



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

Vliv osvětlení na růst mikrořas

Effect of light on microalgae growth

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matěj Adamec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Nad', Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Matěj Adamec
Studijní program:	Procesní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Martin Nad', Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv osvětlení na růst mikrořas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z klíčových vstupních parametrů při pěstování mikrořas je zajištění dostatečného světla. V případě nedostatečného slunečního záření, případně při pěstování v interiéru, je nutnost použití umělého osvětlení. Tak jako nedostatek světla, může být při kultivaci mikrořas problémem i nadbytek světla. Cílem je tedy najít rovnováhu mezi nedostatkem a nadbytkem světla a také vhodné umístění osvětlení pro minimalizaci spotřeby elektrické energie.

Cíle diplomové práce:

Popis klíčových parametrů osvětlení mající vliv na růst mikrořas

Porovnání vlivu přirozeného a umělého osvětlení

Návrh osvětlení, jeho implementace, měření využití světelného toku Vyhodnocení vlivu intenzity osvětlení a dalších parametrů na růst řasy

Seznam doporučené literatury:

RICHMOND A. a Q. HU, Ed., Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. doi: 10.1002/9781118567166.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Světlo je jedním z klíčových faktorů ovlivňující růst fotoautotrofních řas ve fotobioreaktorech. Aby kultivace v takovém zařízení byla optimální je zapotřebí docílit dostatečného přístupu světelného záření k mikrořasám, zejména potřebná je dostatečná intenzita osvětlení. V této práci je věnována značná pozornost vlivu světla během celého procesu fotosyntézy. Detailně jsou zhodnocena možná řešení osvětlení fotobioreaktoru přírodním i umělým světlem včetně popisu jeho hlavních parametrů. Byl proveden návrh regulovatelného osvětlení pro nově vyvíjený fotobioreaktor s osmi horizontálními trubicemi a kontrolní výpočet PPF_D (Photosynthetic Photon Flux Density). Následně bylo navrhnuté osvětlení implementované na nově postavený fotobioreaktor, který sloužil k testování vlivu délky fotoperiody a zabarvení LED světelných zdrojů na samotnou kultivaci mikrořasy. Na základě těchto dat bylo možné stanovit optimální délku fotoperiody, přičemž testovány byly poměry 12:12, 18:6 a 24:0 (světelná fáze:temnostní fáze). Na závěr práce byla pro zhodnocení prostorového rozložení osvětlení fotobioreaktoru provedena CFD simulace vybraných trubic fotobioreaktoru pomocí simulačního programu ANSYS FLUENT.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotobioreaktor, mikrořasy, osvětlení, světelné spektrum, fotoperioda, CFD simulace

ABSTRACT

Light is one of the key elements affecting the growth of photoautotrophic algae in photobioreactors. For optimal cultivation in such a device, sufficient access to light radiation to the microalgae is required sufficient light intensity is needed. In this work, considerable attention is paid to the influence of light during the whole photosynthesis process. Viable solutions for the illumination of the photobioreactor by natural and artificial light are evaluated in detail, including a description of its main parameters. The design of a programmable illumination for a newly designed photobioreactor with eight horizontal tubes and a control calculation of PPF_D (Photosynthetic Photon Flux Density) were performed. Afterwards, the designed illumination was implemented on the newly built photobioreactor to evaluate the effect of photoperiod length and LED light coloration on the actual microalgae cultivation. Based on these data, the optimal photoperiod length could be determined, and ratios of 12:12, 18:6, and 24:0 (light phase:dark phase) were tested. Finally, to evaluate the spatial distribution of the photobioreactor illumination, CFD simulations of selected photobioreactor tubes were performed using simulation software ANSYS FLUENT.

KEYWORDS

Photobioreactor, microalgae, illumination, light spectrum, photoperiod, CFD simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ADAMEC, M. *Vliv osvětlení na růst mikrořas*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. 91 s. Vedoucí diplomové práce Martin Nadř.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martin Nad', Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Matěj Adamec

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Nadřovi, Ph.D. za cenné rady, užitečné připomínky a odborné vedení při zpracovávání. Ing. Pavlu Lošákovi, Ph.D. spolupracujícímu na vývoji experimentálního fotobioreaktoru. Ing. Tomáši Juřenovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Vondálovi, Ph.D. za cenné rady ohledně CFD simulace a Ing. Vladimíru Brummerovi, Ph.D. za pomoc s kultivačním médiem.

Rovněž bych rád poděkoval své partnerce, rodině a přátelům za nikdy neutuchající podporu.

OBSAH

Úvod	11
1 Mikrořasy	12
1.1 Nejpoužívanější rody mikrořas	12
1.2 Potenciál pěstování mikrořas	14
1.3 Růstové faktory mikrořas.....	18
2 Fotosyntéza mikrořas.....	21
2.1 Světelná fáze	22
2.2 Temnostní fáze.....	24
2.3 Efektivita fotosyntézy	26
2.4 Vliv osvětlení na fotosyntézu	26
3 Osvětlení fotobioreaktorů.....	27
3.1 Nepříznivé vlivy množství kultury na osvětlení	28
3.2 Energie ve světle	29
3.3 Parametry osvětlení.....	30
3.4 Světelné zdroje.....	34
4 Osvit experimentálního fotobioreaktoru.....	41
4.1 Návrh osvitu fotobioreaktoru	43
4.2 Komponenty osvětlovacího celku.....	45
4.3 Elektroinstalace osvětlovacího celku	48
5 Experiment vlivu osvitu	51
5.1 Parametry fotobioreaktoru a média.....	51
5.2 Růstový cyklus.....	52
5.3 Zkušební provoz	53
5.4 Osvětlovací cyklus	53
5.5 Zabarvení LED světel	54
5.6 Senzorika	54
5.7 Experimenty.....	55
5.8 Zhodnocení optimálního nastavení	58
6 Simulace osvitu	60
6.1 Fyzikální popis simulace	60
6.2 Sestavení modelu	60
6.3 Výsledky simulace	65
6.4 Zhodnocení výsledků simulace.....	68
Závěr.....	69
Použité informační zdroje.....	71

Seznam použitých symbolů	82
Seznam použitých zkratek	84
Seznam obrázků a grafů	89
Seznam tabulek	90
Seznam příloh	91

ÚVOD

Tématem posledních 20 až 30 let je stále častěji nutnost boje s klimatickou změnou a snaha o udržitelnost. Jdoucí ruku v ruce s tímto trendem je i tendence o uhlíkovou neutralitu, které se státy Evropské unie zavázaly dosáhnout do roku 2050, jež koresponduje s článkem 4 Pařížské dohody [1]. Důsledkem je značná pozornost věnovaná vývoji zařízení a technologií, které tomuto trendu napomohou. Fotobioreaktor, mající za cíl kultivaci mikrořas s využitím odpadních látek v nejrůznější podobě, je jedním z takových zařízení. Je vhodnou „zelenou“ technologií, která nabízí široký potenciál uplatnitelnosti v různých odvětvích napříč průmyslem. Do výrobního procesu vstupují mikrořasy nejen jako surovina. Napomáhat mohou i při redukci znečišťujících látek vzniklých výrobou samotnou. Na straně surovin nachází uplatnění v energetice jako palivo, v potravinářství jako zdroj základních živin či antioxidantů, uplatnění nabízí ve farmacii i kosmetice a mnohých dalších odvětvích. Při snižování dopadů průmyslové výroby je možné je aplikovat v rámci systémů dočistění spalin i odpadních vod. Z odpadních vod jsou schopné vyextrahovat toxické těžké kovy a redukovat množství zbytkových živin, které by jinak způsobovaly eutrofizaci vod [2].

Vzhledem k tomu, že jsou mikrořasy jednoduchými zelenými rostlinami, využívají ke svému růstu, obdobně jako vyšší rostliny, chemický proces nazývaný fotosyntéza. Během fotosyntézy dochází k látkové výměně mezi rostlinou a prostředím. Ta by bez přítomnosti světla neprobíhala. Právě světlo je zdrojem energie umožňující rozštěpení molekuly vody na kyslík a vodík na samotném počátku celého procesu. Popisu fotosyntézy je věnována druhá část této práce.

Světelnou energii je možné mikrořasám dodávat buď přirozeně, ve formě slunečního světla, nebo z umělých zdrojů. Sluneční svit má svá úskalí, jelikož je nestálý a časově proměnný, na rozdíl od toho umělého. Jeho nespornou výhodou nadále zůstávají nulové vnější energetické náklady. Pro přizpůsobení umělého záření je možné světlo popsat řadou parametrů, jakými jsou například spektrální složení, světelný tok a další, kterým je věnována kapitola 3.

Součástí této práce je i samotný návrh osvětlovacího celku vyvíjeného fotobioreaktoru včetně výběru zdroje umělého světla a všech potřebných komponent. Proveden byl též i výpočet produkovaného světla z hlediska vlivu na fotosyntézu mikrořasy určením hustoty fotosyntetického fotonového toku.

V praktické části řešení problematiky osvětlení mikrořas a jejího vlivu na růst byla za pomoci experimentálního fotobioreaktoru provedena řada měřených růstových cyklů. Zkoumán byl vliv délky osvětlovacího cyklu tzv. fotoperiody. Vyhodnocen byl na základě délky jednotlivých pěstebních cyklů v předem daném rozmezí množství nakultivované řasy. Testovací fotobioreaktor je osazen dvojicí LED pásků, které umožňují nastavit různá spektrální složení vyzařovaného světla. Pomocí dat, získaných z měření, byla definována optimální konfigurace osvětlení zajišťující maximální produkci vyvíjeného fotobioreaktoru.

K pochopení chování světla ve fotobioreaktoru, jeho toku, vznikajících odrazů, lomů a absorpcí různými materiály, byla vytvořena simulace v programu ANSYS FLUENT. Jejími výstupy jsou rastrové mapy s barevným vykreslením dle rozložení intenzit zkoumaných veličin ve vnitřních prostorách fotobioreaktoru. Těmito veličinami jsou dopadající záření a objemová absorbovaná radiace.

1 MIKROŘASY

Pod souhrnným názvem mikrořasy se v terminologii fotobioreaktorů rozumí nejen mikroskopické eukaryotní¹ řasy, ale rovněž i prokaryotní² cyanobakterie známé též jako sinice. Právě tato skupinka mikroskopických organismů je nejčastěji aplikovanou živou masou při kultivaci ve fotobioreaktorech. Tyto jednobuněčné organismy jsou schopny buď samostatně existovat, nebo se shlukovat do kolonií, či vytvářet dlouhá vlákna (řetězce). Ke svému růstu využívají převážně fotoautotrofní³ způsob výživy – fotosyntézu [3]. Právě fotoautotrofní bakterie jsou pokládány za jedny z nejstarších organismů na Zemi z doby před 2,5 miliardami let. Přisuzována je jim takzvaná kyslíková krize či revoluce, kdy došlo k značnému nárůstu kyslíku v atmosféře. Následkem této změny došlo k hromadnému vymírání, které umožnilo rozvoj komplexnějšího života, tedy mnohobuněčných organismů [4].

Mikrořasy jsou rozsáhlým souborem čítající na 30 000 až 1 milion možných druhů, kdy popsáno bylo přibližně 72 000 [5]. Právě takové množství jednotlivých druhů dalo této skupině organismů schopnost adaptovat se na téměř jakékoliv podmínky. Vyskytují se prakticky ve všech vodních i půdních ekosystémech. Od polárních oblastí až po pouště, či horká zřídla, v kyselých i alkalických, či extrémně slaných vodách. Zde všude je možné zástupce této skupiny organismů pozorovat. Právě díky své jednoduché stavbě nevyžadující žádný podpůrný aparát, na rozdíl od vyšších rostlin. K tomu navíc disponují vyšší účinností fotosyntézy, která má za následek vysokou míru reprodukce [6]. Právě tato charakteristika z mikrořas činí vhodné kandidáty na kultivaci pro průmyslové užití na rozdíl od většiny ostatních zdrojů biomasy.

První zmínky o uplatnění řas se datují do Chile před 14 000 roky [7]. O něco mladší záznamy z doby před 2000 lety jsou pozůstatky v Číně, kdy se sinice rodu *Nostoc* konzumovaly při boji s hladomorem [8]. Španělští conquistadoři v 16. století popsali prodej vysušené biomasy ze sinic na mexických trzích, která byla sbírána z jezera Texcoco [6]. S průmyslovou kultivací mikrořas se setkáváme až v několika posledních dekádách. V padesátých letech minulého století bylo k potenciálnímu využití mikrořas přihlíženo jako k možnému řešení nedostatečných zdrojů proteinů pro stále rostoucí světovou populaci [8]. O velkoobjemové produkci mikrořas hovoříme od sedmdesátých let minulého století. Nejběžnější formou kultivace bylo pěstování v rozsáhlých otevřených nádržích. Takto získaná biomasa se využívala pro přípravu krmiv a potravinových doplňků. Řasy *Arthrospira* (*Spirulina*) se zájmu těšily především v USA, Mexiku, Číně, Thajsku, či v Jihoafrické republice. Pěstování rodu *Chlorella* probíhala převážně v Japonsku. Astaxantin, červené barvivo spadající do karotenoidů, hojně využívané jako potravinový doplněk, byl získáván kultivací řasy *Haematococcus* na Havaji. O kultivaci rodu *Dunaliella* na průmyslové úrovni se zabývali v Austrálii. Z tohoto rodu je možné extrahovat β -karoten [6].

1.1 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ RODY MIKROŘAS

Pro algakulturu, tedy řízené pěstování mikrořas v kultivačních systémech, je dnes využíváno jen některých sladkovodních a mořských rodů mikrořas. Právě řízená kultivace má za cíl nastavení specifických podmínek umožňujících ovlivnit metabolické procesy v mikrořasách, a tak pozměnit chemické složení biomasy. Na komerční uplatnění při velkoobjemové kultivaci je v dnešní době využíváno omezené množství rodů. Mezi nejvýznamnější rody kmene

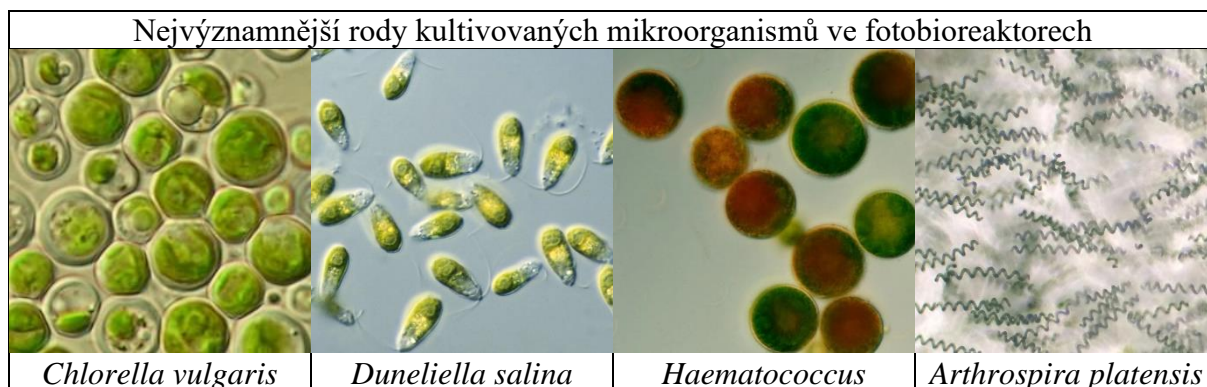
¹ S vlastním pravým jádrem, kde je uložena dědičná informace

² Bez jádra, dědičná informace volně v cytoplazmě

³ Získávání uhlíku z anorganických látek syntézou za přítomnosti světelné energie

Chlorophyta patří *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*. Nejhojněji využívaným rodem sinic je *Arthrospira* [6]. K nahlédnutí v Tab. 1

Tab. 1 Nejběžnější kultury pro kultivaci [9]



1.1.1 CHLORELLA

Zástupci rodu *Chlorella* jsou zelené nepohyblivé jednobuněčné řasy kulového, někdy až elipsoidního tvaru velikosti 2 až 15 μm . Dominantním rysem je schopnost rychlé reprodukce způsobené vysokou efektivitou fotosyntézy. Právě řasy rodu *Chlorella* stály u objevu Calvin-Bensonova cyklu. Jsou zdrojem proteinů, karotenoidů, vitamínů i minerálů. Často byly a jsou využívány jako doplněk stravy. Pro svůj vysoký obsah lipidů⁴ je *Chlorella* i vhodným kandidátem pro výrobu biopaliv [10].

1.1.2 DUNALIELLA

Dunaliella je zelená mikrořasa vhodná pro pěstování ve vysoce slaných vodách. Významný je tento rod pro svůj obsah β -karotenu, až 10 % v sušině. Využití nachází převážně jako zdroj karotenoidů pro doplňky stravy a své antioxidační vlastnosti. V akvaristice je zdrojem přírodního barviva pro ryby a korýše [6].

1.1.3 ARTHROSPIRA

Rod *Arthrospira*, často označovaný jako *Spirulina*, je skupina fotosyntetizujících bakterií. Nejedná se tedy o rostliny, nýbrž o sinice. Často jsou brány jako součást souhrnného názvu mikrořasy. Pod pojmem spirulina je označována využitelná biomasa, produkt cyanobakterií rodu *Arthrospira*. Ve své biomase obsahují množství proteinů a železa. Produkty určené pro přímou konzumaci jsou pro svůj vysoký obsah nutrientů považovány za superpotravinu. Významná se jeví i pro farmaceutický průmysl [11].

1.1.4 HAEMATOCOCCUS

Významný rod pro svoji schopnost produkovat přírodní karotenoid⁵ astaxantin odstínu cihlově rudé barvy. K tvorbě této sloučeniny dochází při „vystresování“ mikrořasy mající za následek přeměnu zelených buněk na červené cysty. Pod stresovými podmínkami se rozumí omezený

⁴ Estery vyšších mastných kyselin, pod které spadají tuky, oleje a další organické látky

⁵ Pigment organického původu, odstínů žluté až červené barvy napomáhající fotosyntéze

přísun živin a vysoké intenzitě osvitů. Své uplatnění má získaný astaxantin jako antioxidant v doplňcích stravy [6].

1.2 POTENCIÁL PĚSTOVÁNÍ MIKROŘAS

Role mikrořas v průmyslové výrobě ještě nedosáhla svého vrcholu. Kdysi bylo jejich pěstování spjato převážně s výživou a doplňky stravy lidské populace i zvířectva. Nové poznatky ale teprve odhalují možnosti uplatnění mikrořas, a to převážně v ekologicky orientovaném směru. Kromě základních složek potravy jsou zdrojem i celé řady vitamínů, antioxidantů a barviv, jak již bylo dříve popsáno. Proto jsou vhodnou vstupní surovinou i pro farmaceutickou a kosmetickou výrobu. Relativně vysoký obsah lipidů a polysacharidů v biomase k jejich velikosti je možné zužitkovat při výrobě biopaliv 3. a 4. generace. Pozornost poutají mikrořasy i díky schopnosti lapit škodlivé látky z ovzduší, spalin, či odpadních vod a využívat jich ke svému vlastnímu růstu. Ze spalin pohlcují skleníkové plyny jako je oxid uhličitý, oxidy síry, či oxidy dusíku. Z odpadních vod byla prokázána vlastnost akumulovat do sebe těžké kovy a další polutanty⁶. Jednotlivá vyjmenovaná uplatnění mikrořas jsou detailněji popsána v následujících kapitolách.

1.2.1 ČIŠTĚNÍ SPALIN

Obecně se spalinami rozumí rozmanitá směs plynů, převážně oxidů, vodní páry a TZL (tuhých znečišťujících látek), někdy označované též jako pevné částice. Nejvýznamnější podíl ve spalinách představuje oxid uhličitý mající zastoupení od 5 do 95 % v závislosti na typu spalovaného paliva, kdy nižší koncentrace odpovídají spalování zemního plynu. Naopak vysokého podílu oxidu uhličitého ve spalinách je dosaženo při spalování za přítomnosti čistého kyslíku. Velmi vysoké koncentrace oxidu uhličitého mohou mít pro mikrořasové čištění spalin neblahý efekt, který se projevuje značným poklesem pH. Pro kultivaci za zvýšené koncentrace CO₂ se dle studií nejlépe hodí řasy rodu *Chlorella*, schopné růstu i ve 100% koncentraci. Maximální výtěžnost byla však pozorována pro koncentrace od 10 do 20 % [12]. Schopnost lapit oxid uhličitý je oproti vyšším rostlinám 10 až 50krát vyšší. Ohledně vlivu oxidů síry a dusíku se vedou rozporuplné teze. Přímý pozitivní vliv oxidů dusíku na růst není prokázán, avšak mikrořasy jsou schopné využívat NO_x jako alternativní zdroj dusíku pro svůj růst. Při vysokých koncentracích byla pozorována nižší míra růstu. SO₂ má přímý vliv na kyselost růstového média při koncentraci nad 300 ppm a způsobuje nárůst neproduktivní lag fáze [13]. Příkladem aplikace mikrořas jakožto způsobu čištění spalin může být i studie zpracovaná na Ústavu procesního inženýrství Fakulty strojního inženýrství v Brně. Zde byl na půdorysu emisních limitů spalin z provozů ZEVO (zařízení na energetické využití odpadu), kde až 10 % procent může tvořit oxid uhličitý, pozorován pokles znečišťujících látek. Ve spalinách byly taktéž obsaženy další běžné polutanty (CO, NO, SO₂). Zkoumán byl vliv nového druhu skleněných trubic fotobioreaktoru s oválným průřezem, jenž měl zamezit samostínění řasového média [14].

1.2.2 DOČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

Vhodnou aplikací pro mikrořasy může být jejich nasazení v čistírnách odpadních vod dle studie z roku 2010. Zde roli kultivačního média nahrazuje odpadní voda bohatá na dusík, fosfor a kovové ionty především hliníku, vápníku, železa, hořčíku a manganu [2]. Rovněž byl zaznamenán pokles chemické spotřeby kyslíku (CHSK) odpadní vodou, jež určuje obsah přítomných organických sloučenin [15]. Zkoumány byly čtyři vzorky odpadních vod z různých

⁶ Znečišťující látky

stupňů čištění. Odpadní vody před a po primárním čištění v usazovací nádrži (1 a 2), odpadní voda z aktivovaného kalu (3) a posledním vzorkem byla odpadní voda z rotačního kalolisu (4). Nejlepších výsledků redukce fosforu, dusíku a poklesu CHSK bylo dosaženo u vzorků 1, 2 a 4. Původně mělo být pomocí mikrořas dosaženo snížení možného efektu eutrofizace⁷ u odpadních vod po sekundárním čištění. Bylo pozorováno výrazné snížení obsahu nutrientů u usazeného kalu vlivem mikrořas, než bylo dosaženo aktivovaným kalem. Nedostatkem ovšem zůstává potřebný čas, a tedy není toto řešení zatím validní pro průmyslovou aplikaci. Rodu *Chlorella*, který byl nasazen v této studii, se dařil růst ve všech čtyřech vzorcích. Nejlepších výsledků bylo však dosaženo ve vzorku 4, kdy exponenciální růstová fáze trvala o den déle, než tomu bylo u ostatních vod. Vhodná možná aplikace se tedy nabízí při aplikaci do provzdušňovacích nádrží, kde by mikrořasa snižovala obsah nutrientů. Dle výsledků se daná aplikace mikrořas hodí nejen na redukci zbytkových živin, ale rovněž jako vstupní surovina pro výrobu biopaliv [16]

Problematikou průmyslových odpadních vod z prasečích jatek se zabývala studie z Thajska. Tyto odpadní vody jsou velmi bohaté na organické sloučeniny, dusík a fosfor, u nichž je známý problém s eutrofizací. Testována byla kultivace ve třech zředěných koncentracích (25 %, 50 % a 75 %). Řasa *Chlorella vulgaris* TISTR8580 dosáhla maximálního růstu pro koncentraci 25 %. Pro 50% koncentraci byla naměřena nejvyšší čistá produkce lipidů v kombinaci s odstraněním živin z odpadní vody [17].

