$	Fotosynteticky aktivní záření	μmol/m <sup>2</sup> /s
$PPFD$	Hustota fotosynteticky aktivního záření (PAR)	μmol/m <sup>2</sup> /s
$S/V$	Poměr zabrané plochy objemem	m <sup>-1</sup>

---

## Seznam obrázků

OBR. 2-1 MORFOLOGIE SPIRULINY[6] .....	13
OBR. 3-1 CHEESECAKE S ČERSTVOU SPIRULINOU [11] .....	15
OBR. 3-2 ZMĚNA BARVY INDIKÁTORU STAVU POTRAVIN V ZÁVISLOSTI NA DEGRADACI [13] .....	16
OBR. 4-1 OTEVŘENÉ KULTIVAČNÍ SYSTÉMY [20] (UPRAVENO) .....	18
OBR. 4-2 PROBUBLÁVANÉ KOLONY TRAŤOVÝCH SYSTÉMŮ [3] .....	19
OBR. 4-3 SCHÉMA KASKÁDOVÉHO SYSTÉMU [18] .....	20
OBR. 4-4 SCHÉMA VÁLCOVÉHO FOTOBIOREAKTORU [18] .....	21
OBR. 4-5 SCHÉMA AIRLIFT FOTOBIOREAKTORU [18] .....	22
OBR. 4-6 SCHÉMA HORIZONTÁLNÍHO TRUBKOVÉHO FOTOBIOREAKTORU [18] .....	23
OBR. 4-7 SCHÉMA ŠROUBOVICOVÉHO FOTOBIOREAKTORU [18] .....	23
OBR. 4-8 SCHÉMA DESKOVÉHO FOTOBIOREAKTORU [18] .....	24
OBR. 4-9 PYTLOVÝ FOTOBIOREAKTOR S RŮZNÝMI DRUHY PŘEPÁŽEK [47] .....	24
OBR. 4-10 VLEVO LABORATORNÍ SYSTÉM SUBITEC CM6 O OBJEMU 6 L [48], VPRAVO MULTI-CULTIVATOR MC 1000 OD FIRMY PSI [25] .....	27
OBR. 6-1 PROSTUP SVĚTLA FOTOBIOREAKTOREM [26](UPRAVENO) .....	29
OBR. 6-2 SCHÉMA SVĚTELNÉ ZÁVISLOSTI FOTOSYNTÉZY [27] .....	29
OBR. 6-3 RELATIVNÍ ABSORPCE SVĚTLA FOTOSYNTETICKÝMI PIGMENTY[27] .....	30
OBR. 6-4: SYSTÉM PRO ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY FBR S POUŽITÍM OPTICKÝCH VLÁKEN [30] .....	31
OBR. 7-1 NÁVRH TVARU FOTOBIOREAKTORU .....	34
OBR. 7-2 SPOJ POMOCÍ ŠROUBŮ V DRÁŽCE [39] .....	35
OBR. 7-3 NÁVRH RÁMU FOTOBIOREAKTORU .....	36
OBR. 7-4 KOMPRESOR HAILEA ACO 208, SCHÉMA VÝKONU KOMPRESORU [49] .....	37
OBR. 7-5 SCHÉMA ZAPOJENÍ VZDUCHOVÁNÍ .....	37
OBR. 7-6 OSVĚTLOVACÍ TRUBICE SE VZDUCHOVACÍM KAMENEM .....	38
OBR. 7-7 OSVĚTLOVACÍ TRUBICE PŘED SLOŽENÍM .....	39
OBR. 7-8 PŘÍRŮSTEK BIOMASY V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO RŮZNÉ BARVY OSVĚTLENÍ [41] .....	39
OBR. 7-9 PŘÍRŮSTKY BIOMASY PRO RŮZNÉ INTENZITY OSVĚTLENÍ [41] .....	40
OBR. 7-10 SPÁJENÉ LED PÁSKY .....	41
OBR. 7-11 ZDROJ NA NAPÁJENÍ LED .....	42
OBR. 7-12 OVLADAČ S PŘIJÍMAČEM .....	42
OBR. 7-13 SCHÉMA GPIO PINŮ MIKROPOČÍTAČE RASPBERRY PI 4 MODEL B [50] .....	43
OBR. 7-14 SCHÉMA ZAPOJENÍ OSVĚTLENÍ .....	44
OBR. 7-15 SPOJKA PŘIDRŽUJÍCÍ OSVĚTLOVACÍ TRUBICI .....	44
OBR. 7-16 SCHÉMA ZAPOJENÍ TEPLŮTNÍCH SOND DS18B20 DO MIKROPOČÍTAČE RASPBERRY PI 4 B .....	45
OBR. 7-17 POSTUP VYPOUŠTĚNÍ ZAHUŠTĚNÉ BIOMASY .....	45
OBR. 7-18 NÁVRHY TVARŮ FBR ZA ÚČELEM NAVÝŠENÍ OBJEMU .....	47
OBR. 8-1 NAVRŽENÝ FOTOBIOREAKTOR .....	48
OBR. 8-2 PROCENTUÁLNÍ VYJÁDŘENÍ VÝROBNÍCH NÁKLADŮ .....	49
OBR. 8-3 PROCENTUÁLNÍ VYJÁDŘENÍ ENERGETICKÝCH NÁKLADŮ .....	50

---

## Seznam tabulek

TABULKA 1 NEJČASTĚJI KOMERČNĚ VYUŽÍVANÉ MIKROŘASY [2] .....	12
TABULKA 2 PŘIBLIŽNÉ SLOŽENÍ LIDSKÝCH ZDROJŮ POTRAVY A SUŠINY RŮZNÝCH ŘAS [5] .....	14
TABULKA 4.1 SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD JEDNOTLIVÝCH SYSTÉMŮ [2] (UPRAVENO),.....	25
TABULKA 6.1 PRODUKTIVITA A. PLANTESIS V RŮZNÝCH PRŮMĚRECH TRUBKY VE VENKOVNÍCH FOTOBIOREAKTORECH [24] .....	28
TABULKA 6.2 SLOŽENÍ ZARROUKOVA KULTIVAČNÍHO MÉDIA [32] .....	32

## Seznam příloh

1. 3D model fotobioreaktoru
2. Výkres sestavení fotobioreaktoru
3. Schématický výkres fotobioreaktoru