1.2.3 VÝROBA BIOPALIV

Biomasa mikrořas nabízí i možné energetické využití v podobě bionafty a bioplynu, lze ji zužitkovat pro pyrolýzu i výrobu biovodíku [18]. U biopaliv nedochází k další tvorbě emisí kromě těch spojených s jejich výrobou a distribucí. Konverze biomasy na palivo probíhá chemicky, biochemicky, či hybridně.

Dle původu vstupních surovin se biopaliva dělí do čtyř generací. První generací jsou ethanol a bionafta vzniklá rafinací olejů, škrobů a cukrů primárně určených pro produkci potravin. Právě využití zemědělské půdy určené plodinám pro potravinářství, snižuje možný efektivní dopad na redukci fosilních paliv za cenu nedostatku potravin. Druhá generace pro získání ethanolu využívá nekonsumovatelné zemědělské plodiny, či dřevo (lignocelulózu). Lignocelulózová biomasa může být zpracována biorafinací, procesem podobným zpracování surové ropy, kdy je zužitkována každá frakce z biomasy. Dalším často využívaným zdrojem je palmový olej, mající vyšší výtěžnost na plochu než sója, či řepka. Pro třetí generaci biopaliv jsou zdrojem biomasy mikrořasy i makrořasy. Čtvrtou generaci biopaliv pak představují geneticky upravené mikrořasy [19].

Možnost využití bionafty jako paliva není novou ideou. Technologie výroby biodieselu se datuje do minulého století. Při procesu výroby bionafty dochází k chemické reakci transesterifikaci, kdy vstupní surovinou je organický olej. Tento olej je složený z triglyceridů (molekula se třemi mastnými kyselinami), který za přítomnosti katalyzátoru reaguje se třemi molekulami methanolu a vzniká glycerol spolu se třemi molekulami metylesteru mastné kyseliny (bionafta). V praxi je do reakce přiváděn vyšší poměr methanolu pro zajištění tvorby bionafty. Katalyzátory této reakce mohou být kyseliny, zásady i enzymy. Se zásaditými katalyzátory probíhá transesterifikace rychleji. Aby nedocházelo ke zmýdelnění olejů, je nezbytné, aby vstupní suroviny neobsahovaly vlhkost. Obsah lipidů v suché biomase může výjimečně dosahovat až 80 %. Běžné množství se však pohybuje v rozmezí od 20 do 50 %,

⁷ Obohacování vod o živiny, dusík a fosfor, mající za následek hromadný úhyn vodní fauny a flóry

v závislosti na druhu kultivované mikrořasy [18]. Tyto lipidy jsou z 90 až 98 % tvořeny triglyceridy, malé zastoupení tvoří mono a diglyceridy (1–5 %) a další látky. Vyskytovat se v nich může i stopové množství vody [20]. Na výměru využití plochy disponují mikrořasy řádově vyšší produkcí olejnatých složek, která může dosahovat řádově vyšších desítek tisíc litrů na hektar. Palmový olej na stejnou plochu vyprodukuje necelých 6000 litrů [18]. V současné době je potřeba ale nadále věnovat nemalé úsilí vývoji cenově dostupnějších technologií pěstování a sklizení této biomasy a taktéž samotné extrakci lipidů [21].

Bioplyn je dalším slibným zdrojem energie řadící se mezi biopaliva, který je možný získávat z biomasy mikrořas. Kompozice bioplynu sestává převážně z metanu (CH_4), který je i dominantní složkou zemního plynu a oxidu uhličitého. Po oddělení oxidu uhličitého může být zdrojem tepla, elektřiny, či je možné jej zkapalnit do LPG. Bioplyn je získáván anaerobním⁸ rozkladem biomasy bakteriemi a archaei⁹. Složení bioplynu po rozkladu je převážně z metanu (55–70 %), CO_2 (30–45 %), sulfanu (H_2S) ve stovkách ppm, vody, molekulárního kyslíku a dalších stopových uhlovodíků. Pro tvorbu bioplynu je možné zužitkovat i biomasu po extrakci lipidů pro výrobu biodieselu. Obsah proteinů a sacharidů ve zbytkové biomase je dostačující pro biologický rozklad, a tak nekuje potřebu separátní produkce mikrořas pro výrobu bioplynu [22].

Pomocí pyrolýzy je možné z mikrořas extrahovat celou řadu složek ve formě plynu, bio-oleje a pevných složek. Pyrolýza je proces termochemické úpravy biologického materiálu bez přístupu vzduchu za teplot od 300 do 700 °C. Plyná frakce bohatá na oxid uhelnatý (CO), uhličitý, lehké uhlovodíky a vodík je spalována pro dodání potřebného tepla do procesu. Pevná frakce je složena z uhlíku, vodíku a kyslíku. Je rovněž využitelná jako tuhé palivo. Právě kapalná frakce poutá nejvíce pozornosti, jelikož se jedná o přeměnu pevné biomasy na kapalné palivo biologického původu. Pro navýšení podílu kapalně frakce (až 70 %) je vhodná pyrolýza probíhající krátkou dobu za vysokých teplot (500–600 °C). Takto získaná pyrolyzní kapalina je směsicí kyslíkatých sloučenin, vody (15–40 %) a jemných pevných částic. Toto složení dovoluje použití pyrolyzního oleje pro výrobu tepla a elektřiny v kotlích a turbínách [23].

Posledním biopalivem s původem v mikrořasách je překvapivě i vodík. Samotné energetické využití vodíku je jako jedno z mála paliv skutečně uhlíkově neutrální. Výrobu vodíku pomocí mikrořas lze provádět dvěma způsoby. Na světle závislou biofotolýzou, ať už přímou či nepřímou cestou, nebo anaerobní fermentací nevyžadující přístup světla. Biofotolýza je blízce propojená s fotosyntézou, kdy na začátku celého procesu dochází k rozštěpení molekuly vody na molekulární kyslík (O_2) a vodík (H^+). Enzym hydrogenáza je katalyzátorem tvorby H_2 z protonových jader vzniklých rozkladem vody. Uvolněný kyslík potlačuje funkčnost hydrogenázy, a tak i snižuje produkci vodíku. Nepřímá biofotolýza využívá rozkladu škrobu, zásobního cukru z Calvinova cyklu jako dárce elektronů pro produkci H_2 . Dochází k částečnému oddělení vzniku vodíku od fotosyntézy. Tento jev byl pozorován u sinic pohlcujících dusík. Proces anaerobní fermentace pro výrobu vodíku využívá specializovaných bakterií schopných produkovat vodík a oxid uhličitý rozkladem organických sloučenin, především kyseliny pyrohroznové, anebo reoxidací NAD(P)H . Nevýhodou je, že tyto biochemické cesty nejsou vždy ty dominantní a může docházet k tvorbě řady nežádoucích produktů, například alkoholů [24].

⁸ Bez přístupu vzduchu

⁹ Prokaryotické jednobuněčné organismy

1.2.4 POTRAVINÁŘSTVÍ

Biomasa mikrořas je bohatá na základní tři složky stravy, kterými jsou proteiny, lipidy a sacharidy. Neplatí ale všeobecně pro všechny rody mikrořas. Jejich využití v potravinářství je značně limitováno hlavně způsobem pěstování a striktní legislativou. Sinice rodu *Nostoc* a *Arthrospira* jsou konzumovány již po tisíce let [7]. Právě dostatečnou produkci proteinů pro predikovanou populaci světa, která přesahuje 9 miliard lidí, by bylo nezbytné navýšit dvojnásobně. Výhodou proteinu pocházejícího z mikrořas je její nenáročnost na zastavěnou plochu oproti živočišným proteinům, kde je možnost využít i neornou půdu pro kultivaci. Rody *Chlorella* a *Arthrospira* obsahují kvalitní proteiny splňující nároky WHO¹⁰ na esenciální aminokyseliny [25]. Biomasa mikrořas je bohatým zdrojem uhlohydrátů (škrob, celulóza, cukry a další polysacharidy) a lipidů ve formě glycerolu, či nenasycených (omega-3) mastných kyselin vyskytujících se ve vyšších koncentracích než v rybím tuku. Kromě esenciálních složek potravy jsou mikrořasy cenným zdrojem vitamínů a barviv (karotenoidy, chlorofyl, fykobiliny) s antioxidačními vlastnostmi [26].

1.2.5 DALŠÍ MOŽNÉ APLIKACE MIKROŘAS

Kromě již výše jmenovaných aplikací jsou mikrořasy a produkty z jejich biomasy využitelné i v dalších průmyslových odvětvích. Možná uplatnění nachází ve farmaceutické výrobě, v kosmetice, bioplastech, i hnojivech.

MEDICÍNA

Při vystavení stresovým podmínkám dochází u mikrořas k produkci sekundárních metabolitů, kterých by mohlo být a částečně už i je využíváno ve farmaceutickém průmyslu. Mikrořasy skýtají značný potenciál produkce chemických sloučenin, jejichž syntetická výroba je značně složitá. Extrahované produkty z biomasy mikrořas jeví antimikrobiální, antivirozní a též i antimykotické vlastnosti. Neuroprotektivní schopnost byla pozorována u řasy *Arthrospira platensis* v boji s Alzheimerovou a Parkinsonovou chorobou. [27]

KOSMETIKA

V kosmetice nabízí mikrořasy značný potenciál díky své schopnosti regenerace a adaptace na nepříznivé podmínky. Jsou tak vhodnou náhradou syntetických látek poškozujících pokožku. Mikrořasy jsou již součástí vlasových produktů, omlazujících krémů, přípravků na podrážděnou pokožku a řady dalších, [28]

BIOPLASTY

Nejčastějším způsobem využití mikrořas při produkci plastů je jejich mísení s jinými plasty. Vyskytují se jako příměsi plastů mající svůj původ v ropě (plastizace s glycerolem), příměsi do bioplastů (směs s PLA¹¹), či přímo jako výrobní surovina pro PHA¹². [29]

HNOJIVA

Klasická chemická hnojiva často způsobují znečištění vod a půdy. Hnojiva mající původ v mikrořasách jsou přirozeně biologicky rozložitelná a nezávadná. Představují tak bezpečnější a ekologičtější alternativou běžně používaných hnojiv. [28]

¹⁰ Světová zdravotnická organizace

¹¹ Polymlečná kyselina, termoaktivní polyester

¹² Polyhydroxyalkanoáty, polyester produkovaný mikroorganismy

1.3 RŮSTOVÉ FAKTORY MIKROŘAS

Aby kultivace probíhala s co možná nejvyšší výtěžností, je potřeba řasám nastavit ideální růstové podmínky. Podobně jak je tomu u všech organismů. Pouze pokud jsou splněny nezbytné faktory pro přežití, mají možnost prospívat a růst, aniž by bylo ohroženo jejich přežití. Nastavení takových podmínek může značně ovlivnit celkové náklady a ekonomičnost pěstebního procesu. Právě proto je nutné optimalizovat provoz dle typu samotného kultivačního zařízení a konkrétního rodu kultivované mikrořasy. Nejdůležitějšími potřebami, které je zapotřebí zajistit a regulovat ve vhodných mezích jsou:

- Uhlík
- Nutrienty
- Teplota
- pH
- Světlo

Pro některé původně mořské druhy je nezbytné dodržet i salinitu média [30].

1.3.1 UHLÍK

Nejběžnějším způsobem získávání uhlíku pro řasy je fotoautotrofie, ovšem za určitých podmínek může docházet i k heterotrofii, případně mixotrofii¹³. Principu fotoautotrofie, tedy fotosyntéze je věnována následující kapitola. Některé druhy mikrořas disponují schopností extrakce uhlíku přímo z organických sloučenin, obdobně jak tomu je u živočichů. Takovými sloučeninami jsou například methanol, glukóza, či acetát. Heterotrofní zisk uhlíku není přímo vázán na přítomnost světla, jak je tomu u fotoautotrofie. Může tedy probíhat za přímého osvětlení, nebo naopak při jeho úplné absenci. I přes tuto schopnost zůstává nadále nejběžnějším zdrojem uhlíku oxid uhličitý. V některých případech mohou být tímto zdrojem i bikarbonáty (hydrogenuhličitany). Jedná se o aniony solí kyseliny uhličitě (HCO_3^-). [31]

Možnost autotrofní i heterotrofní výživy specifických druhů mikrořas nabízí jejich aplikaci na konkrétní zdroje znečištění. Autotrofní řasy vyživující se z CO_2 jsou vhodným kandidátem pro redukci emisí této látky ze spalin. Při zpracování vyprodukované biomasy na biodiesel je možné dosáhnout téměř nulové uhlíkové stopy. Heterotrofní řasy by zase byly vhodným kandidátem pro redukci nutrientů, organických látek, a dokonce i těžkých kovů z odpadních vod v čistírnách odpadních vod. Právě organické látky, jakými je například octan vápenatý, se jeví jako více než dostačující zdroj uhlíku. [32]

1.3.2 NUTRIENTY

Uhlík je brán jako klíčový prvek pro správný růst mikrořas. Není možné však opomíjet i další prvky nezbytné pro jejich správné fungování. Nutrient označuje právě takové složky, které mohou být jak organické, tak anorganické a jsou nezbytné pro vnitřní pochody v buňkách mikrořas. Jelikož kultivace mikrořas probíhá ve vodním prostředí, musí být tyto látky v něm přímo obsažené, na rozdíl od rostlin, které je přijímají z půdy pomocí kořenů. Vhodná kultivační média musí obsahovat především dusík (N) a fosfor (P). Kromě dusíku a fosforu jsou důležité pro růst i další prvky jakými jsou síra (S), draslík (K), železo (Fe), hořčík (Mg), vápník (Ca) a další prvky vyskytující se ve stopovém množství (Zn, Mo, Co, V) [30]. Obecná molekulová formule biomasy definující minimální prvkové požadavky mikrořas je ve tvaru

¹³ Uhlík je získáván kombinovaně, fotoautotrofně i heterotrofně

$\text{CO}_{0,48}\text{H}_{1,83}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$ [33]. Avšak je zapotřebí jí brát s rezervou, protože každý druh má své specifické požadavky. Celá řada hojně využívaných médií nese specifické označení. Příkladem může být médium BG11, jenž je výživovou směsí pro sladkovodní mikrořasy. Pro velkoobjemovou produkci biomasy z mikrořas nemusí být použity specifických kultivačních médií ekonomicky výhodné. Vhodnou náhradou mohou být zemědělská hnojiva NPK¹⁴, či močovina, obsahující základní nezbytné složky [30].

Dusík je hned po uhlíku nejdůležitějším prvkem pro mikrořasy. V suché biomase se jeho obsah pohybuje od 1 do 14 %. Účastní se syntézy proteinů, nukleových kyselin, vitamínů i fotosyntetických barviv [33]. Při nedostatku dusíku dochází k tvorbě a hromadění energeticky bohatších látek, jakými jsou lipidy. Právě tato stresová podmínka dosahuje nejvyšší účinnosti pro stimulaci tvorby lipidů [31]. Fosfor je rovněž velmi význačným prvkem. Přítomen je v množství buněčných procesů jako je přenos energie, či při syntéze nukleových kyselin [30]. Hlavní výskyt je ve formě fosfátové skupiny (PO_4^{3-}). Koncentrace v suché biomase dosahuje hodnot od 0,05 do 3,3 % [33].

1.3.3 TEPLOTA

Teplota je význačným přírodním faktorem majícím vliv na kultivaci mikrořas. Teplo absorbují řasy radiací, nejčastěji ze zdroje světla. S výkyvy teplot je nutné počítat především v otevřených kultivačních systémech, kde dochází ke značnému zahřívání vlivem slunečního záření a je tedy nezbytné teplotu kontrolovat, aby nedošlo k přehřátí [33]. Pro teplotu nelze přesně určit generalizovaný rozsah. Obdobně jako u dalších faktorů je teplota faktorem individuálním pro každý jeden druh. Pro řasy z rodu *Chlorella* je možné se setkat s kultivační teplotou v rozsahu 20 až 35 °C, kdy maximální výtěžnosti bylo dosahováno kolem 25 °C [34]. Při překročení těchto mezí dochází k degradaci biomasy, k denaturaci esenciálních proteinů a enzymů [31]. Existují však i řasy schopné snášet vyšší teploty nad 40 °C. Jedná se například o rod *Dunaliella*, u kterého došlo sice k poklesu růstu, ale naopak k nárůstu podílu karotenoidů v biomase [34].

1.3.4 pH

Vodíkový exponent označovaný jako pH je jedním ze základních faktorů ovlivňujících metabolické pochody uvnitř mikrořas. Uhlohydráty obsažené v médiu jsou rozkládány na oxid uhličitý, který se nadále účastní fotosyntézy a hydroxyl (OH^-). Právě hydroxyl zvyšuje pH roztoku [34]. Ke stabilizaci je vhodné dostatečné provzdušnění, či zvýšení koncentrace oxidu uhličitého. Mikrořasy jsou citlivé na rozptyl pH kultivačního média. Pro většinu kultivovaných druhů je optimální rozsah od neutrálního po lehce zásadité prostředí (7–10) [33]. Právě řasám rodu *Chlorella* nejvíce vyhovuje pH v rozmezí 7.5–8.5. V lehce zásaditějším prostředí (pH 9–10) se lépe daří rodu *Arthrospira* [31].

1.3.5 SVĚTLO

Světlo je klíčovým faktorem ovlivňujícím kultivaci fotosyntetizujících mikrořas. Je hlavním zdrojem energie pro fotoautotrofní způsob výživy. Fotosyntéza umožňuje mikrořasám přeměnit vzdušný oxid uhličitý a vodu na uhlohydráty a kyslík. Nezbytnou podmínkou je přítomnost světelné energie, která je během tohoto procesu přeměněna na energii chemickou. U dopadajícího světla je velmi důležitá jeho intenzita, tedy energie předaná na metr čtvereční plochy, zároveň je důležité i jeho spektrální složení. Zásadním problémem při pěstování bývá problematika s osvětlením celého objemu mikrořas. S narůstajícím množstvím biomasy se

¹⁴ Třísložkové hojně využívané hnojivo obsahující dusík, fosfor a draslík

médium stává neprůsvitným, dochází u něj k samostínění řasou samotnou. Veškerá energie je pak pohlcena mezní vrstvou v blízkosti zdroje světla a do středu toku, či k řasám pod hladinou u otevřených systémů, se žádného osvětlení nedostává. Fotosyntéza nemůže v těchto částech fotobioreaktorů probíhat a efektivita celé produkce je tak výrazně omezena [31]. Detailněji je princip fotosyntézy popsán v následující kapitole.

Míra intenzity osvětlení je specifická každé řase a každému kultivačnímu zařízení. Při překročení této míry dochází u řasy k fotoinhibici. Fotoinhibicí se rozumí fyziologické poškození vlivem nadměrného slunečního záření. Při tomto jevu dojde ke snížení fotosyntetické kapacity mikrořasy. Nastává nevratné poškození nejcitlivější části fotosyntetického aparátu, kterým je fotosystém II [35]. Kromě intenzity je vhodné stanovit i vhodnou délku osvětlovacího cyklu, takzvanou fotoperiodu. Pro správné fungování fotoautotrofních organismů je střídání světelné a temnotní fáze nezbytné a je též označované jako cirkadiální rytmus, kdy vliv střídání je u mikrořas značný. Když je světelné fáze upřednostněna před temnotní, dochází k posunu reakcí na světlo nezávislých, a tedy k dysbalanci vnitřních procesů, což ale ne vždy musí mít škodlivý dopad na mikrořasu. [36]

Při velkoobjemové kultivaci v otevřených nádržích se využívá převážně přirozeného (slunečního) záření. Toto řešení je sice ekonomicky výhodné, avšak nese s sebou omezení v podobě vlivu počasí (převážně oblačnosti) a rovněž je i nestálé v průběhu roku, kdy délka dne a noci není konstantní [6].

2 FOTOSYNTÉZA MIKROŘAS

Jak již bylo zmíněno, mikrořasy jsou jednoduchými rostlinami a jako takové využívají ke svému růstu proces fotosyntézy. Jedná se o fotoautotrofní způsob výživy. Fotosyntéza, jak je z názvu patrné, je procesem syntetickým, kdy se z anorganických sloučenin, jakými jsou voda (H_2O) a oxid uhličitý (CO_2) přetváří na organické uhlohydráty (CH_2O). Dílčím produktem je zde molekula kyslíku (O_2). Přídomek foto označuje důležitou složku celé reakce, tedy sluneční záření, které je hlavním zdrojem energie pro průběh celého procesu. Tuto reakci je možné zjednodušeně popsat následující rovnicí

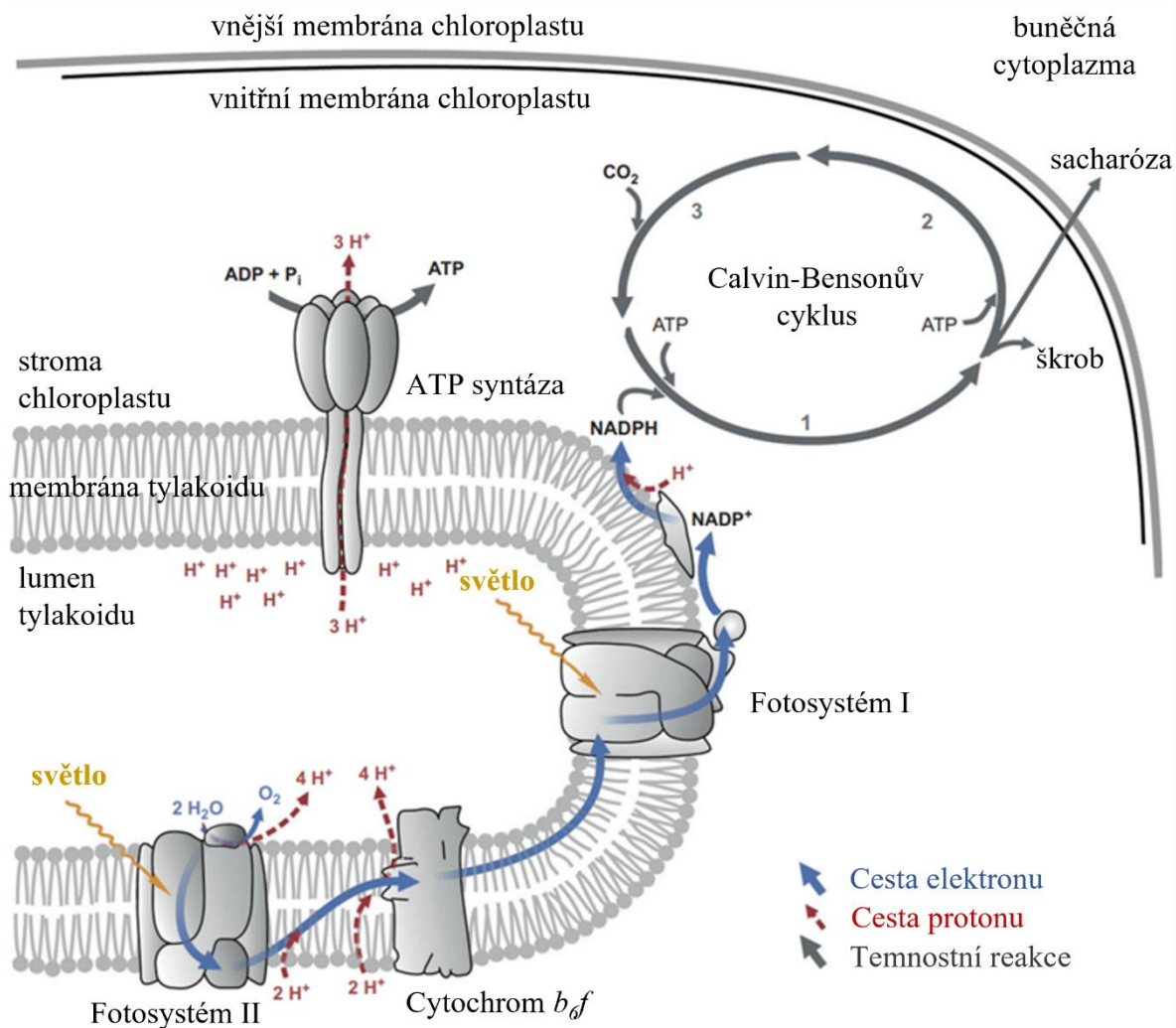


Ať už přímo, či nepřímo je sluneční světlo nezbytné pro existenci života. Zelené organismy, tedy řasy, vyšší rostliny, a i některé bakterie přijímají energii ze Slunce přímo a využívají ji při tvorbě nezbytných látek potřebných pro svůj růst [37]. Živočichové, včetně člověka, energii ze slunce částečně využívají při tvorbě vitamínu D [38]. Nepřímo se produkty fotosyntézy dostávají do těla při konzumaci rostlinných produktů nebo přes prostředníka – býložravce. To samé se dá říci o fosilních palivech jako je ropa, zemní plyn a uhlí. Všechna zmíněná paliva, dnes označovaná jako primární zdroje energie, vznikla rozkladem produktů fotosyntézy před miliony let. Dá se tedy říci, že veškeré dění na planetě by bez přítomnosti slunečního záření nebylo [37].

K absorpci světla u mikrořas a rostlin dochází v chloroplastech. Chloroplasty jsou orgány obsahující zelené barvivo chlorofyl, dávající rostlinám jejich specifické zabarvení. Chlorofyl *a* je nejběžnějším barvivem a vyskytuje se u všech autotrofních produkujících kyslík. Chlorofyl *b*, *c* a *d* doplňují a rozšiřují absorpční spektrum. U fotosyntetizujících cyanobakterií jsou těmito barvivy umožňující fotosyntézu sloučeniny zvané fykobiliny¹⁵ [39].

Obecně je možné proces fotosyntézy rozdělit do dvou celků. Na světelnou a temnostní fázi. Ve světelné fázi dochází k přeměně solární energie na energii chemickou ve formě NADPH a ATP. Při temnostní fázi nevyžadující sluneční svit, dochází k fixaci oxidu uhličitého. Reakce, které během fotosyntézy probíhají uvnitř chloroplastů, jsou zobrazeny na Obr. 1, kde modře je naznačena cesta elektronu od jeho štěpení z molekuly vody skrze Fotosystém II (FS II), přes Cytochrom *b₆f* a následně do Fotosystému I (FS I) až po jeho uložení v molekule NADPH vstupující do Calvin-Bensonova cyklu. Červeně jsou značeny cesty protonů (H^+). Jejich vstup do tylakoidu při štěpení vody a skrze Cytochrom *b₆f* včetně následného opuštění v Syntáze ATP. Šedá barva označuje reakce na světle nezávislé, tedy samotnou reakci v Syntáze ATP a Calvin-Bensonův cyklus, který využívá produkty světelné fáze fotosyntézy k tvorbě cukrů a zásobních škrobů.

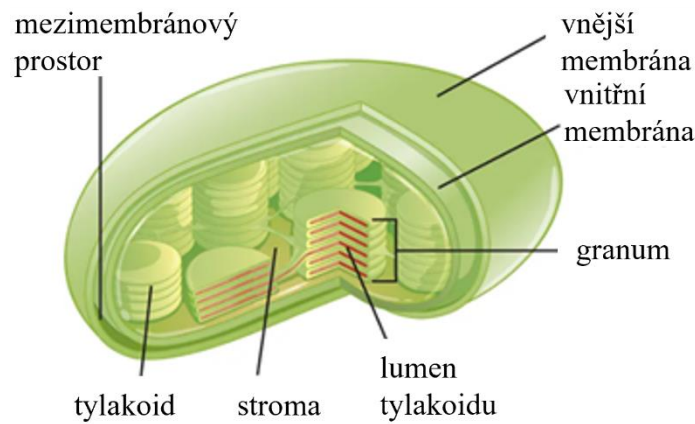
¹⁵ Fotosyntetická barviva cyanobakterií vázaná na fykobiliproteiny



Obr. 1 Na světle závislé a temnostní reakce probíhající v chloroplastu [40]

2.1 SVĚTELNÁ FÁZE

Světlem ovlivněné reakce probíhají na membránách tylakoidů. Právě na tylakoidech (Obr. 2) probíhají reakce fotosyntézy závislé na světle. Samotný tylakoid sestává z již zmíněné membrány a lumenu – dutého prostoru. Tato dutina je vyplněna vodnatými roztoky obsahujícími rozpuštěné soli. Uvnitř chloroplastů se mohou tylakoidy vyskytovat samostatně, či se shlukují do útvarů zvaných grana. Jednotlivá grana bývají u vyšších rostlin vzájemně propojena tylakoidy stromatu nazývaných rovněž jako lamely, vytvářející komplexní strukturu uvnitř chloroplastů [41]. U mikrořas jsou jednotlivé tylakoidy shlukovány do párů, nebo do skupin po třech. Membrána tylakoidu obsahuje vnitřní membránové proteiny nezbytné pro zachytávání světla. Zde probíhají světelné reakce fotosyntézy. Těmito proteinovými komplexy jsou FS II a FS I, Cytochrom *b₆f* a Syntáza ATP. Fotosystémy I a II jsou komplexy proteinopigmentové, mající za cíl zachytit světelnou energii. V Syntáze ATP probíhá reakce fotofosforylace, kdy dojde k obohacení molekuly ADP za vzniku ATP. Cytochrom *b₆f* slouží jako mediátor pro elektronový tok mezi výstupem z komplexu FS II do FS I. Na přenos elektronu skrze FS II a I je vyžadováno dvou fotonů. Pro vznik jedné molekuly kyslíku (O₂) jsou potřeba elektrony čtyři. Celkově si tvorba jedné molekuly kyslíku žádá osmi fotonů [39].



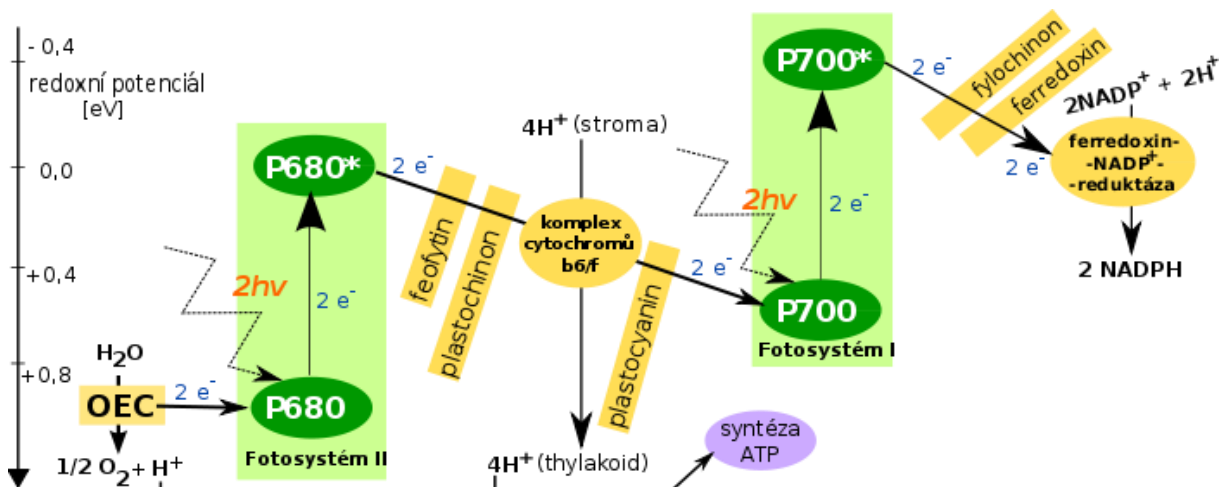
Obr. 2 Stavba chloroplastu [42]

2.1.1 FOTOSYSTÉM II

Proteinový komplex FS II sestává z reakčního centra P680 značeného podle absorpčního maxima, které nastává při vlnové délce 680 nm. Ve FS II dochází k rozštěpení molekuly vody za vzniku molekulárního kyslíku, čtyř protonů (H^+) a čtyř elektronů (e^-) [43]. K absorpci světla dochází v anténách fotosystému, které obsahují světlo pohlcující chlorofyl. Při pohlcení světelné energie dojde k excitaci elektronu uvolněného rozkladem vody do vyšší energetické hladiny a z P680 se stává excitované P680*. Takto excitované elektrony jsou následně uvolněny a putují kaskádou nosičů (feofytin, plastochinon a plastocyanin) přes komplex Cytochromů *b6f* do FS I [44].

2.1.2 FOTOSYSTÉM I

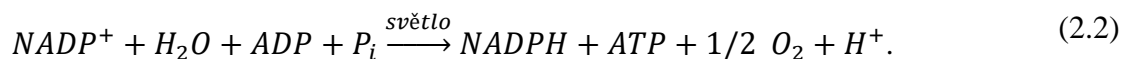
Reakční centrum uvnitř FS I je označeno jako P700, dosahuje tedy svého absorpčního maxima při vlnové délce 700 nm. Obdobně jako v FS II dochází k excitaci P700 na P700*. Emitovaný elektron prochází přes fylochinon a ferredoxin [39]. Tento elektron díky svému vysokému redoxnímu potenciálu je schopen redukovat $NADP^+$ na NADPH. Sloučenina NADPH je hlavním produktem těchto na světle závislých reakcí společně s uvolněným molekulárním kyslíkem. Celý necyklický proces od štěpení molekuly vody až po vznik NADPH je zobrazen na Obr. 3, takzvaném Z-schématu s hladinami redoxního potenciálu v eV.



Obr. 3 Z-schéma světelných reakcí v FS II a FS I [45]

2.1.3 FOTOFOSFORYLACE

Fotofosforylace je syntetickou reakcí ADP a P_i za vzniku ATP probíhající v Syntáze ATP. Fosfátový zbytek P_i je volný pozůstatek po kyselině fosforečné H_3PO_4 . Tato reakce probíhá na základě koncentračního spádu (reakční energie) protonů (H^+), vyskytujících se v lumenu tylakoidu a přecházejících do stromatu chloroplastu [41]. Proces fotofosforylace není na světle přímo závislý, ovšem účastní se jej protony uvolněné za přítomnosti fotonů, a proto i když nepřímo, do reakcí na světle závislých patří. Obecně lze reakci fotofosforylace zapsat jako



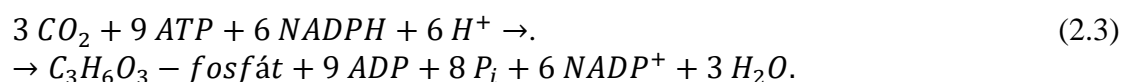
Do lumenu tylakoidu se celkově dostává 12 protonů. Ze štěpení vody za vzniku molekuly kyslíku se uvolní 4 protony. Zbylých 8 protonů přejde ze stromatu do tylakoidu při transportu 4 elektronů skrze cytochrom b_6/f . Tento rozdíl definuje protonový gradient sloužící jako hnací energie při tvorbě ATP v ATP Syntáze. Vznik jedné molekuly ATP vyžaduje 3 protonů [46].

2.2 TEMNOSTNÍ FÁZE

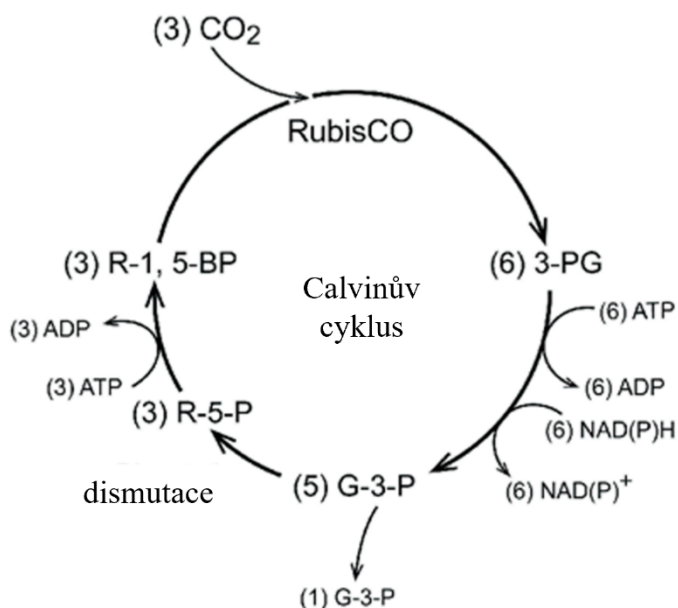
Výsledné produkty z FS I a Syntázy ATP, tedy sloučeniny ATP a NADPH na konci světelné fáze vstupují do stromatu, kde probíhají reakce, které nevyžadují přítomnost světelné energie. Právě ve stromatu dochází k fixaci uhlíku a jeho přeměně na organické sloučeniny – sacharidy. Fixace uhlíku probíhá jako komplex biochemických reakcí probíhajících cyklicky na rozdíl od reakcí vyžadujících přístup světla [41].

2.2.1 CALVINŮV CYKLUS

Někdy též nazývaný jako Calvin–Benson–Bassham, podle spolupracovníků, kteří se rovněž podíleli na tomto objevu. Cyklus byl poprvé popsán v polovině 20. století na kulturách zelených řas, například na rodu *Chlorella* ozařováním radioaktivním uhlíkem. Sumačně lze zapsat temnostní reakce následovně



Molekula oxidu uhličitého do cyklu vstupuje, kde dojde k jejímu navázání na ribulóza-1,5-bisfosfát, sacharid obsahující 5 uhlíků. Tato počáteční fáze je nazývána jako karboxylace, kdy dojde k fixaci CO_2 . Katalyzátorem pro navázání oxidu uhličitého na ribulóza-1,5-bisfosfát je enzym Rubisco. Ke vzniku ribulóza-1,5-bisfosfátu dochází fosforylací, tedy reakcí ribulóza-5-fosfátu s molekulou ATP, která předá jednu svoji fosfátovou skupinu. Vzniklý řetězec je následně rozštěpen na dva tříuhlíkové řetězce kyseliny 3-fosfoglycerové [44]. Po rozštěpení se kyselina fosfoglycerová sloučí s další molekulou ATP, která z cyklu odchází jako ADP. Nově vzniklá sloučenina kyseliny 1,3-difosfoglycerové je redukována NADPH na glyceraldehyd-3-fosfát, kdy dojde k odštěpení jedné fosfátové skupiny a jejímu nahrazení za vodíkové jádro uvolněné z NADPH. Fosfátový zbytek P_i a redukované $NADP^+$ cyklus opouští na konci redukční fáze společně s jednou molekulou glyceraldehyd-3-fosfátu. Zbývajících 5 molekul zůstává nadále uvnitř cyklu [46]. Třetí fází, označovanou jako regenerační, je zpětná syntéza 3 molekul ribulóza-5-fosfátu řadou dílčích reakcí a rekombinací uhlíkových řetězců. Enzymy, transketoláza a aldoláza, hrají nezbytnou roli při přetváření tří-, čtyř-, pěti-, šesti a sedmiuhlíkových fosfátů zpět na vstupní pětiuhlíkový řetězec [41]. Obr. 4 obsahuje zjednodušené schéma průběhu Calvinova cyklu včetně relativních počtů jednotlivých molekul.



Obr. 4 Calvinův cyklus [47]

Hlavním produktem Calvinova cyklu je tříuhlíkový glycerinaldehyd-3-fosfát. Na produkci jednoho sacharidu je zapotřebí fixovat celkem 3 molekuly oxidu uhličitého. Jinak řečeno, je nezbytné, aby celý cyklus proběhl třikrát. Dalšími syntézami, které probíhají již mimo cyklus, dochází k tvorbě cukru a škrobu [44].

2.2.2 FOTORESPIRACE

Enzym *Rubisco* je akronymem pro ribulóza-1,5-bisfosfátkarboxyláza/oxygenáza. Není tedy pouze katalyzátorem karboxylace, ale zároveň i oxygenace. Zda bude enzym fungovat jako oxygenáza či karboxyláza je přímo odvozeno od poměru O_2 a CO_2 . Pokud převládá koncentrace kyslíku nad oxidem uhličitým, je preferována cesta oxygenace. Naopak při vyšší koncentraci CO_2 , bude dominantní reakcí karboxylace [39]. Při oxygenaci dochází k navázání molekuly kyslíku na ribulóza-1,5-bisfosfát namísto CO_2 . Produktem této reakce je jedna molekula kyseliny 3-fosfoglycerové, nikoliv dvě, a molekula 2-fosfoglykolát [46]. Tato sloučenina následně reakcí s H_2O odštěpí fosfátovou skupinu a vzniká glykolát. Glykolát následně putuje do peroxisomů, kde dochází k jeho oxidaci na glyoxylát. Glyoxylát se pomocí transaminace přemění na glycin vstupující do mitochondrií. Uvnitř mitochondrie se dvojice glycinu kondenzuje na serin a souběžně dojde k uvolnění CO_2 a NH_3 . Serin rostliny využívají dvojitým způsobem, jakožto zdroje dusíku pro tvorbu aminokyselin a dalších složitějších látek, zároveň může být transportován nazpět do peroxisomů, kde reaguje s $NAD(P)H$ za vzniku glycerátu. Glycerát je následně transportován do chloroplastu. Reakcí s ATP zreaguje na 3-fosfoglycerát, který regeneruje na již známý ribulóza-1,5-bisfosfát [41]. Molekuly ATP a $NAD(P)H$, účastníci se tohoto procesu, jsou ve výsledku promařeny [46].

Fotorespirace byla dlouhou dobu považována za zbytečný a plýtvavý děj. Děj, při kterém dochází k přeměně organické hmoty na oxid uhličitý bez zjevného přínosu [39]. Při přeměně glycinu vstupují do reakce 4 uhlíky (2 molekuly) a nazpět se navrací jedna molekula 3-fosfoglycerátu. Dochází tedy ke ztrátě jednoho uhlíku, a to ve formě CO_2 . Metabolické ztráty představují i redukce ATP a $NAD(P)H$. Zjevný přínos není zcela známý, avšak má se za to, že procesy a produkty fotorespirace mají své opodstatnění pro děje probíhající v buňkách. Například serin a glycin jsou produkovány nejvíce právě při fotorespiraci [41]. Rovněž by

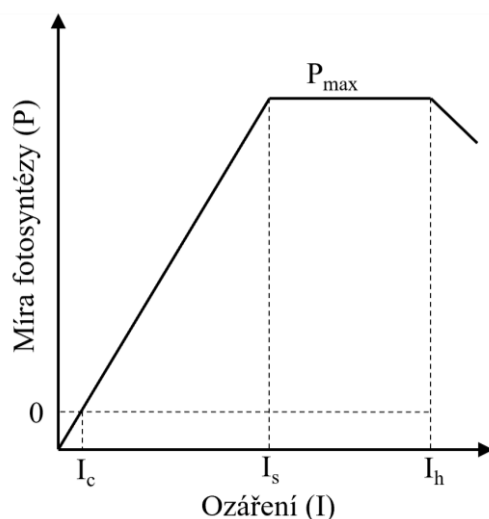
fotorespirace mohla chránit aparát fotosyntézy před poškozením od oxidačních reakcí snižováním obsahu O_2 , ATP a dalších látek [46]. Pro pěstování mikrořas je fotorespirace škodlivým jevem, kultivace je tedy vhodná při zvýšené koncentraci CO_2 v přiváděném vzduchu oproti koncentraci v atmosféře [39].

2.3 EFEKTIVITA FOTOSYNTÉZY

Efektivita fotosyntézy (EF) mikrořas je na rozdíl od rostlin desetinásobná a pohybuje se v rozmezí od 10 do 20 %. Právě díky této vysoké efektivitě jsou mikrořasy schopné extrémního růstu, kdy až dvojnásobí svůj počet během pouhých 24 h. PAR část spektra (400–700 nm) disponuje pouhými 42,3 % celkové vyzařované energie ze Slunce dopadající na povrch Země. K dalším ztrátám dochází při cestě k fotosyntetickému aparátu, kdy se odhaduje pokles na přibližně 25 % z fotoaktivního záření. Jedná se primárně o ztráty odrazem a absorpcí buněčnou stěnou. Tato hodnota se ovšem liší pro jednotlivé zástupce [48].

2.4 VLIV OSVĚTLENÍ NA FOTOSYNTÉZU

Vliv osvětlení na průběh fotosyntézy je nezanedbatelný, avšak jeho přebytek či nedostatek omezují její optimální průběh, tudíž i maximální možnou produkci. Míra fotosyntézy je přímo závislá na fotonovém toku (Obr. 5). Tato křivka umožňuje snadno predikovat model fotosyntézy. S její pomocí je možné určit maximální míru fotosyntézy (P_{max}), i EF ze sklonu křivky fotosyntézy a osvitů. Dle množství osvitů je možné rozlišit tři hlavní oblasti. Na oblast limitovanou množstvím světla, kde se stoupající množství světla je přímo aplikováno pro fotosyntézu. S rostoucím přísunem fotonů souběžně dochází k nárůstu efektivity fotosyntézy řasy. Hodnota kompenzační světelné intenzity I_c značí množství světla, při kterém začínají růst. Saturační intenzita I_s vymezuje druhou hranici světlem limitované oblasti, kdy po jejím překročení nenastává další růst. V této druhé světlem saturované oblasti je dosaženo maximálního fotosyntetického růstového potenciálu mikrořasové kultury a přebytečný fotonový tok se promarní ve formě tepla či světélkováním. Intenzita fotoinhibice I_h označuje začátek fotoinhibiční oblasti, kdy rostoucí množství světla poškozuje buňky mikrořas. Zprvu dochází k poklesu růstu, až po možný zánik celé kultury, usmrcením mikrořasy světlem. [49]

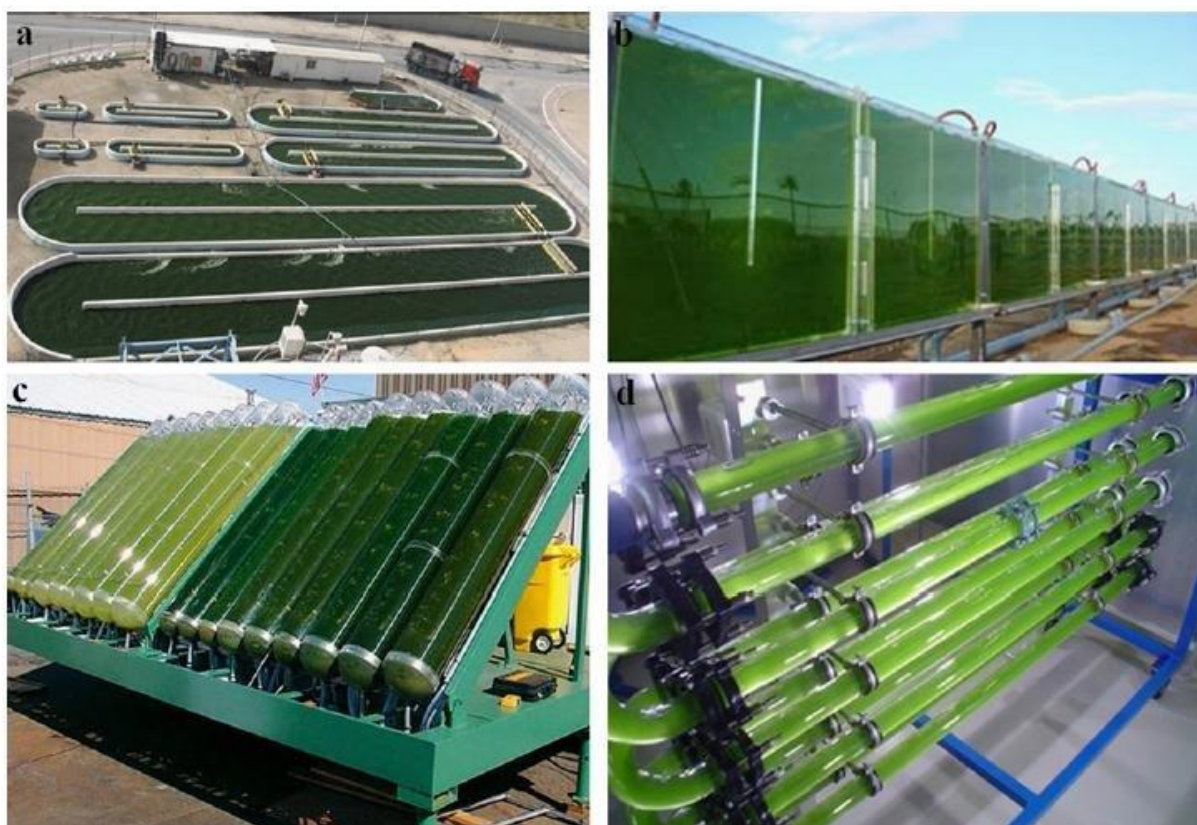


Obr. 5 Křivka závislosti osvitů a fotosyntézy pro mikrořasy

3 OSVĚTLENÍ FOTOBIOREAKTORŮ

Jak již dříve bylo zmíněno je světlo jedním z klíčových, ne-li hlavním faktorem ovlivňujícím kultivaci mikrořas. Proto je při návrhu konstrukce fotobioreaktoru nemalá pozornost věnována právě maximálnímu kontaktu světla s řasami. Stále nejhojnějším zdrojem světlené energie zůstává sluneční světlo. Jedná se o ekonomické řešení, které je ovšem spjaté s několika problémy. Sluneční světlo a jeho intenzita osvitů není konzistentní v průběhu celého dne, neboť je přímo odvozené od pohybu Slunce po obloze. Velký faktor hraje i počasí, oblačnost a roční doba. Umělé zdroje na rozdíl od přirozeného světla umožňují přesnou konfiguraci na požadavky konkrétního zařízení a je možné je dle potřeby dále upravovat. Nezbytné pro provoz umělého osvětlení je potřeba elektrické energie, která zvyšuje investiční i provozní náklady takového zařízení.

Specifické požadavky jsou spjaté i se základním designem fotobioreaktoru. Primární dvě skupiny kultivačních zařízení jsou otevřené a uzavřené systémy. Výběr vhodného řešení je přímo spjatý s klimatickými podmínkami, cenami vody, živin a půdy [50].



Obr. 6 Druhy fotobioreaktorů [51]

a – otevřený traťový, b – deskový, c – válcový, d – trubicový

Na Obr. 6 jsou k nahlédnutí některé vybrané koncepce:

a) Otevřený traťový

Traťový fotobioreaktor je specifický mělkými kanály uzavřených do okruhu, ve kterém cirkuluje médium mikrořas. Médium je promícháváno pomocí pádlových kol, či pump, aby docházelo ke kontaktu mikrořas se slunečním svitem a atmosférickým oxidem uhličitým. [52]

b) Deskový

Podstatou deskového systému jsou tenké ploché desky zajišťující maximální kontakt se slunečním, či umělým světlem. Nejběžněji jsou desky umístěny vertikálně, či pod úhlem pro maximální možný osvit. Stěny takového reaktoru mohou být buď pevné desky nebo flexibilní membrány. [52]

c) Válcový

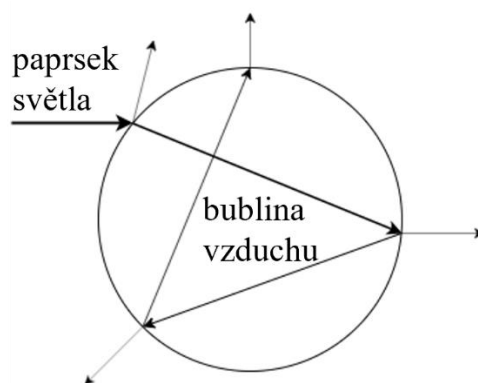
Válcový systém je nejčastěji systémem vsázkovým, což znamená, že veškeré pochody probíhají pouze uvnitř jedné nádoby. Válce fotobioreaktoru jsou většího průměru, než je tomu u trubkového systému. Světlo není takto schopno prosvítit celý objem a je nezbytné médium dostatečně promíchávat například pomocí míchadla umístěného uvnitř nádoby, a také pomocí dostatečného provzdušňování. [52]

d) Trubkový

Hojně využívaný fotobioreaktor pro komerční kultivaci mikrořas sestávající z vertikálně, horizontálně ložených nebo nakloněných trubic. K mísení mikrořas dochází prouděním média trubicemi, jedná se tedy o kontinuální průběžný systém. Osvit u tohoto typu je možný po celém obvodu trubic. [52]

3.1 NEPŘÍZIVNÉ VLIVY MNOŽSTVÍ KULTURY NA OSVĚTLENÍ

Pro optimální provoz fotobioreaktoru by světlo mělo být distribuováno rovnoměrně a pronikat co možná nejvíce do hloubky kultury mikrořas. Na osvětlení mají vliv tři hlavní faktory ovlivňující tyto požadavky. Jedná se o vzdálenost média od zdroje světla, hustota média a bubliny vzduchu v suspenzi mikrořas. Hustota mikrořas má vliv na vzájemné stínění biomasy, ke kterému dochází vlivem blokace světla svrchní vrstvou řas nejbližší ke zdroji světla. K buňkám pod touto vrstvou se nedostává dostatek světla a dochází u nich ke spotřebě kyslíku, která vede až k fotorespiraci. Pronikání světla hlouběji do kultury je možné zvýšením intenzity osvitu, avšak při extrémním přísunu světla dochází k ohřevu média a fotoinhibici. Vlivem vysoké intenzity dochází zároveň i k fotooxidačním procesům, jež poškozují buněčné stěny mikrořas. Bubliny vzduchu rovněž snižují pronikání světla hlouběji do kultury, jelikož dochází k odrazu světla díky lomu na rozhraní vzduch–médium. Na Obr. 7 je vidět, jak část světla na rozhraní se odrazí nazpět do suspenze a část pronikne dovnitř bubliny, kde se nadále odráží a s každým odrazem ztrácí na intenzitě. [53]



Obr. 7 Odraz světla v bublině vzduchu [53]

3.2 ENERGIE VE SVĚTLE

Světlo je elektromagnetickou vlnou definovanou svojí rychlostí c , vlnovou délkou λ a frekvencí f , a jako takové je kvantováno. Kvantování znamená, že veličina nabývá pouze jisté elementární hodnoty, či jejích celočíselných n -násobků. Elementárním množstvím (kvantem) elektromagnetického záření (světla) je částice zvaná foton. Energie obsažená v jednom kvantu světelné vlny je dána následujícím vztahem

$$E = h \cdot f. \quad (3.1)$$

Kde: h Planckova konstanta [J·s], [eV·s]
 f frekvence světelné vlny [Hz], [s⁻¹]

Planckova konstanta má hodnotu $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. Frekvence spolu s rychlostí a vlnovou délkou vzájemně souvisí dle vztahu

$$f = \frac{c}{\lambda}. \quad (3.2)$$

Pomocí vztahu (3.2) je možné rovnici (3.1) upravit do následující podoby a vyjádřit z ní energii nesenou fotonem červeného (650 nm) a modrého (450 nm) záření pro rychlost světla $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [54]

$$E_{\check{c}} = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{2,998 \cdot 10^8}{650 \cdot 10^{-9}} = 3,024 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (3.3)$$

$$E_m = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{2,998 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} = 4,427 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (3.4)$$

Z energetických hodnot nesených fotonem červeného a modrého světla je zřejmé, že foton vlnové délky 650 nm (červené světlo) dosahuje jen 68,8 % energie nesoucí foton vlnové délky 450 nm (modré světlo). Pro kultivační a pěstitecké účely je množství dopadajících fotonů uváděno v mikromolech. K určení množství fotonů v jednom μm dopadajícího světla se využívá Avogadrovy konstanty $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Po úpravě jednotek je možné určit počet fotonů v jednom μmol světla dle vztahu

$$n = \frac{n_m \cdot N_A}{10^6} = \frac{1 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{10^6} = 6,023 \cdot 10^{17} \text{ fotonů}. \quad (3.5)$$

S počtem fotonů v jednom μmol a energií nesené jedním fotonem je možné určit i celkovou energii dopadajícího světla. Energie fotonů v jednom μmol dopadajícího světla v závislosti na vlnové délce činí:

$$E_{\check{c},m} = n \cdot E_{\check{c}} = 6,023 \cdot 10^{17} \cdot 3,024 \cdot 10^{-19} = 0,0184 \text{ J} \quad (3.6)$$

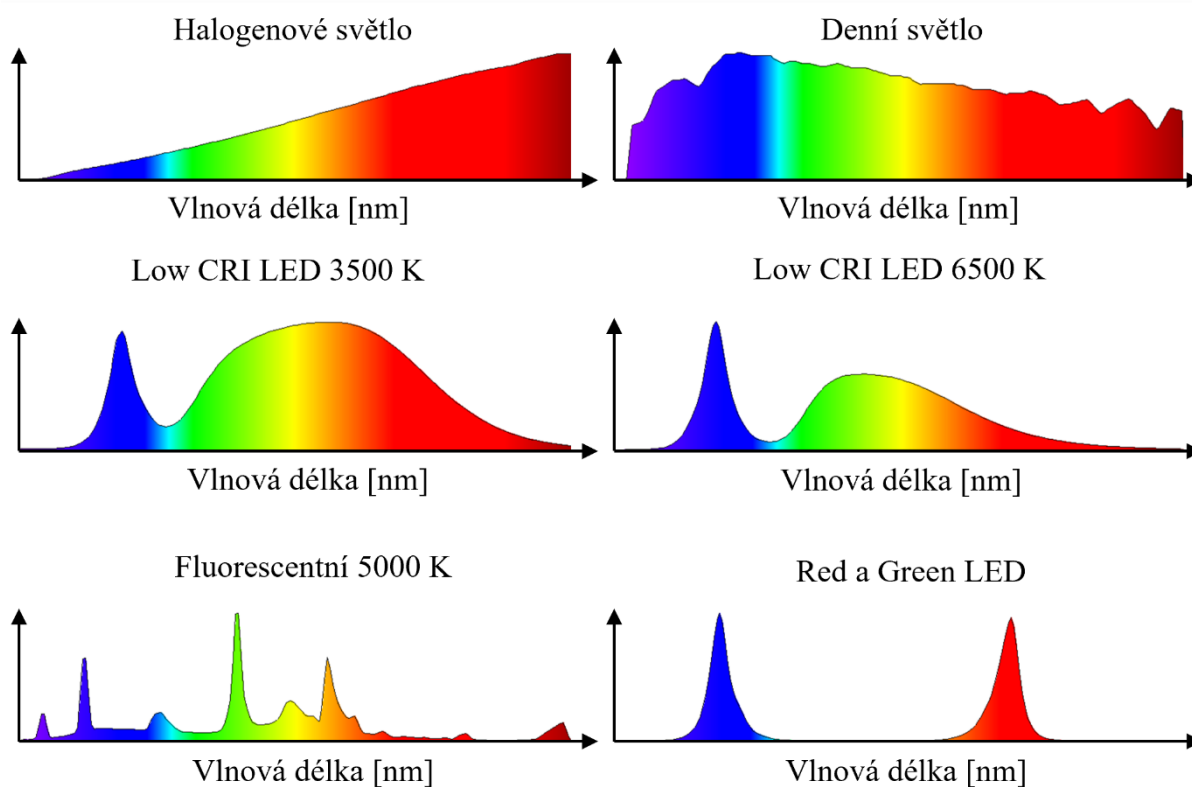
$$E_{m,m} = n \cdot E_m = 6,023 \cdot 10^{17} \cdot 4,427 \cdot 10^{-19} = 0,0266 \text{ J} \quad (3.7)$$

3.3 PARAMETRY OSVĚTLENÍ

Světelné zdroje pro kultivaci mikrořas je možné popsat celou řadou parametrů, ať už jsou to parametry světelné, či elektrické. Mezi nejdůležitější světelné parametry spadá světelný tok, spektrální složení světla, barevná teplota, PAR a intenzita fotosyntetického fotonového toku, či index podání barev. Elektrické parametry charakterizují energetické nároky na provoz, jakými jsou příkon, napětí a proud. Životnost světelného zdroje udává dobu provozu, během které zdroj splňuje stanovené parametry. Pro potřeby fotobioreaktorů může být vhodnou metrikou i stupeň krytí udávající odolnost proti vniknutí cizího tělesa (například prachových částic) a vniknutí kapaliny pro zdroje umístěné přímo v médiu i mimo něj.

3.3.1 SPEKTRUM

Elektromagnetické spektrum popisuje rozložení elektromagnetického záření dle vlnové délky a frekvence. Rozsah spektra se uvádí od γ -záření s vlnovými délkami 1 pm (10^{-16} , velikost atomů) až po rádiové vlny s vlnovými délkami v řádech 10^8 m (100 000 km). Ovšem nejedná se o striktní vymezení, jelikož elektromagnetické vlny nemají žádnou základní spodní, či horní hranici [54]. Pro účely kultivace řas však má smysl pozorovat toto spektrum pouze v oblasti viditelného světla, kde dochází k absorpci světelné energie pomocí fotosyntetických barviv. Každý světelný zářič disponuje svým specifickým spektrálním složením, které není napříč všemi vlnovými délkami konstantní, ale má proměnlivý charakter. Stejně je tomu i u fotosyntetických barviv, které mají absorpční maxima distribuována napříč spektrem. Pro optimální kultivaci je tedy vhodné vybírat takové světelné zdroje, jenž disponují spektrálním složením, které co možná nejlépe překrývá absorpční profil barviv obsažených v kultivované mikrořase. Na Obr. 8 jsou zobrazeny spektrální složení nejběžnějších světelných zdrojů včetně denního světla.



Obr. 8 Spektra nejběžnějších světelných zdrojů [55]

3.3.2 SVĚTELNÝ TOK

Světelný tok $\Phi(\lambda)$ představuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek, respektive vjem. Měrnou jednotkou této světelně technické veličiny je lumen (lm). Pro monochromatické záření s vlnovou délkou λ a zářivým tokem Φ_e se světelný tok určí dle vztahu

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda). \quad (3.8)$$

Kde: $K(\lambda)$ světelný účinek monochromatického záření [$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$]
 K_m maximální hodnota spektrálního průběhu $K(\lambda)$ [$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$]
 $V(\lambda)$ poměrná světelná účinnost [-]
 Φ_e zářivý tok [W]

Světelný účinek monochromatického záření je daný součinem maximální hodnoty spektrálního průběhu $K(\lambda)$ a poměrné světelné účinnosti dle následujícího vztahu

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda). \quad (3.9)$$

$V(\lambda)$ je veličina poměrné světelné účinnosti monochromatického záření daná vztahem

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}. \quad (3.10)$$

Maximum světelné účinnosti záření $K(\lambda)$ značená K_m , které odpovídá monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky $\lambda = \lambda_m = 555,0155 \text{ nm}$ bylo mezinárodními orgány ISO a CIE v souladu s definicí kandely (cd) schváleno, že dosahuje při fotopickém (denním) vidění pro normálního fotometrického pozorovatele hodnoty $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. [56]

Veličiny $V(\lambda)$ a $K(\lambda)$ definované pro fotoskopické vidění, jsou i pro skotopické (noční) vidění stanoveny veličiny $V'(\lambda)$ a $K'(\lambda)$. Z definice kandely vyplývá, že důležitý důsledek pro záření základní vlnové délky $555,0155 \text{ nm}$ je světelný účinek záření při fotopickém i skotopickém vidění shodný. Taktéž i spektrální citlivost je shodná. Platí závislost:

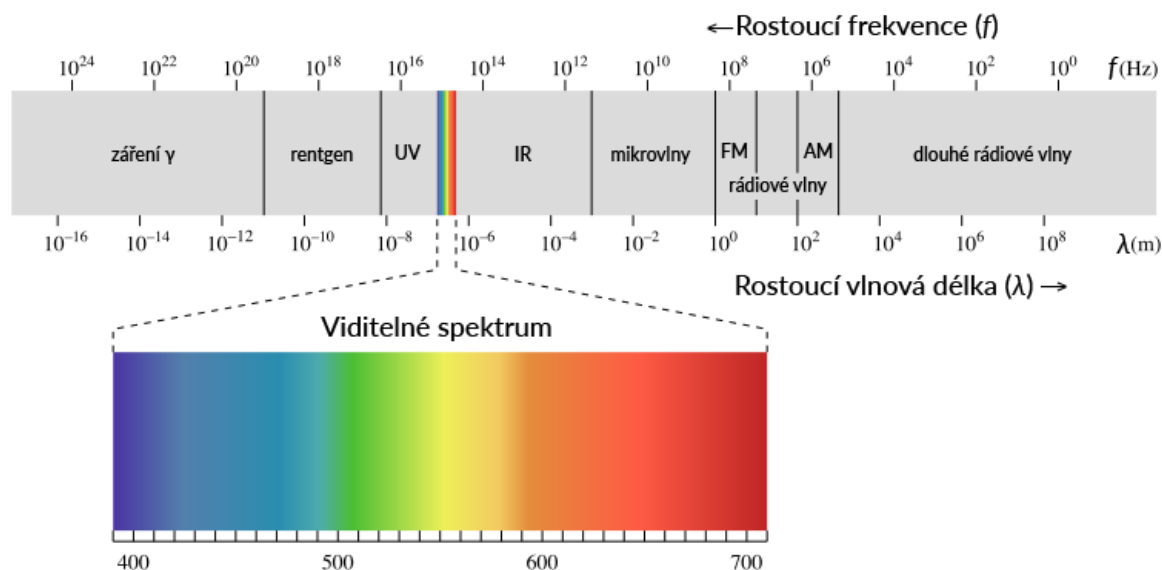
$$K(555,0155) = K'(555,0155) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}. \quad (3.11)$$

V těchto stavech vidění je proto možné pracovat se světelnými toky uváděnými v lumenech. [56]

3.3.3 FOTOSYNTETICKY AKTIVNÍ ZÁŘENÍ

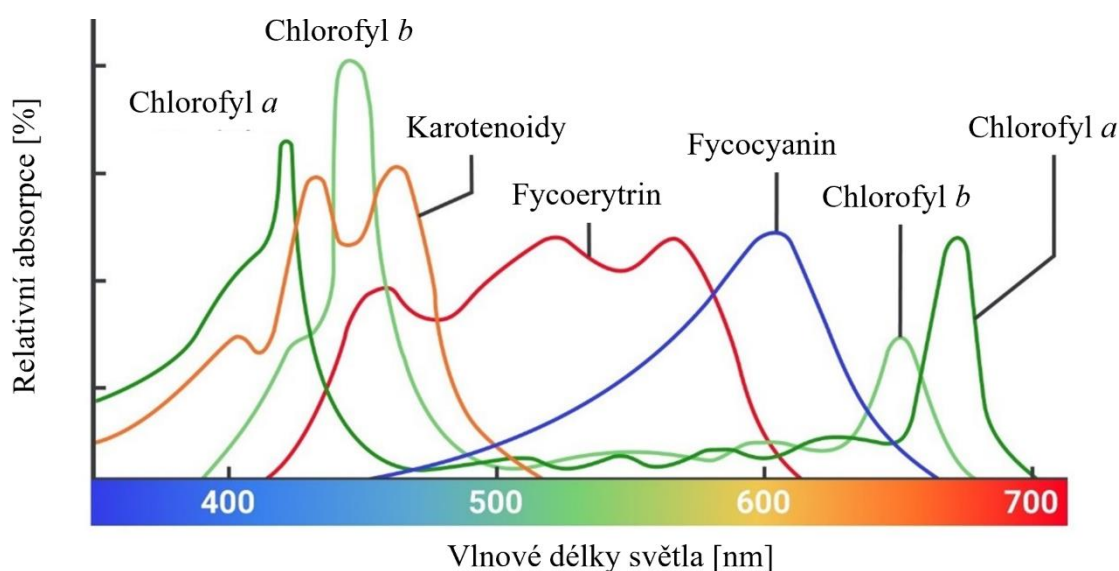
Části elektromagnetického záření využitelného k fotosyntéze se říká fotosynteticky aktivní záření (PAR¹⁶). Fotosynteticky aktivní záření se svým spektrálním rozsahem vlnových délek nachází ve viditelné části elektromagnetického spektra (přibližně 380–750 nm) [49]. Ve viditelném spektru (Obr. 9) je PAR vymezeno vlnovou délkou 400–700 nm [57]. Kratší vlnové délky (UV záření) disponují sice vyšší energií, avšak poškozují buňky a tkáň. Většina tohoto škodlivého záření je zachycena ozónovou vrstvou ve stratosféře. Naopak fotony infračerveného záření nedisponují dostatečným množstvím energie, aby efektivně ovlivňovaly fotosyntézu. [49].

¹⁶ Photosynthetic active radiation



Obr. 9 Elektromagnetické spektrum s vyznačeným viditelným spektrem [58]

K zachycení PAR u fototrofních organismů dochází pomocí fotosyntetických barviv. Nejčastěji se jedná o chlorofyl specifický svým zeleným zabarvením, které je charakteristickým znakem většiny fototrofních organismů. Toto zabarvení vzniká absorpcí světla barvivem v červené (620–750 nm) a modré (450–495 nm) části spektra, kdy vlnové délky v zelené části spektra jsou absorbovány pouze minimálně. Karotenoidy, hlavně β -karoten, dosahují absorpčního maxima v modré a částečně v zelené části spektra. Organismy obsahující toto barvivo jsou proto zbarveny do odstínu oranžové a červené barvy. Fykocyanin a fykoerytrin patří do skupiny barviv zvané fykobiliny, vyskytující se převážně v cyanobakteriích, jejichž název je od fykocyaninu odvozen [59]. Na Obr. 10 je v procentech zobrazena relativní absorpce nejvýznamnějších barviv v závislosti na vlnové délce



Obr. 10 Relativní absorpce fotosyntetických barviv [60]

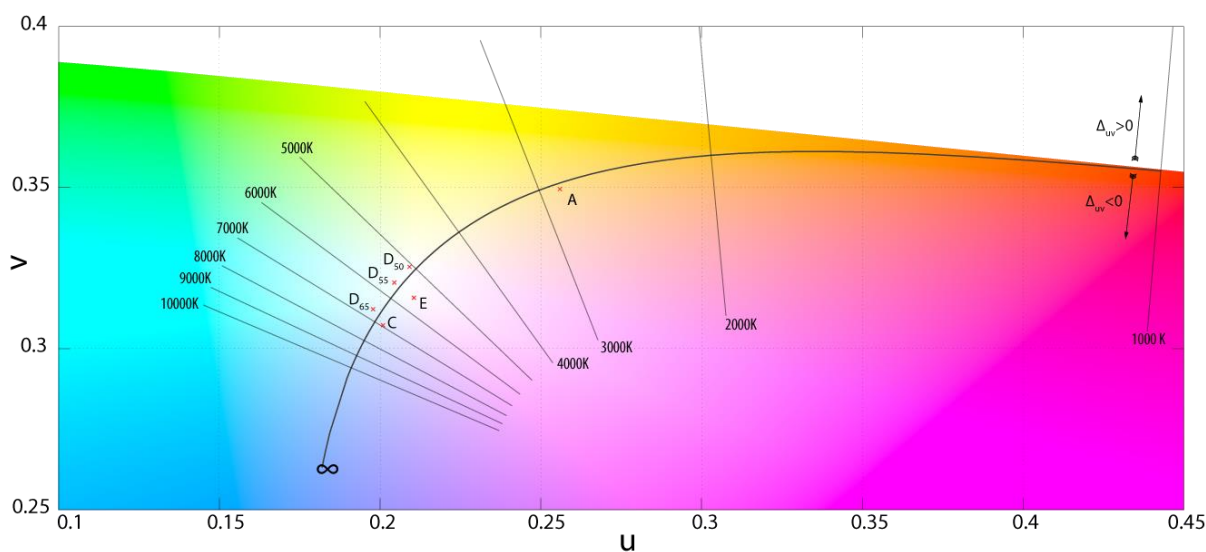
3.3.4 INTENZITA FOTOSYNTETICKÉHO FOTONOVÉHO TOKU

Pro pochopení intenzity fotosyntetického fotonového toku, ve zkratce PPF (Photosynthetic Photon Flux Density), je prvotně nezbytné určit fotosyntetický fotonový tok značený PPF (Photosynthetic Photon Flux). PPF je definováno jako množství produkovaných PAR fotonů světelným zdrojem za jednotku času–sekundu [61]. Jedná se o způsob kvantifikace produkovaného použitelného záření ze zdroje pro kultivaci. Měrnou jednotkou PPF jsou mikromoly světla za sekundu ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$).

Intenzita fotosyntetického fotonového toku je PPF vztažené na jednotku plochy, nejčastěji metr čtverečný. Určuje, jaké množství PAR fotonů dopadá na konkrétní pěstební plochu [61]. Jednotkou PPF je mikromol na metr čtvereční za sekundu ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Alternativní, dříve často využívanou jednotkou pro tuto veličinu, byly mikroeinsteiny na metr čtvereční za sekundu ($\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Jednotka Einstein nepatří do soustavy SI [62].

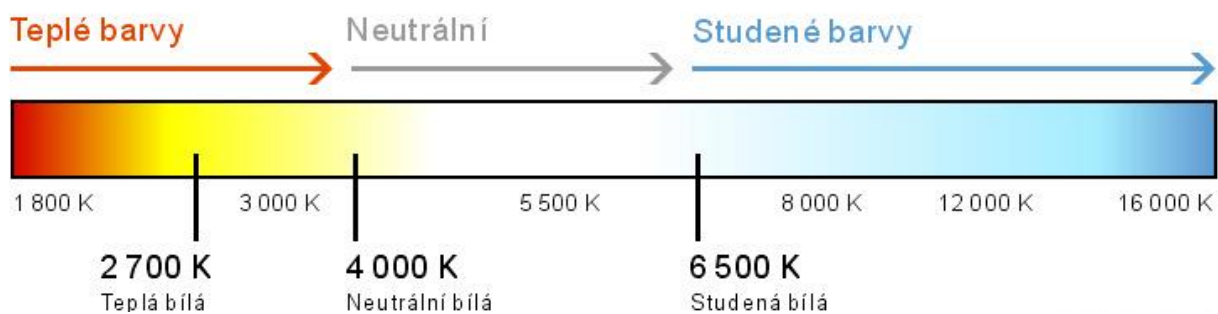
3.3.5 BAREVNÁ TEPLOTA

Barevná teplota, či teplota chromatičnosti (značení T_c) je charakteristikou světla se spektrem blízkým spektru dokonale černého tělesa. Je to teplota světla rovná teplotě černého zářiče se stejnou chromatičností uvažovaného záření. Jednotkou teploty chromatičnosti je kelvin (K). Je možné se často setkat i s převrácenou hodnotou přenásobenou milionem která se uvádí v megakelvinech na $-1(\text{MK}^{-1})$. [56]



Obr. 11 CIE 1960 Diagram chromatičnosti s čarami konstantní teploty chromatičnosti [63]

Náhradní teplotou chromatičnosti disponují výbojové, luminiscenční a „bílé“ LED zdroje. Klasické dělení s nejběžnějšími mezemi je na teplou (2700–4000 K), neutrální (4000–6500 K) a studenou (nad 6500 K). Dělení je možné i jen a pouze na teplé a studené [64]. Toto kontrainuitivní dělení je spjaté s relativním vnímáním teploty daného odstínu světla, kdy studené světlo koresponduje s vyšší teplotou na chromatické teplotní stupnici. Stupnice vyjadřující závislost barevného tónu světla pro konkrétní teploty chromatičnosti je zobrazena na Obr. 12.



Obr. 12 Stupnice barevného vjemu dle teploty chromatičnosti [64]

3.3.6 INDEX PODÁNÍ BAREV

Podání barev je vjemem barvy určitého předmětu. Podmíněno je spektrálním složením záření osvětlujícím předmět, spektrálním činitelem odrazu, prostupem světla osvětlovaného předmětu, a i zrakem samotným. Pro vjem v přirozeném i umělém světle došlo k dlouhodobému návyku na vzhled předmětu, a tak je považován za normální. Vlivem tohoto zvyku dochází ke zkreslení přijímaní barev při iluminaci předmětů výbojovým světlem, jelikož disponuje odlišným spektrálním složením od teplotních zdrojů. Podání barev charakterizuje tento vliv dle spektrálního složení světelných zdrojů. Index podání barev je číselným zhodnocením jakosti podání barev. Jedná se o stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených smluvním zdrojem světla za stanovených podmínek s barvou předmětů ozařovaných uvažovaným zdrojem. Metodika porovnání je založena na porovnání rozdílů (jeho číselném vyjádření) 8 až 14 barevných vzorků při postupném osvětlení uvažovaným a smluvním zdrojem světla. Výpočtem je stanoven všeobecný index podání barev R_a . Je možný i podrobnější rozbor pro jednotlivé barevné vzorky stanovením speciálních indexů podání barev R_1 , R_2 atd. Předpokladem je, že teplota chromatičnosti obou zdrojů se liší nejvýše o 5 MK^{-1} , což pro rozdílné náhradní teploty chromatičnosti odpovídá jiným rozdílům. Srovnávací zdroje nejsou pro celý rozsah náhradní teploty chromatičnosti totožné. Při teplotách do 5000 K se využívá teplotních zdrojů. Nad 5000 K je třeba využít zdrojů se spektrálním složením odpovídajícím smluvnímu bílému světlu. Rozsah hodnot R_a se pohybuje od 0 do 100, kdy hodnota 100 odpovídá reálným barvám předmětu. [56]

U fluorescenčních a LED zdrojů je charakter spektrálního složení nestálý s výraznými změnami napříč spektrem. Takové rozložení komplikuje hodnocení podání barev, kdy nemusí být všechny barevné vzorky speciálních indexů podání barvy plně saturované. Tento problém nastává hlavně u RGB (Red, Green and Blue) LED, kdy je bílé světlo a ostatní zabarvení tvořeno skládáním tří primárních vlnových délek (červená, zelená a modrá). [65]

3.4 SVĚTELNÉ ZDROJE

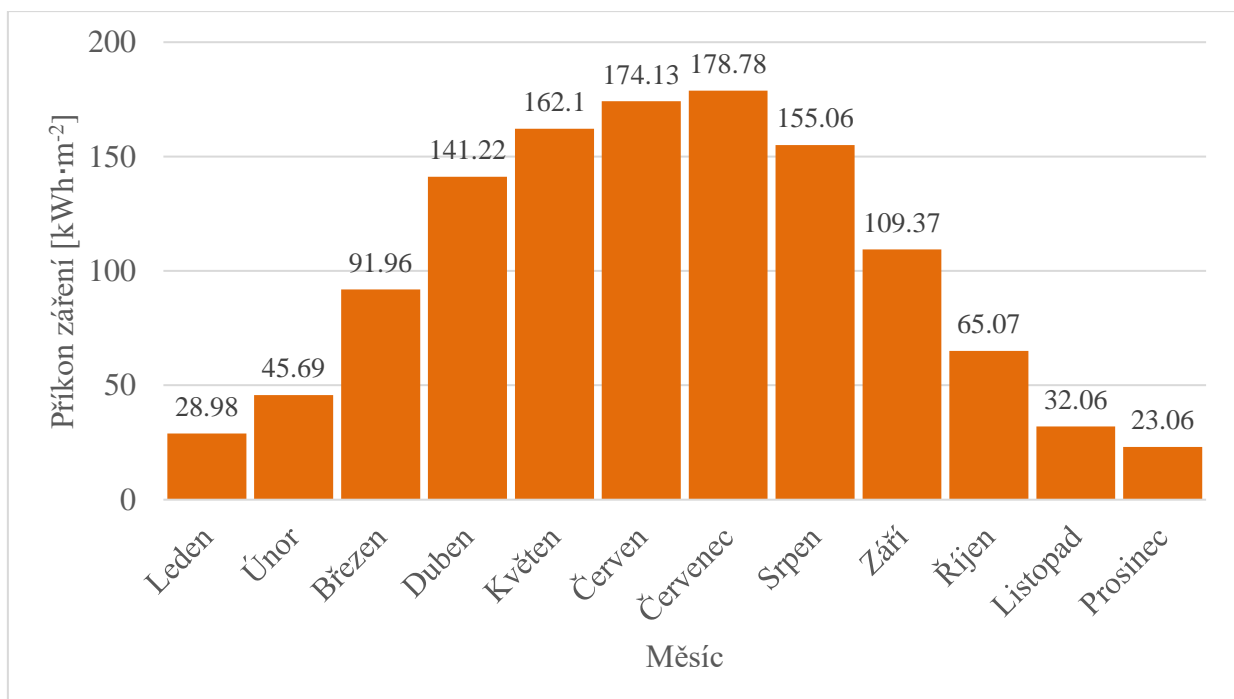
Význam světla při kultivaci mikrořas pomocí fotobioreaktoru byl již popsán z hlediska vlivu na samotnou fotosyntézu. Rovněž byly popsány klíčové parametry, kterými by mělo vhodné světlo disponovat, aby růst řas byl co možná nejvíce optimální z hlediska časového, ekonomického i ekologického. Vhodnost zdroje světla pro kultivaci určuje řada faktorů, jakými jsou například vysoká elektrická účinnost, minimální vyzařování tepla, spolehlivost, odolnost, životnost, nízké náklady, kompaktnost a samozřejmě vhodné světelně technologické parametry (spektrální složení apod.). Tento výběr je specifický pro konkrétní druh kultivované mikrořasy. Typ a intenzita světelného zdroje, tedy spektrální kvalita a kvantita světla jsou důležitými parametry řasového růstu a metabolismu. [49]

3.4.1 DENNÍ SVĚTLO

Přírodní (přirozené, denní) světlo je nejdostupnějším zdrojem světla a poskytuje snadný a ekonomicky nenáročný způsob osvětlení pro růst mikrořas. Hlavní nevýhodou je však jeho časová nestálost, která je ovlivněna rotací planety kolem své vlastní osy, kolem Slunce, oblačností a dalšími vlivy spojenými nejen s počasím. Sluneční světlo je světlem širokospektrálním pokrývajícím celý rozsah viditelného záření dosahující maxima pro 450 nm. Povrchová teplota odpovídá přibližně 5800 K, a vyzařované spektrum je tedy shodné s černým tělesem o teplotě 5800 K. Příkon celkového slunečního ozáření dosahuje pravděpodobně hodnoty $1360,8 \pm 0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dopadající na svrchní vrstvu atmosféry. Dle měření ve studii z roku 2011 došlo k její úpravě dříve užívané hodnoty $1365,4 \pm 1,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [66]. Při průchodu atmosférou dojde ke změně spektra absorpcí a rozptylem. Pro bezoblačnou atmosféru dojde k poklesu u přímého paprsku na přibližně $1050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $1120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na vodorovném povrchu na úrovni terénu [67]. Rozsah intenzity dopadajícího světla na čtvereční metr se pohybuje v rozsahu 0 až 120000 lux ($\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$) [68].

ROČNÍ OSVIT

Jelikož Země v průběhu roku při oběhu kolem Slunce mění svoji vzdálenost a úhel náklonu, mění se i množství dopadající sluneční energie na povrch. Rozložení sluneční energie na povrchu planety se výrazně mění i se zeměpisnou šířkou, kdy přirozeně vyšší výkony jsou naměřeny v rovníkové oblasti a směrem k pólům intenzita záření postupně klesá. Nemalý vliv má i nadmořská výška dané lokality, kdy náhorní oblasti disponují znatelně vyššími hodnotami. Na Obr. 13 je zobrazena roční distribuce světelných příkonů během jednotlivých měsíců v lokalitě pracoviště NETME v areálu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Data jsou získána měřeními družice PVGIS-SARAH2 pro náklon 0° (vodorovně ložené) a orientaci přímo na jih (normála). Z histogramu je zřejmé, že nejvyšší míra ozáření na plochu je během jarních a letních měsíců. Nejnižší je naopak v zimních měsících [69].



Obr. 13 Roční distribuce příkonu světla v $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ [69]

Tab. 2 obsahuje celkové počty hodin slunečního svitu pro jednotlivé měsíce během roku.

Tab. 2 Průměrný měsíční sluneční svit v hodinách [70]

Měsíc	Průměrný počet hodin slunečního svitu v daném měsíci [h]												Σ (h·rok ⁻¹)
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Počet hodin	41	67	127	159	224	218	212	219	155	117	44	37	1620

Z dat z Tab. 2 a Obr. 13 je možné určit rozsah hodinového světelného příkonu dopadajícího světla, a to v rozsahu do 556 Wh v říjnu až po 888 Wh v dubnu. Tato data vychází z dlouhodobých průměrů, a tak se jen stěží dá určit vliv ostatních faktorů (například oblačnost). Jedná se spíše o orientační hodnoty, a tedy je třeba brát je s rezervou.

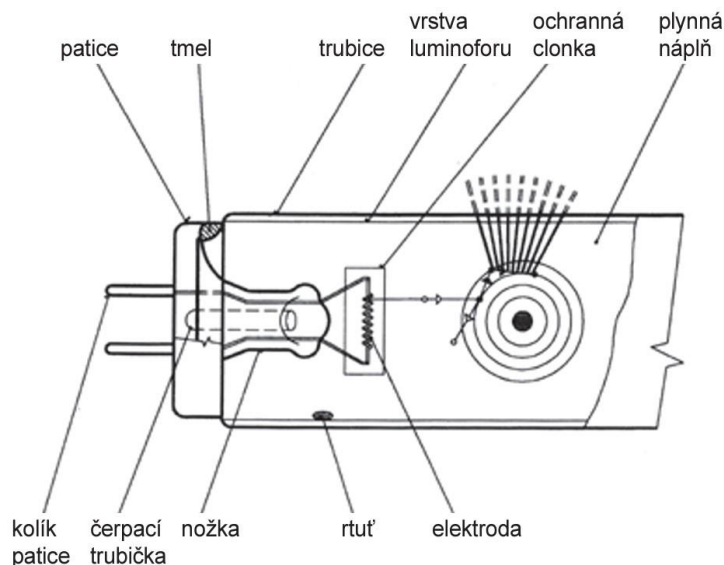
SVĚTLOVOD

Kultivační systémy s denním světlem využívají přístupu řas ke světlu co možná největší plochou. Zcela odlišným způsobem je přívod co možná nejvíce světla k řasám, čehož je možné dosáhnout například pomocí světlovodů. U světlovodu dochází k zachycení slunečního záření prostřednictvím například parabolických solárních antén, či Fresnelových čoček, které slouží jako koncentrátoři záření. Z nich je následně vedeno sluneční světlo pomocí koridorů z vysoceodrazivých materiálů do vnitřních prostor reaktorů. Zjevnou výhodou je vyšší odolnost proti vlivům počasí, než je tomu u kultivačních zařízení. Rovněž je možné lépe oddělit složky slunečního záření, které nejsou součástí PAR (infračervené záření) a využít je pro rekuperaci energie. U starších reflektivních materiálů však docházelo vlivem vedení světla až k 50% ztrátám [71]. Moderní systémy, například světlovody SUNPIPE® dodávané společností ABC s.r.o., vykazují ztráty vlivem odrazu pouhých 2 % [72]. Vlivem ceny celého osvětlovacího systému se toto řešení v současném stavu nejeví jako ekonomicky výhodné pro velkoobjemovou produkci.

3.4.2 ZÁŘIVKY

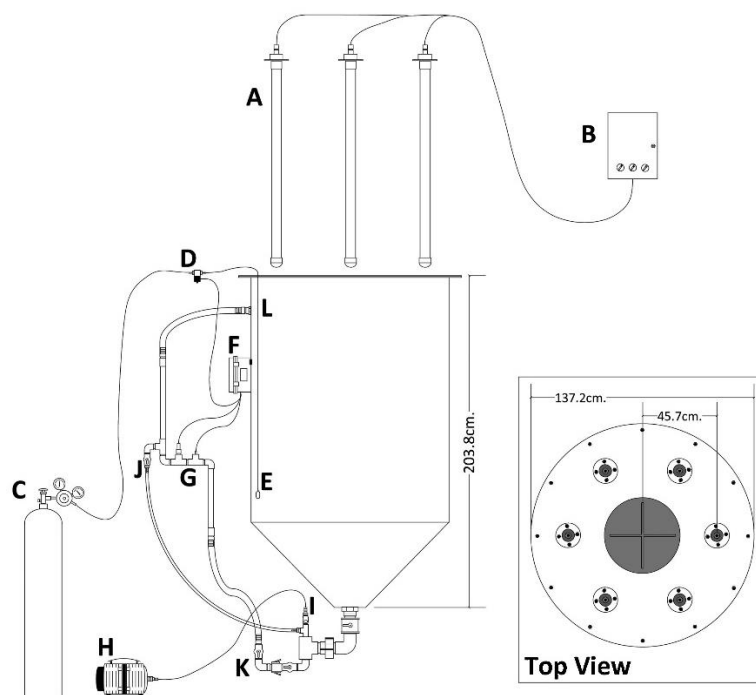
Zářivka je výbojovým zdrojem světla označujícím nízkotlaké rtuťové výbojky. K produkci viditelného světla dochází úpravou ultrafialového záření z výboje vrstvou, či více vrstvami luminoforu¹⁷. Základní dělení dle konstrukce je na lineární a kompaktní zářivky. Lineární zářivky jsou trubicové světelné zdroje, kompaktní naopak jsou různě tvarované (například do tvaru U). Díky novým konstrukčním materiálům (hlavně luminoforu) a elektrotechnickým součástkám se zářivky staly úspornějšími a umožnily vznik kompaktních zářivek, které se klasifikují jako separátní skupina nízkotlakých světelných zdrojů. Spektrální složení produkovaného světla je závislé na použitém druhu luminoforu. Rovněž ovlivňuje i měrný výkon tohoto zdroje a index podání barev. Současné fluorescenční zdroje dosahují měrného výkonu 100 lm·W⁻¹ a R_a přesahující hodnotu 80. Základním rysem zářivek je trubice z měkkého skla, na jejíž vnitřní straně je v jedné, či více vrstvách nanesen luminofor. Konce trubice jsou osazeny wolframovou elektrodou obalenou v oxidech vápníku a barya. Okolo elektrody se nachází ochranná kovová clonka proti usazování emisní hmoty z luminoforu. Zároveň stabilizuje světelný tok při svícení. Celá vnitřní konstrukce zářivky je na Obr. 14. [73], [74]

¹⁷ Látka emitující pohlcenou energii záření ve formě světla



Obr. 14 Konstrukce zářivky [73]

Světlo vzniká výbojem, který probíhá v nasycených parách rtuti za tlaku cca 0,8 Pa. Tento tlak odpovídá teplotě nejnižšího místa zářivky (cca 42 °C) v inertním plynu a zabraňuje prudkému rozptylování emisní hmoty luminoforu. Nezbytnou součástí pro správné fungování zářivky je rtuť, avšak je jí ve svítidle obsaženo velice malé množství (3 mg). S rtutí jsou spojeny komplikace při výrobě i likvidaci, jelikož se jedná o toxickou látku. Během provozu fluorescenčního zdroje dochází k úbytku rtuti (například kontaktem s prvky obsaženými ve skleněné trubici), je tedy nezbytné při výrobě dodávat přebytek této látky. Obecně se dají zářivky charakterizovat jako ekologický světelný zdroj s výbornými světelnými i technickými parametry a dobrou životností (až 20 000 h). Náhradní teplota chromatičnosti v závislosti na použitém typu luminoforu se pohybuje v rozmezí 2700 až 17 000 K. [73]

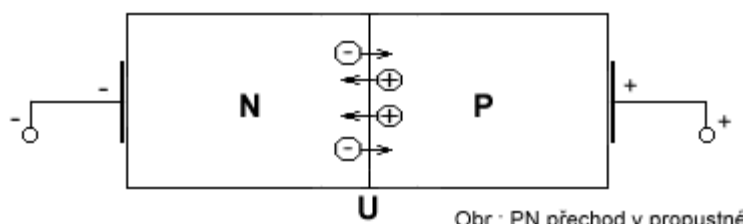


Obr. 15 Fotobioreaktor s fluorescenčním osvětlením [75]

K vidění na Obr. 15 je jeden z možných způsobů použití zářivek jako zdroje světla pro kultivaci mikrořas. Celkově 6 lineárních zářivek (A) bylo využito k osvětlení média. Samotné zářivky byly uloženy v trubici z čírého PVC a na spodu byly zatíženy ocelovým závažím, aby se zamezilo pohybu samotné trubice. V každé trubici byly uloženy dvě fluorescenční lampy. Jedna taková lampa disponovala světelným tokem 5000 lm a náhradní teplotou chromatičnosti 6500 K. Dále byl systém opatřen spínací skříní (B) a tlakovou nádobou s CO_2 (C) regulovanou solenoidovým ventilem (D). K přívodu plynu do média slouží vzduchovací kámen (E). Kontrolní jednotka (F) je napojena na sensorové potrubí (G) opatřené senzorem na teplotu a pH. Pístové čerpadlo (H) slouží jako přívod vzduchu na rozvodné potrubí (I) z kterého vychází vzduchovací hadice (J) nazpět do sensorového potrubí mezi hlavním výstupem z reaktoru (K) a vstupním ventilem (L). [75]

3.4.3 SVĚTLO EMITUJÍCÍ DIODY

Elektroluminiscenční dioda, či světelná dioda, anglicky Light-Emitting Diode (LED), je polovodičovou součástkou emitující světlo ve viditelné části spektra, či v jeho blízkém okolí (UV a infračervené záření). Aktivním prvkem je polovodičový PN přechod, který při průchodu elektrického proudu v propustném směru emituje světlo. První použitelné zdroje byly na trh uvedeny v roce 1962 a od té doby jsou neustále vyvíjeny a vylepšovány z hlediska generovaných barev, zlepšení účinnosti, životnosti a stability světelných vlastností. Jelikož se jedná o zcela odlišný princip produkování světla jsou vyráběny společnostmi se zaměřením na výrobu polovodičových součástek. [76]



Obr. 16 PN přechod v propustném směru

Obr. 16 PN přechod v propustném směru

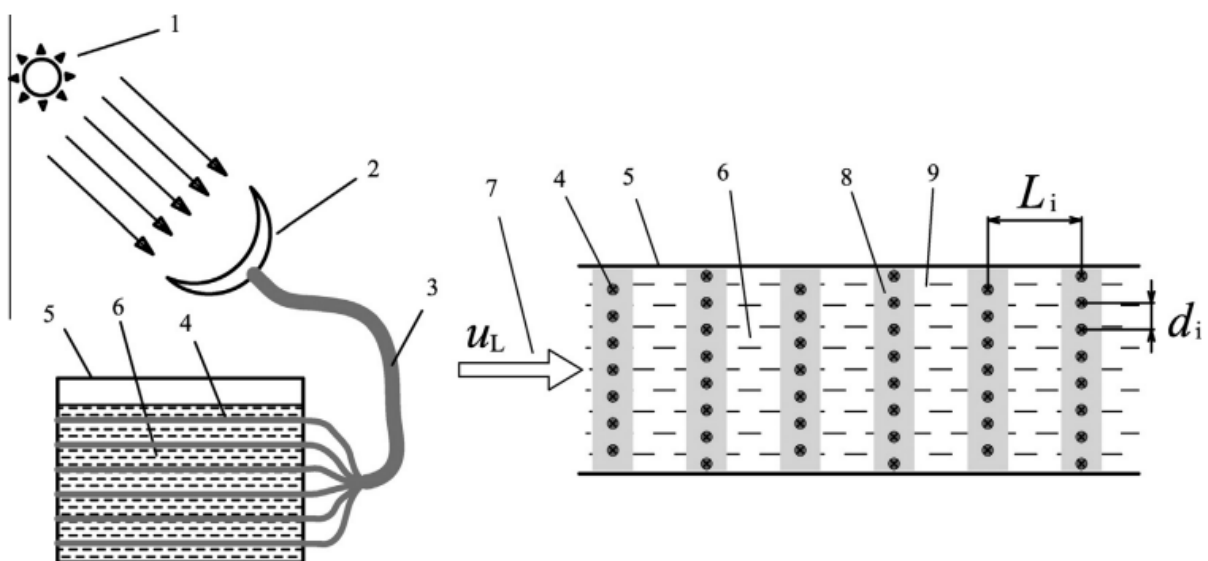
Polovodičový PN přechod (Obr. 16) v LED využívá materiálů vysoké čistoty s příměsí legur. Tyto příměsi dodávají základnímu materiálu přebytek elektronů (typ N) či přebytek děr (typ P). Po připojení na stejnosměrné napětí se správnou polaritou dojde k rekombinaci těchto elektronů a děr, čímž se uvolní kvantum energie, které je následně emitováno ve formě světla ven z krystalu. Dochází tak k přímé konverzi elektrické energie na vyzařované světlo. Diody se specifickým zabarvením (modrá, červená, zelená apod.) disponují velice úzkým spektrálním složením do několika desítek nanometrů. Díky vývoji modrých LED bylo možné vytvořit diody vyzařující bílé barvy v celém rozsahu viditelného spektra simulující i denní světlo. Značnou výhodou je vysoká variabilita konstrukce diod umožňující širokou škálu použití. [76]

Z kolorimetrického hlediska představují LED světelné zdroje nejuniverzálnější skupinu svítidel. LED zdroje mají schopnost velké škály barev vyznačujících se vysokou čistotou, kdy emitují světlo ve velmi blízkém okolí určité vlnové délky a je tedy možné je označit jako monochromatické. Předností je rovněž možnost produkce LED bílé barvy s dobrým indexem podání barev a s potřebnou náhradní teplotou chromatičnosti. Speciální LED zdroje mohou emitovat světlo i mimo viditelnou část spektra v ultrafialové a infračervené oblasti. [76]

Pro venkovní kultivační systémy byla zkoumána možnost iluminace média pomocí LED světla. V průběhu dne je světelná fáze dostatečně zásobena pomocí slunečního svitu, a tak další přisvětlování pomocí umělého světla není vhodné a ekonomicky výhodné. Proto je vhodné studovat možnost přisvětlování v průběhu noci doplněné o denní bílé světlo během dne. Stejně tak i vliv monochromatických vlnových délek a kombinace modrých a červených vlnových délek na růst a účinnost fotosyntézy v průběhu noční fáze mají vliv na množství vyprodukované biomasy. Pro porovnání bylo vytvořeno 5 testovacích vzorků. Jeden kontrolní bez osvětlení, jeden osvětlen pomocí bílého LED světla a tři vzorky osvětlené monochromatickými vlnovými délkami. Jmenovitě modře (460 nm), zeleně (560 nm) a červeně (650 nm) zabarveným světlem. Osvětlovací cyklus byl rozdělen poměrově na 12:4:8, tedy 12 h denního světla, 4 h tmy a 8 h monochromatického osvětlení. Kontrolní vzorek měl fotoperiodu 12:12 h, tedy půl dne světla a půl dne tmy. Konec exponenciální fáze byl zaznamenán 14. den experimentu u všech vzorků, avšak nejvyšší počet buněk byl u vzorku s modrým světlem a nejvyšší podíl suché biomasy byl zaznamenán rovněž pro modrý a červený osvit. Zelené vlnové délkou v porovnání s kontrolním vzorkem nevykazovaly žádný významný nárůst biomasy. [77]

3.4.4 OPTICKÁ VLÁKNA

Optická vlákna jako taková nejsou samostatným zdrojem světla. Jedná se o specifický způsob přívodu osvětlení do média mikrořas bez nutnosti použití separátního krytí pro osvětlení. Optická vlákna jsou průhledná poddajná vlákna, nejčastěji vyráběná z plastu či skla. Charakter přiváděného světla může být jak přirozené (sluneční svit), tak umělé (například LED). Pro přívod přirozeného světla je systém vybaven kolektorem koncentrujícím sluneční paprsky, kdežto umělé zdroje s dostatečným výkonem je možné připojit napřímo k jednotlivým vláknům. Optická vlákna uvnitř kultivačního zařízení emitují světlo do média celým obvodem, a tak osvětlují přímo blízké okolí samotných vláken. V závislosti na vzdálenosti jednotlivých vláken je možné osvětlovat celý objem, kdy dochází k překrytí osvětlených zón. Při navýšení vzájemných vzdáleností je dosaženo střídání osvětlených a neosvětlených (temných) zón způsobující efekt blikajících světél. Pro fototrofní mikroorganismy umožňuje tento periodický osvit vyšší efektivitu kultivace, než je tomu u nepřetržité iluminace. Délka periody střídání osvětlení a tmy může být v řádech hodin až po 10 Hz. Aby docházelo k rovnoměrnému osvětlení řasové suspenze, je vhodná rychlost proudění v oblasti pístového toku. [78]

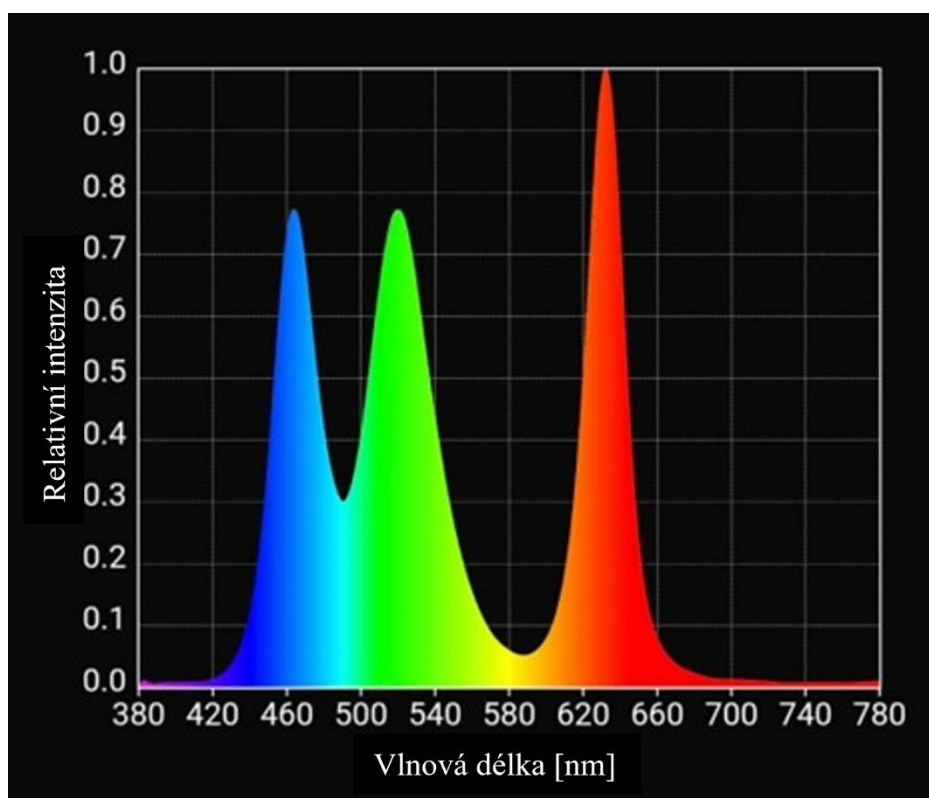


Obr. 17 Schéma fotobioreaktoru s optickými vlákny [78]

Na Obr. 17 je zjednodušené schéma principu osvitů fotobioreaktoru pomocí optických vláken. V tomto případě je zdrojem sluneční světlo (1), které je zachytáváno a koncentrováno pomocí kolektoru (2). To je následně dopraveno optickým vláknem koncového světla (3) do jednotlivých světlorozptylujících optických vláken (4) dovnitř fotobioreaktoru (5) ke kultuře mikrořas (6). Na schématu vpravo je znázorněn boční pohled na rozložení optických vláken uvnitř kanálu reaktoru. Optická vlákna jsou vertikálně od sebe vzdálena o rozměr d_i a uspořádány do vertikálních řad kolmo na směr proudění (7). Jednotlivé vertikální řady jsou od sebe vzdáleny podél směru proudění o vzdálenost L_i . Díky tomuto uspořádání dochází u média ke střídání osvětlených (8) a neosvětlených zón (9). [78]

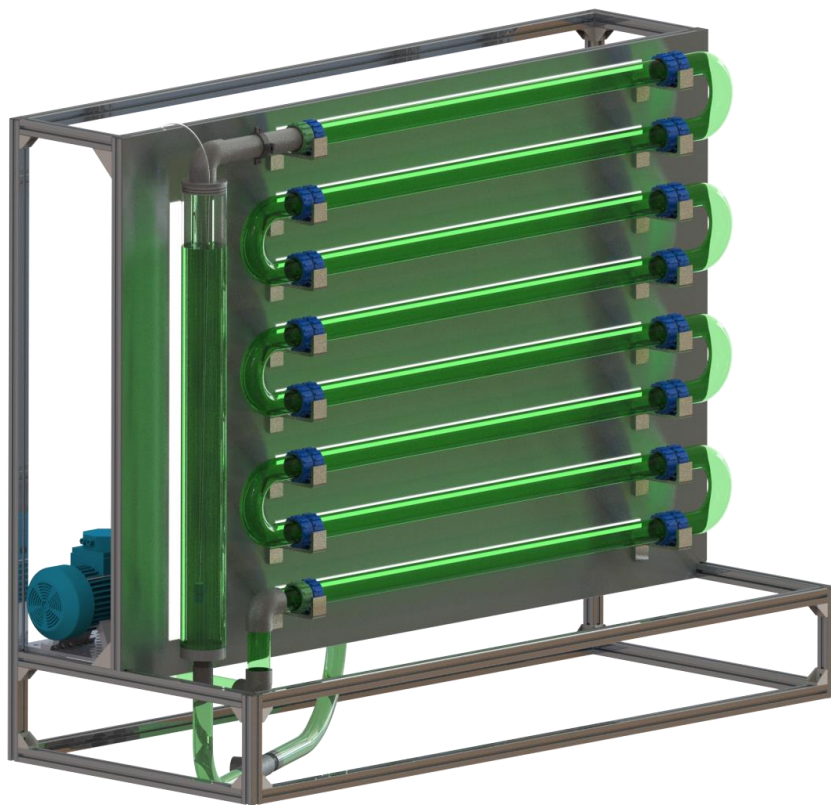
4 OSVIT EXPERIMENTÁLNÍHO FOTOBIOREAKTORU

Pro účely osvitu média mikrořas byly zvoleny LED pásky. Vybrány byly zejména pro jednoduchost zapojení, snadnou instalaci, možnosti krácení na potřebnou délku, a i celkové spotřebě elektrické energie. Konkrétně se jedná o studené bílé LED diody (6500–7000 K) simulující denní světlo a RGB LED diody generující světlo pouze ve třech úzkých spektrálních šířkách. V červené, zelené a modré (Obr. 18), kdy pro účely kultivace jsou využity vlnové délky pro červené a modré zabarvení světla. Právě v těchto vlnových délkách mají fotosyntetická barviva, především chlorofyly, absorpční maxima. V případě experimentálního fotobioreaktoru z důvodu množství plánovaných experimentů bylo využito jen červené zabarvení pro stimulaci při kultivaci.



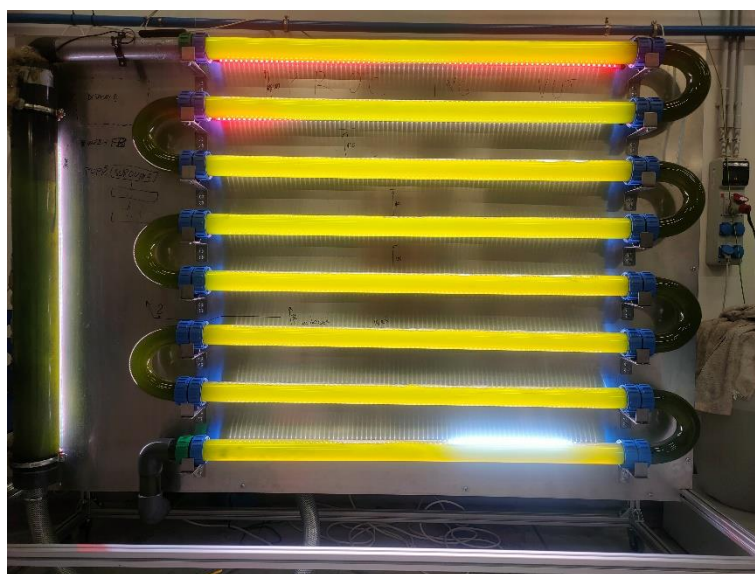
Obr. 18 Spektrální složení RGB LED pro studenou bílou [79]

Experimentální fotobioreaktor (Obr. 19) sloužící k testování vlivu spektrálního složení světla a délky fotoperiody na růst mikrořasy je horizontálního typu. Pro maximální nasvícení trubic byly LED pásky umístěny po délce horizontálních trubic a později doplněny o vertikálně umístěné pásky podél provzdušňovací kolony. V horizontální sekci je za každou z osmi trubic umístěna vždy dvojice LED pásků v délce jednoho metru. Jeden se studenou bílou a druhý s RGB. Tyto pásky jsou umístěny souměrně podél virtuální osy trubice promítnuté na hliníkový plech, aby bylo zajištěno, že dopadající světlo má přibližně stejný vliv na kultivační médium. U provzdušňovací kolony byl tento počet zdvojnásoben, aby bylo dosaženo dostatečného prosvitu skrze větší objem suspenze mikrořas. Délka pásků za kolonou činí 1,3 metru. Podél myšlené osy kolony promítnuté na hliníkový plech jsou umístěny nejprve LED pásky bílé a z vnější strany je doplňují pásky RGB. Fotobioreaktor je osazen bílými LED pásky v celkové délce 10,6 metrů. Stejně tak je tomu i v případě RGB pásků.



Obr. 19 Experimentální fotobioreaktor

Neosvětlenými částmi, jak je vidět na Obr. 20, zůstávají spojovací kolena horizontálně ložených trubic, vstup do provzdušňovací kolony a přívodní a výstupní potrubí čerpadla. Médium mikrořas tak prochází několika neosvětlenými sekcemi, které v nepravidelných intervalech simulují efekt blikajících světel. V procentuálním vyjádření je řasa v přímém kontaktu se světlem na 65 % z celé délky trubic, v kterých cirkuluje.



Obr. 20 Osvětlený fotobioreaktor s médiem mikrořas

4.1 NÁVRH OSVITU FOTOBIOREAKTORU

Zda vybrané osvětlení pomocí dvojice LED světel je pro kultivaci mikrořas dostačující, je třeba určit hodnotu produkovaného PPF_D na trubice fotobioreaktoru. V této podkapitole je popsán obecný postup výpočtu. Výsledné hodnoty PPF_D jsou zapsány do tabulky na konci. Výpočet byl proveden v MS Excel (*příloha 1*).

4.1.1 VÝPOČET OSVĚTLENÉ PLOCHY

Pro určení množství dopadajícího světla na médium mikrořas je nezbytné nejprve zjistit celkovou osvětlenou plochu kultivačního zařízení. Výpočet této plochy je rozdělen na určení osvětlených ploch po délce LED pásků a na výpočet plochy poloviny podstavy světelného kužele generovaného poslední LED diodou na konci každého pásku. Výchozím parametrem byl poloměr osvětlené válcové/kuželové plochy ve vzdálenosti vzdálenějšího vnějšího okraje trubice, tedy na vzdálenosti $r = 111,75 \text{ mm}$.

Pro lineární oblasti po délce osvětlovacích LED pásků lze osvětlenou plochu S_{PV} spočítat jako třetinu (pro vrcholový úhel 120°) z plochy pláště válce dle vztahu:

$$S_{PV} = \frac{2}{3} \pi r l. \quad (4.1)$$

kde: r Poloměr vyzařovaného světelného kužele [m]
 l Délka LED pásků [m]

Pro výpočet plochy kulové části povrchu kulové výseče je zapotřebí určit výšku kulové úseče. Ta je dána vztahem:

$$h = r - r \cos \varphi = r(1 - \cos \varphi). \quad (4.2)$$

kde: φ polovina vrcholového (rovinného) úhlu kužele [$^\circ$]

Prostorový úhel Ω (sr¹⁸) při vrcholu rotačně symetrické kulové výseče se určí ze vztahu:

$$\Omega = 2\pi \frac{h}{r} = 2\pi(1 - \cos \varphi). \quad (4.3)$$

Plocha kulové části kulové výseče S_{KV} se po dosazení vztahu (4.2) určí jako:

$$S_{KV} = \Omega r^2 = 2\pi r h = 2\pi r^2(1 - \cos \varphi). \quad (4.4)$$

Na každém konci LED pásku přechází válcová plocha do světelného kužele, tedy se z válcové plochy stává plocha kulová, která je částí kulové výseče, respektive její polovinou. Každý pásek tedy generuje na každém svém konci jednu tuto polovinu, tedy jednu celou kulovou plochu kulové výseče. Celková plocha kulových ploch kulové výseče $S_{KV, \text{celk}}$ se získá vynásobením jedné této plochy (4.1) počtem osazených LED pásků na systému. Obdobně je tomu i s plochou výřezu válcové plochy, kdy přenásobením celkovou délkou umístěných LED pásků plochou třetiny plochy pláště válce (4.4) se získá celková válcová plocha osvitu $S_{PV, \text{celk}}$. Celková

¹⁸ Steradián – bezrozměrná jednotka prostorového úhlu, z řeckého *stereos* radián, anglicky square radian

osvětlená plocha S_{celk} nezbytná pro výpočet PPFD osvětlovacího systému se získá sečtením těchto dvou ploch dle vztahu:

$$S_{celk} = S_{KV,celk} + S_{PV,celk}. \quad (4.5)$$

Celková osvětlená plocha pomocí LED pásků po sečtení dílčích ploch činí 2,942 m².

4.1.2 VÝPOČET PPFD

První krokem výpočtu PPFD světelného zdroje je určení celkového světelného toku pro bílé a RGB LED pásky jednotlivě, jelikož jejich světelné toky se liší. Jelikož světelný tok je u vybraných pásků uváděn v lumenech na metr ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-1}$), je možné tyto hodnoty vypočítat vynásobením celkovou délkou osvětlovacích LED pásků na fotobioreaktoru. Pro snazší identifikaci, ke kterému LED pásku se daná veličina vztahuje, jsou tyto veličiny doplněny spodními indexy. Indexem RGB jsou označeny veličiny pro RGB LED pásky. Index CW naopak popisuje veličiny spojené s bílými LED světly.

$$\Phi_{RGB} = \Phi_{m,RGB} \cdot L \quad (4.6)$$

$$\Phi_{CW} = \Phi_{m,CW} \cdot L \quad (4.7)$$

kde:	Φ_{RGB}	světelný tok RGB LED [lm]
	Φ_{CW}	světelný tok bílých LED [lm]
	$\Phi_{m,RGB}$	metrický světelný tok RGB LED [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-1}$]
	$\Phi_{m,CW}$	metrický světelný tok bílých LED [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-1}$]
	L	celková délka osvětlovacích LED pásků [m]

Dalším krokem je určení intenzity osvětlení (osvětlenost) E , která je definovaná jako dopadající světelný tok na osvětlenou plochu. Intenzita osvětlení je měřena v luxech (lx), či přímo v lumenech na metr čtvereční ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$). Dříve byla intenzita osvětlení nesprávně označována jako jas. Jas však není kvantitativním měřítkem a popisuje spíše fyziologické vjemy světla. Intenzita osvětlení pro RGB a studené bílé LED se vypočítá jako:

$$E_{RGB} = \frac{\Phi_{RGB}}{S_{celk}} \quad (4.8)$$

$$E_{CW} = \frac{\Phi_{CW}}{S_{celk}} \quad (4.9)$$

Jelikož pro pěstební a kultivační účely je PPFD v mikromolech na metr čtvereční a sekundu, je zapotřebí hodnoty intenzity osvětlení v luxech převést. Převodní koeficient se liší dle zdroje PAR záření dle jeho specifického spektrálního složení. Pro účely výpočtu byl využit online převodník: *Převodník jednotek osvětlení pro rostliny* z webu *LedMeGrow* [55]. PPFD bylo určováno pro Low CRI LED 6500 K, monochromatickou červenou, monochromatickou modrou a kombinaci červené a modré LED svítící současně. Vstupem byly hodnoty získané ze vztahů 4.8 a 4.9, kdy hodnota E_{CW} byla použita pro určení PPFD pouze u Low CRI LED 6500 K. Intenzita osvětlení pro RGB LED E_{RGB} posloužila jakožto vstupní hodnota pro zbylá barevná nastavení převodníku. V Tab. 3 jsou vypsány obdržené hodnoty z převodníku na PPFD pro jednotlivé osvětlovací pásky a jejich možná nastavení.

Tab. 3 Získané hodnoty PPFĐ pro jednotlivá nastavení osvětlení

Název	Veličina	Hodnota	Jednotka
Fotonový tok CW LED	PPFD_CW	56.12	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Fotonový tok MonoRed	PPFD_R	234.19	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Fotonový tok MonoBlue	PPFD_B	352.13	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Fotonový tok Red + Blue	PPFD_R+B	270.39	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

4.2 KOMPONENTY OSVĚTLOVACÍHO CELKU

Hlavními komponentami osvětlovacího celku experimentálního fotobioreaktoru jsou, kromě již zmíněných LED pásek (CW i RGB), zdroj sloužící k napájení a usměrnění střídavého napětí ze sítě na stejnosměrné napětí, které je nezbytné pro polovodičové diody a také řídicí jednotka sloužící k nastavení barevného odstínu vyzařovaného RGB pásky či k případné regulaci intenzity. Řídicí jednotka pro CW LED pásky nebyla použita, jelikož PPFĐ od těchto světél nedosahuje tak vysokých hodnot, aby vyžadovalo regulaci.

BÍLÉ A RGB LED PÁSKY

Bílé LED pásky s teplotou chromatičnosti 6500–7000 K označované jako studená bílá jsou svojí barvou nejbližší světlu dennímu, kterému jsou fotoautotrofní organismy vystaveny ve volné přírodě. Vytváří tedy jen základní fotonový tok překrývající celou šíří spektra viditelného světla. Pro umístění na hliníkový plech (zadní stěnu reaktoru) jsou po celé svojí délce opatřeny 3M lepicí páskou umožňující snadné připevnění k podkladu.

RGB LED pásky sehrávají při kultivaci mikrořas nenahraditelnou roli, neboť právě svým spektrálním složením stimulují fotosyntetická barviva, tudíž i přímo ovlivňují růst a s ním i výtěžnost biomasy. I tyto pásky disponují 3M lepicí páskou pro instalaci na hliníkový zadní plech.



Obr. 21 Cold White LED (vlevo) a RGB LED (vpravo) pásky

Parametry:

Vstupní napětí:	24 V DC
Příkon:	12 W·m ⁻¹
Počet LED:	60·m ⁻¹
Úhel svitu:	120°
Celkový světelný tok:	1100 lm·m ⁻¹
Teplota chromatičnosti:	6500-7000 K
CRI:	>80
Životnost:	50 000 h
Krytí:	IP20

Parametry:

Vstupní napětí:	24 V DC
Příkon:	14,4 W·m ⁻¹
Počet LED:	60 m ⁻¹
Úhel svitu:	120°
Celkový světelný tok:	800 lm·m ⁻¹
Teplota chromatičnosti:	neuvádí se
CRI:	neuvádí se
Životnost:	50 000 h
Stupeň krytí:	IP20

ŘÍZENÍ A OVLÁDÁNÍ

Pro nastavení konkrétního zabarvení RGB LED pásku je systém osvětlení opatřen řídicí jednotkou dimLED PR RGB1 umožňující i stmívání světla. Na vstup je přivedeno stejnosměrné napětí ze zdroje. Výstup je opatřen třemi vodiči, jedním kladným pólem a třemi pro regulaci svitu jednotlivých diod. Pomocí dálkového ovládání je možné nastavit jednu ze tří hlavních barev (červená, modrá a zelená), či pomocí barevného koláče i ostatní barvy spektra. U RGB LED diod však nedochází k úpravě spektrálního složení světelného zdroje, ale ke kombinaci tří základních barev úpravou intenzity vyzařování jednotlivých složek.



Obr. 22 RGB řídicí jednotka (vlevo), dálkové ovládání (vpravo)

Parametry zdroje:

Vstupní napětí:	12/24 V DC
Proudová zátěž:	3-4 A
Přenosová frekvence:	2,4 GHz
Typ stmívání	PWM ¹⁹ modulace
Stupeň krytí:	IP20

Parametry ovladače:

Dosah:	30 m
Přenosová frekvence:	2,4 GHz
Stupeň krytí:	IP20

ZDROJ

K napájení celého systému slouží 500 W voděodolný zdroj. Zdroj disponuje jedním vstupem střídavého napětí přímo ze sítě a dvěma výstupy stejnosměrného napětí. Tato konfigurace je ideálním řešením pro separátní napájení každého svazku (CW a RGB), a umožňuje tedy i jejich nezávislé ovládání. Zdroj je uzavřený a bez aktivního chladicího prvku (ventilátoru) neprodukuje tedy žádné zvukové emise. Disponuje tepelnou pojistkou, pojistkou proti zkratu a pojistkou proti přetížení. Dodavatel rovněž uvádí doporučenou minimální rezervu 20 % pro nepřetržitý provoz. Výpočet zatížení zdroje je součástí příloženého MS Excel souboru (příloha 1).



Obr. 23 Zdroj UTD-24-500

Parametry:

Vstupní napětí:	100–277 V AC
Výstupní napětí:	24 V DC
Výstupní proud:	20,8 A
Elektrický výkon:	500 W
Účinnost:	91 %
Stupeň krytí:	IP67

¹⁹ Pulzně šířková modulace pomocí dvouhodnotového signálu přenášeného pomocí střídavy

CHLAZENÍ

LED diody jsou známé pro svoji nízkou spotřebu elektrické energie na množství produkovaného světla. Tato účinnost však dosahuje hodnot mezi 40 a 50 % konverze elektrické energie na světlo [80]. Oproti zářivkám s účinností 7–10 % a tepelným zdrojům s účinností pohybující se běžně kolem 2, ve speciálních případech, až 13 % disponují LED světla násobně vyšší účinností generace světla [81]. Zbytková energie (50–60 %) je ztrátová a největší zastoupení představuje tepelná energie [80] Právě z tohoto důvodu je nezbytné LED pásky osvětlovacího celku chladit, aby nedošlo k jejich poškození od této ztrátové energie. Chlazení LED je možné jak aktivně (ventilátory či prouděním tekutiny), tak pasivně (pomocí chladiče). V případě experimentálního fotobioreaktoru byla zvolena varianta pasivního chlazení. K disipaci generovaného tepla slouží celá zadní stěna reaktoru. Jedná se o hliníkový plech 2 mm silný. Právě hliník je jedním z nejčastěji využívaných materiálů na výrobu chladičů. Je tomu proto, že disponuje dobrou tepelnou vodivostí (čtyřnásobná oproti běžným druhům oceli, poloviční oproti mědi), nedochází u něj k pasivaci za běžných podmínek a vyznačuje se snadnou obrobitelností pro tvarově složitější chladiče.

4.3 ELEKTROINSTALACE OSVĚTLOVACÍHO CELKU

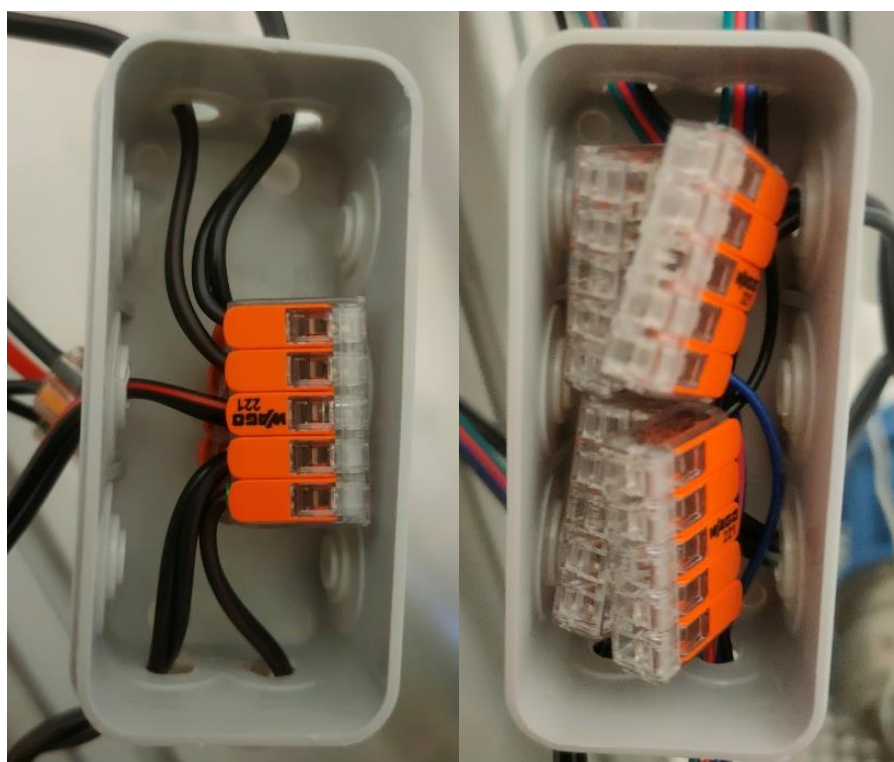
Osvětlovací systém, jak již bylo řečeno, sestává z dvojice LED pásků, zdroje, řídicí elektroniky a krabiček rozvodů. Zdroj (Obr. 24) je na vstupu zapojen do střídavé rozvodné sítě 220 V. Na výstupu jsou dva páry stejnosměrných 24 V vodičů, kdy každý pár zásobuje jeden svazek LED pásků. Pro RGB svazek LED pásků je před rozvodnou krabičku umístěna jednotka na ovládání vyzařované barvy RGB LED pásků (Obr. 25). Uvnitř krabiček (Obr. 26) dochází k rozvětvení přívodní větve do 4 paralelních větví, kdy spodní dvě větve jsou složeny ze dvou sériově zapojených pásků. Vrchní dvě větve zásobují navíc i osvětlovací pásy za provzdušňovací komorou, a tedy tyto větve sestávají ze 3 sériově zapojených pásků. Jednotlivé paralelní větve jsou propojeny příslušnými vodiči vedenými ze zadní strany fotobioreaktoru. Schéma celého zapojení je k nahlédnutí na Obr. 27.



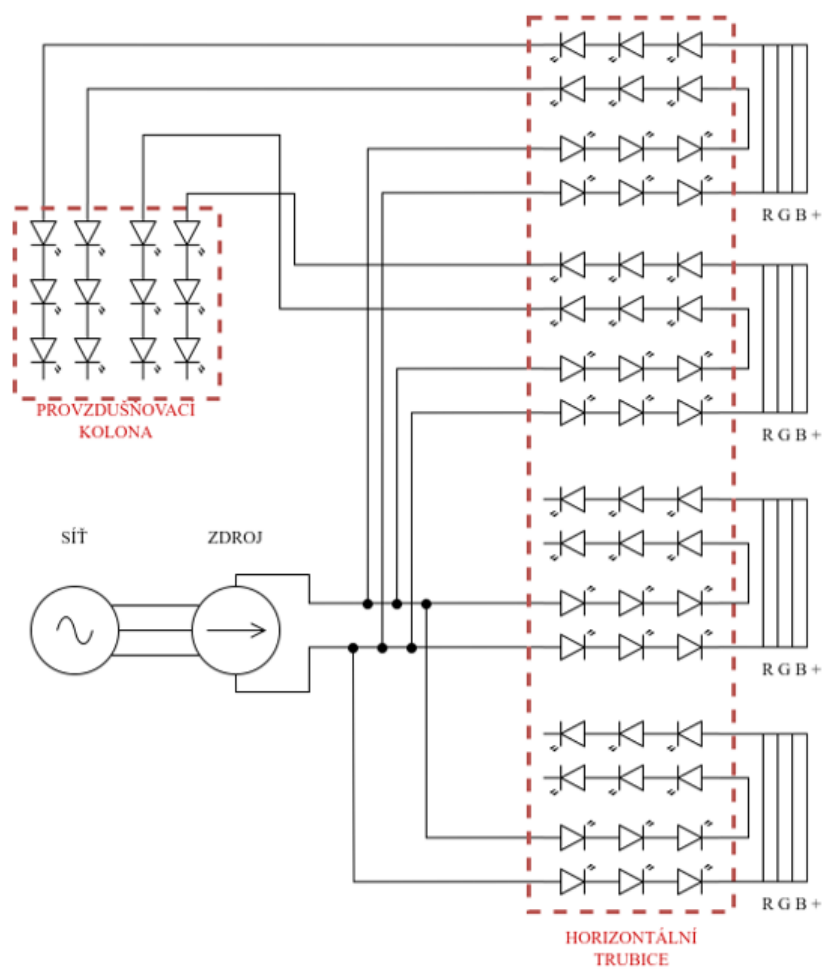
*Obr. 24 Elektroinstalace LED osvětlení
Přípojení na síť (vlevo), zdroj (uprostřed), rozvodové krabičky a řídicí elektronika (vpravo)*



Obr. 25 Zapojení řídicí jednotky mezi zdroj a rozvody



Obr. 26 Rozvody LED pásků CW (vlevo), RGB (vpravo)



Obr. 27 Schéma elektroinstalace

5 EXPERIMENT VLIVU OSVITU

K plnému otestování osvětlovacího systému a jeho možných nastavení, popsanych v předchozích kapitolách, byl na experimentálním fotobioreaktoru proveden nejprve testovací provoz. Po odladění metodiky testování a nastavení osvitu byla provedena řada experimentů z nichž byla vybrána trojice relevantních. Experimentálně byl posuzován růstových cyklů, zkoumající vliv zvolené vlnové délky 650 nm (červené zabarvení), pro různé délky fotoperiody.

5.1 PARAMETRY FOTOBIOREAKTORU A MÉDIA

Kultivovanou řasou v experimentálním fotobioreaktoru byla *Chlorella vulgaris* C2, která byla vypěstována v zařízeních společnosti CzechGlobe – Ústavu výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.. Základem kultivačního média je demineralizovaná voda získaná pomocí reverzní osmózy²⁰ v laboratořích NETME, obohacená o směs živin a dalších látek označená jako BG11 s chemickým složením uvedeným v Tab. 4.

Tab. 4 Chemická kompozice BG11 [82]

Látka	Molární hmotnost [g·L ⁻¹]	Navážka na 1 L [g]
NaNO ₃	85,01	1,4960
MgSO ₄ ·7H ₂ O	246,48	0,0748
CaCl ₂ (bezvodý)	110,99	0,0272
Kys. citronová (bezvodá)	192,13	0,006
Na ₂ EDTA·2H ₂ O	372,24	0,0012
Citrát železito-amonný	279,99	0,006
Na ₂ CO ₃	105,99	0,02
K ₂ HPO ₄ (bezvodý)	174,18	0,024
H ₃ BO ₃	61,83	0,00286
MnCl ₂ ·4H ₂ O	197,91	0,00181
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	287,54	0,00022
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	241,95	0,00039
CuSO ₄ ·5H ₂ O	249,68	0,00008
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	291,03	0,00005

Objem fotobioreaktoru činil 73 litrů se započtením všech horizontálních trubic, přípojného potrubí i provzdušňovací kolony. Objem aplikovaného média byl 70 litrů. Jedná se o průběžný systém, fotobioreaktor je osazen odstředivým čerpadlem o výkonu 1100 W. Čerpadlo je opatřené frekvenčním měničem redukujícím jeho výkon. K redukci dochází snížením síťové frekvence z 50 Hz na 20 Hz. Rychlost proudění média v trubicích fotobioreaktoru činí přibližně 0,7 m·s⁻¹. Této rychlosti odpovídá Reynoldsovo číslo dosahující hodnoty přes 40 000, jedná se tak o vysoce turbulentní proudění. V médiu tedy dochází k vlastnímu promíchávání, které snižuje vliv samostínění řasy. K přívodu vzduchu ke kultuře mikrořas slouží vzduchový kompresor opatřený vzduchovacím kamenem, s průtokem vzduchu 12 l·min⁻¹, umístěným v provzdušňovací koloně. Jelikož je průměr kolony relativně malý (125 mm), dochází v ní vlivem vzduchování k sekundárnímu promíchávání kultury. Pro případnou regulaci množství přiváděného vzduchu je vzduchovací trubička opatřena redukčním ventilem. [83]

²⁰ Přejechod rozpouštědla (vody) skrze polopropustnou membránu zachytávající rozpuštěné sloučeniny

5.2 RŮSTOVÝ CYKLUS

Kultura mikrořas při kultivaci ve fotobioreaktoru prochází během svého životního cyklu celkem pěti fázemi. Jedná se o následující fáze [84]:

1) Aklimatizace

Též zvaná jako lag fáze, kdy dochází k navyknutí řasy na nové podmínky a na prostředí rozdílné od kultivátoru, v němž byla vsázka vypěstována. Pokud byl odběr inokula²¹ proveden během exponenciální růstové fáze, neměla by se lag fáze vůbec vyskytovat. Samotná délka této fáze je proporcionalně spjata s dobou odběru během třetí až páté fáze z kultivačního růstu.

2) Exponenciální růst

Fáze největšího růstu, kdy dochází k exponenciálnímu násobení počtu buněk asexuální reprodukci. Délka fáze je spjatá s množstvím inokula, s mírou růstu mikrořasy, růstovou kapacitou fotobioreaktoru a kultivačními podmínkami.

3) Pokles růstu

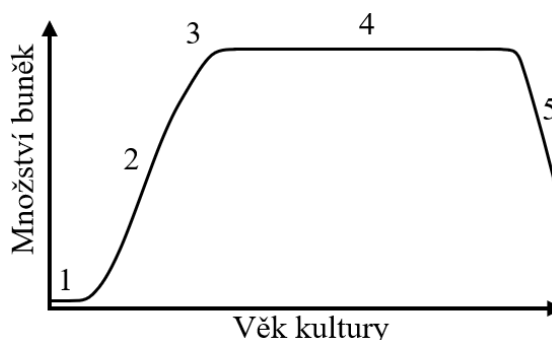
V této fázi dochází ke zpomalení růstu před stagnací. Dochází tak k naplnění růstového potenciálu v daném kultivačním zařízení, či k omezení růstu jinými podmínkami (např. fotoinhibicí).

4) Stagnace

Ve fázi stagnace, kdy bylo dosaženo maximálního počtu buněk pro dané podmínky, dosáhne hodnota čistého růstu nuly. Vlivem faktoru limitujícího další růst mikrořas, může v této fázi dojít k zásadním biochemickým změnám. Právě při stagnaci bývá řasa vystavena stresovým podmínkám, za účelem úpravy jejího biochemického složení (podíl lipidů, tvorba karotenoidů).

5) Smrt

K fyzické smrti mikrořas v médiu dochází, když buněčný metabolismus nemůže nadále udržovat mikrořasu ve vegetativním stavu. Tento proces je velice rychlý a je často označován jako kolaps kultury. U mrtvé řasy může dojít ke ztrátě pigmentace, nebo k lýze²² buněk, kdy ovšem zabarvení média může být zachováno.



Obr. 28 Pět růstových fází kultury mikrořas [85]

²¹ Očkovací roztok, mikrořasová kultura

²² Rozklad buněk důsledkem rozpadu vnější membrány

5.3 ZKUŠEBNÍ PROVOZ

Experimentální fotobioreaktor, který byl použit k měření vlivu osvitů na růst mikrořasy byl zcela nově vyvinutým zařízením, a tedy bylo nezbytné jej řádně otestovat. Jelikož každý fotobioreaktor je specifický, je třeba provést zkušební provoz, který slouží ke zhodnocení vhodnosti celého řešení po stránce konstrukční, dostatečnosti osvitů a chování zvoleného druhu mikrořasy za definovaných podmínek. Na základě těchto faktorů bylo možné zjistit limitující faktory, a tedy optimalizovat výtěžnost při samotných experimentech. Osvětlení během testovacího provozu bylo pouze bílým světlem. Barvená LED světla nebyla použita pro stimulaci absorpčních maxim. Testovací kultivační cyklus probíhal po dobu čtyř týdnů, kdy na konci experimentu byl odebrán vzorek pro zjištění množství nakultivované mikrořasy. Z rozboru na sprejové sušárně provedené na CEITEC bylo zjištěno, že množství obsažené biomasy v kultivačním médiu činilo $0,75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

5.4 OSVĚTLOVACÍ CYKLUS

Pro potřeby ověření vlivu osvitů a délky fotoperiody byly provedeny celkem tři experimenty. Poloviční cyklus, kdy je suspenze vystavena osvitům z osvětlovacího systému po dobu 12 hodin a zbylých 12 hodin médium nebylo vystaveno přímému osvitům. Plný cyklus, kdy v průběhu celého dne, po dobu 24 hodin, bylo médium vystaveno přímému osvitům. V tomto cyklu nebylo nikdy vystaveno úplné tmě. Pro potřeby určení možného optimálního nastavení fotoperiody v rozmezí mezi výše zmíněnými mezemi, byly mikrořasy vystaveny osvětlovacímu cyklu s fotoperiodou 18 hodin, kdy byl tedy přímý osvětlení zajištěn po dobu 18 hodin, a 6 hodin nebyl zajištěn přímý osvětlení.

Jelikož je fotobioreaktor umístěn v prostorách laboratoří LENP v NETME, nebylo možné zajistit v průběhu neosvětlené fáze stoprocentní tmu. Neosvětlené periody byly záměrně směřované do nočních hodin, aby bylo omezeno zkrácení osvětlením laboratoře. Z hlediska množství produkovaného světla osvětlením laboratoře, tedy jeho vlastní intenzitou, nedocházelo k tak významnému zkrácení. Hodnota získaná pomocí luxmetru (Obr. 29) byla 285 lx, což představuje maximálně $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a tedy pouhých 0,03 % světla produkovaného vlastním osvětlením fotobioreaktoru. K výraznému ovlivnění tedy nedochází a jeho vliv tak byl zanedbán.



Obr. 29 Luxmetr testo 540 [86]

Luxmetr testo 540 disponuje měřícím rozsahem od 0 do 99999 lx s přesností ± 3 lx, nebo ± 3 %. Rozlišení senzoru je 1 lx v rozmezí 0 až 19999 lx, pro zbývající rozsah 10 lx. [86]

5.5 ZABARVENÍ LED SVĚTEL

Pro účely testování růstu byla na kulturu mikrořas v experimentálním fotobioreaktoru aplikována kombinace světla z bílých LED pásků, doplněná o přisvěcování na úrovni absorpčního maxima v červené části spektra světlem z RGB LED světel. Pro využití plného potenciálu a získání kompletních informací z experimentálního zařízení, by bylo vhodné rovněž otestovat i kombinaci bílého a modrého světla, či bílého světla v kombinaci s červeným i modrým zabarvením pro stimulaci druhého významného absorpčního centra. Z časových důvodů však experimenty s ostatními možnými nastaveními proběhnout nemohly a budou předmětem dalšího výzkumu.

5.6 SENZORIKA

V průběhu každého, z výše zmíněných experimentů, bylo nezbytné měřit několik parametrů. Základní mírou růstu, která následně sloužila i jako porovnávací měřítko mezi jednotlivými experimenty, byla turbidita či kalnost. Její jednotkou je NTU (Nephelometric Turbidity Units) určující míru zákalu média. Druhým klíčovým měřeným parametrem bylo pH. Měření pH bylo provedeno za účelem kontroly kyselosti, či zásaditosti média k udržení media ve vhodných mezích růstu. Ke komunikaci jednotlivých senzorů s počítačovým softwarem Logger Lite slouží rozhraní od společnosti Vernier LabQuest Mini (Obr. 30) [87].



Obr. 30 Vernier LabQuest Mini [87]

PH SENZOR

Měření pH zajišťovala sonda Vernier pH Sensor (Obr. 31). Jedná se o zapečetěný senzor typu Ag/AgCl. Měřit pH je schopen v rozsahu 0 až 14 s přesností $\pm 0,2$. [88]



Obr. 31 pH senzor [88]

NTU SENZOR

K měření zákalu či turbidity sloužil nefelometr Vernier Turbidity Sensor (Obr. 32). Měřicí rozsah u tohoto senzoru činí 0 až 200 NTU. Rozlišení senzoru činí 0,25 NTU. Přesnost měření je ± 2 NTU při měření do 25 NTU. Nad 25 NTU je přesnost senzoru ± 5 %. [89]



Obr. 32 Senzor turbidity [89]

KALIBRACE

Jelikož rozhraní LabQuest Mini si neukládá nastavení kalibrace, bylo nezbytné před každým měřením oba připojené senzory řádně zkalibrovat. Pro nastavení kalibrace u NTU senzoru sloužil kalibrační vzorek s přesně danou hodnotou 100 NTU. Jednalo se tedy o jednosložkovou kalibraci. Senzor pH byl kalibrován dvousložkově pomocí dvojice kalibračních roztoků s přesně definovaným pH 7,01 a 10,01 při teplotě 25 °C.

5.7 EXPERIMENTY

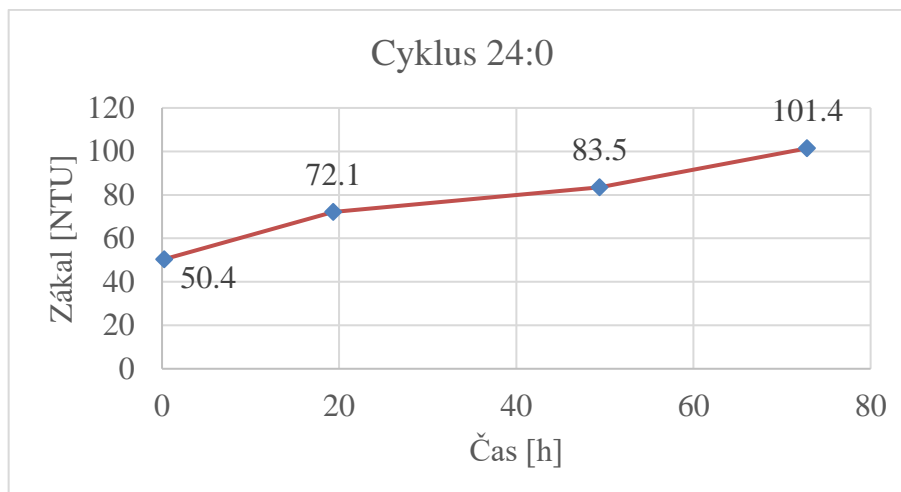
Na experimentálním fotobioreaktoru proběhla celá řada experimentů. Kromě, již zmíněného zkušebního provozu pro odladění technologie a vytvoření metodiky měření, došlo u poloviny provedených experimentů k zastavení. Ať již na samém počátku, kdy se nově aplikovaná řasa neuchytila a došlo k jejímu úhynu, či při kontaminaci média cizí řasou/organismem, jenž nad pozorovanou řasou převládl a došlo rovněž k úhynu zkoumané řasy. Relevantní výsledky poskytovaly pouze tři dále zmíněné experimenty. U těchto experimentů byl zkoumán především vliv fotoperiody při stimulaci absorpčního centra chlorofylu v oblasti viditelného

spektra, vyznačujícího se červenou barvou. Délky fotoperiody byly zvoleny 12 h, 18 h a 24 h. Pozorována byla rychlost růstu mikrořas na základě zákalu v rozsahu 50–100 NTU. Jelikož každá nová vsázka se co do objemu tak do množství obsažené mikrořasy lišila, byl samotný měřený experiment proto započat až při dosažení hodnoty zákalu 50 NTU a ukončen při 100 NTU. Hodnota 100 NTU byla zvolena z časového hlediska tak, aby délka jednoho experimentu nepřesahovala dobu dvou týdnů. Porovnávacím parametrem pak byla doba, než řasa do tohoto množství narostla. Po vsázce během aklimatizace bylo řasové inokulum v kultivačním médiu vystaveno nejprve bílému světlu, později doplněna o červené světlo. Důvodem bylo zamezení možné fotoinhibice nové řasy. Během experimentu vedle NTU bylo u suspenze mikrořas měřeno i pH, aby bylo zajištěné vhodné prostředí pro růst, tím byla horní hraniční hodnota pH 9,5. Při překročení bylo zapotřebí pH snížit přidáním kyseliny citronové. Z časového hlediska byl zkoumán vliv přisvětlování pouze červeným světlem. Každý z experimentů se skládal z několika na sebe navazujících kroků, aby byla zajištěna opakovatelnost testů a jejich vzájemná relevance:

- 1) Smíchání 70 litrů destilované vody s výživovou směsí BG11
- 2) Načerpání kultivačního média do fotobioreaktoru
- 3) Spuštění čerpadla a vzduchování
- 4) Aplikace inokula mikrořas do kultivačního média
- 5) Spuštění senzoriky
- 6) Nastavení měření spotřeby elektrické energie
- 7) Nastavení časovače osvětlení
- 8) Zapnutí osvětlovacího celku (pouze bílé světlo)
- 9) Měření vstupních dat (NTU a pH)
- 10) Postupné měření NTU a kontrola pH
- 11) Při dosažení 50 NTU zapnutí přisvětlování (červené světlo)
- 12) Při dosažení 100 NTU ukončení experimentu
- 13) Vypuštění média
- 14) Vyčistění fotobioreaktoru od usazené řasy
- 15) Uvedení do výchozího stavu

5.7.1 CYKLUS 24:0

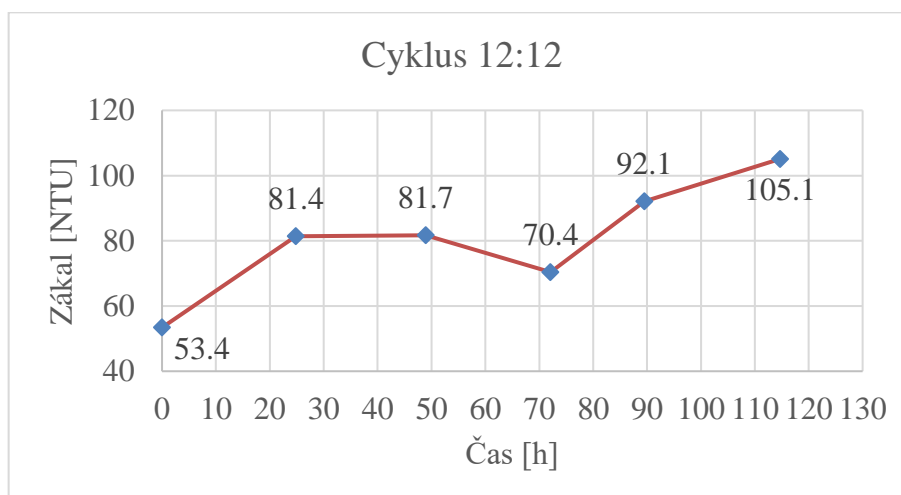
Pro první experimentální měření růstového cyklu byla fotoperioda nastavena na 24 hodin, kultura mikrořas byla tedy vystavena nepřetržitému celodennímu osvětlení. Po dosažení počáteční hodnoty 50 NTU běžel experiment po dobu tří dní, kdy hodnoty 100 NTU bylo dosaženo po 71 hodinách. Po celou dobu experimentu se hodnota pH držela v optimálních mezích pod 9,5 a nebylo tedy nutné ji snižovat vnějším zásahem. Celkový průběh růstové fáze včetně jednotlivých měření je zobrazen na Obr. 33.



Obr. 33 Růstový cyklus s fotoperiodou 24 hodin

5.7.2 CYKLUS 12:12

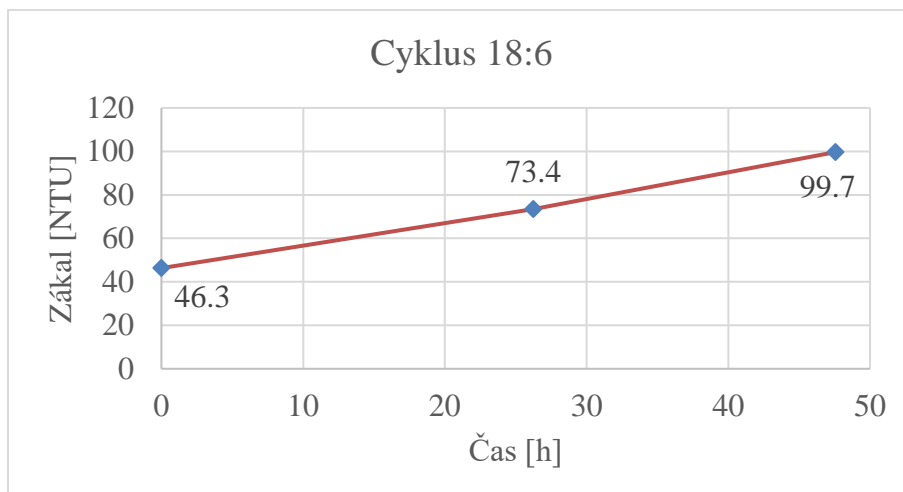
Experiment s fotoperiodou 12 hodin trval ze všech měření nejdelší dobu. Po dosažení zákalu 50 NTU u suspenze mikrořas trvalo celkem 106 hodin, než bylo dosaženo požadovaných 100 NTU. V průběhu experimentu ovšem došlo ke stagnační fázi vlivem nárůstu pH v médiu na hodnotu 11,5. Muselo tedy dojít k její korekci pomocí kyseliny citronové, což mělo za následek částečný pokles zákalu (3. a 4. měřená hodnota). Po stabilizaci pH do žádoucích mezí pokračoval růst mikrořasy bez dalších obtíží. Celkový průběh růstu mikrořasy byl zanesen do grafu na Obr. 34.



Obr. 34 Růstový cyklus s fotoperiodou 12 hodin

5.7.3 CYKLUS 18:6

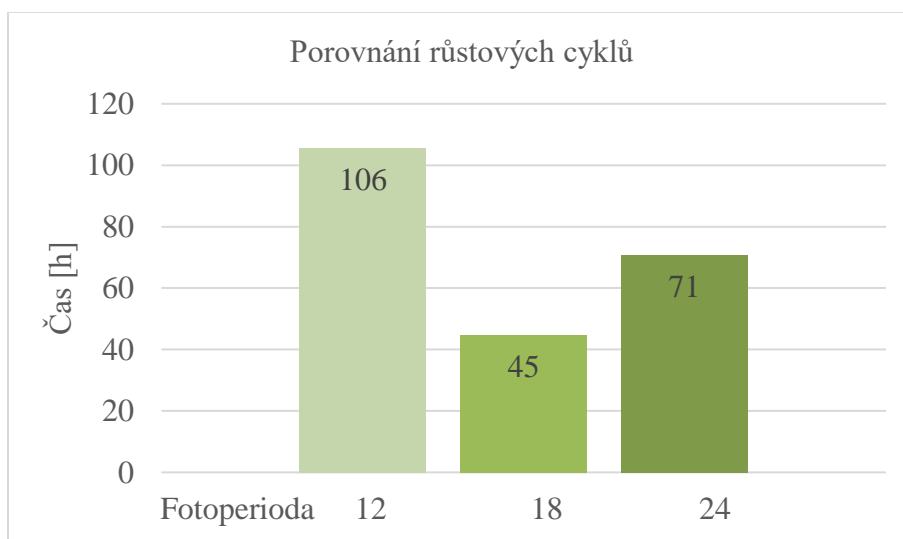
Posledním měřeným experimentem byl růstový cyklus s fotoperiodou 18 hodin. Tato délka osvitu byla zvolena jako střední hodnota ze dvou přechozích měření a měla sloužit k přesnějšímu určení optimálního nastavení délky osvitu. Růstový cyklus os 50 NTU do 100 NTU trval pouhých 45 hodin. Hodnoty pH i v tomto případě vykazovaly výrazné přiblížení k horní hranici 9,5. Ta ovšem nebyla překročena a nebyla nutná její redukce pomocí kyseliny. Průběh tohoto cyklu lze pozorovat na Obr. 35.



Obr. 35 Růstový cyklus s fotoperiodou 18 hodin

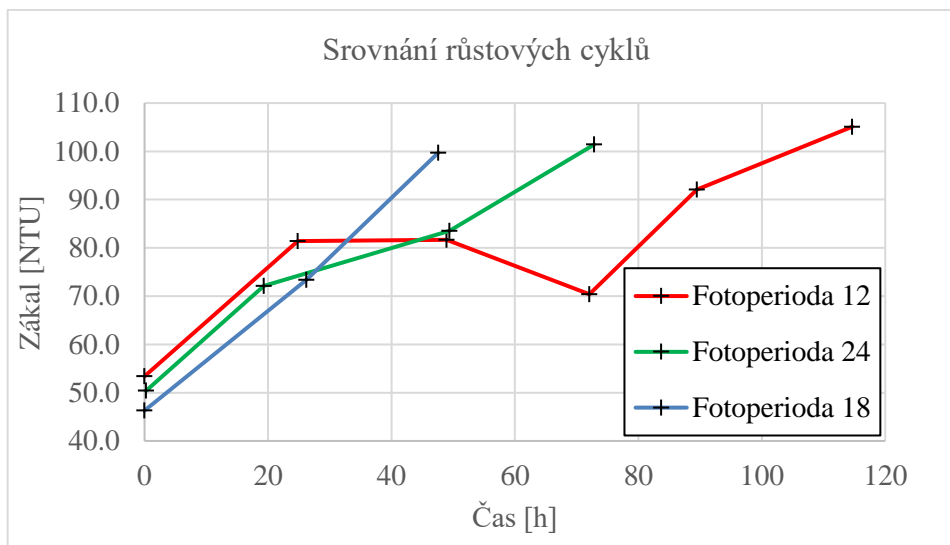
5.8 ZHODNOCENÍ OPTIMÁLNÍHO NASTAVENÍ

Dle dílčích výsledků jednotlivých experimentů byl sestaven histogram (Obr. 36) doby růstu pro jednotlivé délky fotoperiody. Na základě těchto dat se jeví jako optimální nastavení pro dané podmínky délka fotoperiody 18 hodin. Při proložení těchto dat polynomicou funkcí bylo možné určit minimum účelové funkce, kdy byla první derivace účelové funkce položena rovno nule. Zjištěná minimální možná délka růstového cyklu vychází pro délku fotoperiody na 19 hodin. Pro toto nastavení by mohlo být dosaženo maximální zkrácení růstové fáze ve zkoumaném rozsahu (od 50 do 100 NTU) na 43 hodin. Tyto výsledky je nezbytné experimentálně ověřit, jelikož aproximace získaných hodnot byla provedena pouze na základě 3 měření. Pro zpřesnění modelu proložení dat by bylo rovněž vhodné ověřit délku růstového cyklu pro 15 a 21 hodin, taktéž středových bodů mezi již zjištěnými růstovými cykly.



Obr. 36 Délka růstového cyklu v závislosti na fotoperiodě

Do jednoho grafu (Obr. 37) byly zakomponovány souběžně průběhy všech tří růstových cyklů pro různé délky fotoperiody, aby bylo snazší jednotlivé cykly mezi sebou vzájemně porovnat.



Obr. 37 Srovnání růstových cyklů

Z měření příkonu každého z nastavení fotobioreaktoru nejnižší spotřebu vykazoval nejkratší z experimentů (fotoperioda 18 hodin) a to 13,6 kWh. Pro dvanáctihodinovou fotoperiodu byl celkový odběr elektrické energie 21 kW a pro celodenní osvit 25,7 kW. Při porovnání denního odběru jsou výsledky dosti odlišné a nejlépe vychází dvanáctihodinový cyklus s odběrem $3,5 \text{ kW} \cdot \text{d}^{-1}$. Pro fotoperiodu 18 hodin byl zjištěn denní odběr ve výši $4,5 \text{ kW} \cdot \text{d}^{-1}$. Celodennímu osvitu příslušel denní odběr $6,4 \text{ kW} \cdot \text{d}^{-1}$.

6 SIMULACE OSVITU

Poslední úlohou řešené problematiky byla simulace rozložení záření v prostoru, jeho absorpce médii a trubkami a též i vznikající odraz od skleněných trubic. K simulaci byl použit simulační program ANSYS Workbench [90] využívající metodu konečných objemů CFD (Computational Fluid Dynamics). Pomocí tohoto programu bylo možné řešit osvit jako radiální záření generované osvětlovacím celkem – LED pásy. Celá simulace slouží k informačnímu účelu, kdy primárním výstupem bylo zjištění směřování světelných paprsků.

6.1 FYZIKÁLNÍ POPIS SIMULACE

V přírodě existují základní tři typy přenosu tepla: kondukce, konvekce a radiace. U kondukce dochází k vedení tepla vzájemnými srážkami částic v hmotě. Nedochází k jejich pohybu, ale pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Kondukce probíhá pouze u pevných látek. Při konvekci je teplo přenášeno prouděním hmoty o různých teplotách. Vyskytuje se pouze u tekutin (kapaliny a plyny). Posledním způsobem přenosu tepla je radiace. K přenosu energie při radiaci dochází ve formě elektromagnetického vlnění, či za pomoci fotonů. Na rozdíl od kondukce a konvekce probíhá radiace i ve vakuu. Významná je buď za velmi vysokých teplot, nebo pokud přirozená konvekce probíhá za velmi nízkých teplot, pak je radiace taktéž významným principem přenosu energie. Radiace probíhá nepřetržitě, jelikož každý objekt emituje teplo ve formě elektromagnetických vln. Intenzita tohoto vyzařování přímo závisí na teplotě a na povaze povrchu, kterým je teplo emitováno. [91]

Přenos energie radiací ve fotobioreaktoru je zvláště komplexní záležitostí, protože se jedná o simulaci záření interagujícího s řadou rozličných prostředí, jakými jsou vzduch, suspenze mikrořas nebo skleněné trubice. Každé ze zmíněných prostředí se vyznačuje svými specifickými optickými (například index lomu) a fyzikálními vlastnostmi (hustota apod.), které mohou a nemusí být závislé na specifických vlnových délkách vyzařovaného elektromagnetického záření. Rigorózním²³ řešením přenosové rovnice zářením (RTE) získaným prostřednictvím CFD simulace, je možné obdržet velmi přesné modely rozložení záření uvnitř fotobioreaktoru na základě čehož je možné zpřesnit empiricky vypočtená data. [92]

6.2 SESTAVENÍ MODELU

Za účelem vhodného výstupu je třeba provést řádné nastavení matematického výpočtového modelu. Základem výpočtu každé CFD simulace je trojice zákonů zachování s všeobecnou platností. Zákon zachování hmoty, hybnosti a energie. Pro správné chování simulace bylo zapotřebí aktivovat a vhodně nastavit i jednotlivé simulační modely. Rovněž bylo nezbytné definovat potřebné okrajové podmínky včetně jednotlivých materiálů.

6.2.1 2D SIMULACE

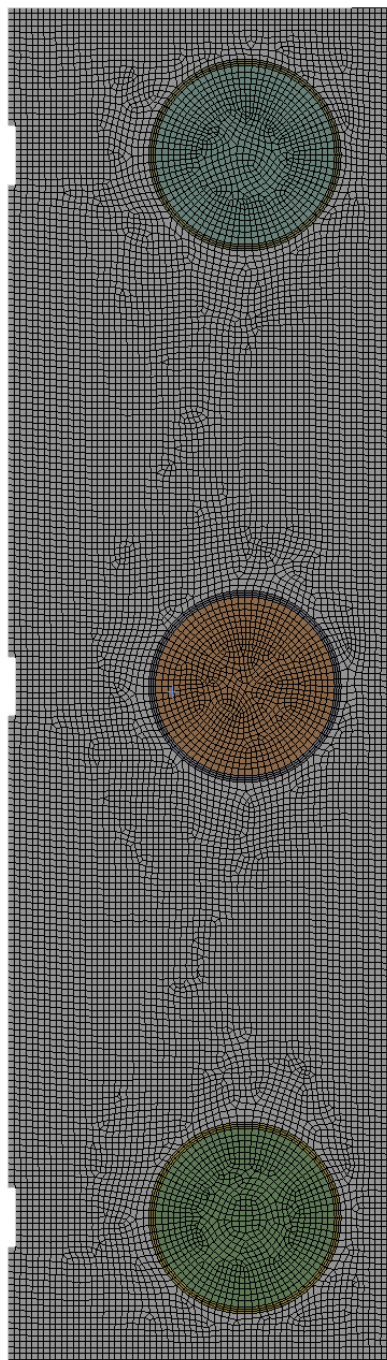
Pro potřeby simulace pomocí metody konečných objemů je nezbytné nejprve vytvořit geometrii zkoumané oblasti. Návrh geometrie vycházel z reálného modelu a k vytvoření byl použit program SOLIDWORKS [93]. Pro zjednodušení celého modelu byla provedena 2D simulace v oblasti horizontálních trubic, kde dochází ke kontaktu řasy se světlem. V modelu bylo uvažováno pouze se třemi trubicemi, nikoliv s osmi, jak je tomu u reálného zařízení. Redukce na jedinou trubici by naopak měla za následek zanedbání vlivu odrazu a rozptylu záření od zbývajících trubic. Pomocí ANSYS Spaceclaim [94] byly jednotlivým plochám

²³ Přísný, nekompromisní

přřazeny materiály. Těž byly pojmenovány okrajové podmínky za účelem jejich zařazení do jedné ze skupin, která následně definuje jejich chování v modelu.

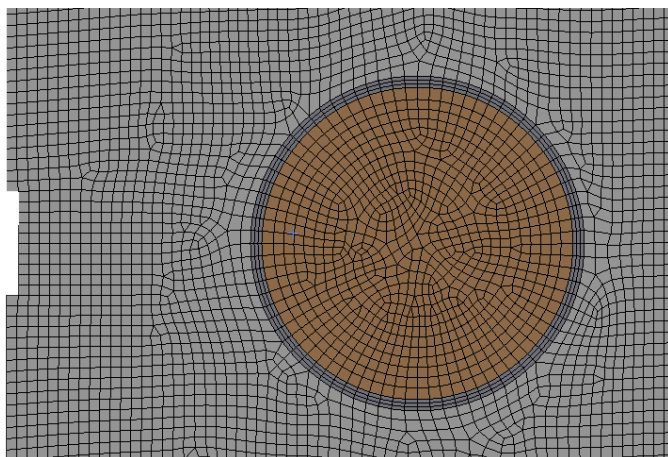
6.2.2 VÝPOČTOVÁ SÍŤ

V programu ANSYS Mechanical [95] byla vytvořena síť simulované oblasti. Celá síť (Obr. 38) obsahuje 14 909 elementů s definovaným rozměrem prvku 2 mm, aby byla zajištěna dostatečně jemná síť. Dominantním prvkem jsou čtyřstěnné elementy, avšak v síti se vyskytují i elementy trojúhelníkové.



Obr. 38 Síť řezu trubkovou částí fotobioreaktoru

Pro vhodné nastavení sítě v oblasti trubic a jejich vhodnou orientaci byl definován počet 80 prvků podél hraničních křivek na vnější a vnitřní straně trubic a též i po tloušťce trubice, aby byl zajištěn minimální počet tří prvků v průřezu. Pro spojitě řešení úlohy byla nezbytná provázanost sítě na fázových rozhraních: přechod vzduch–sklo, přechod sklo–suspense mikrořas. Detail sítě v oblasti kontaktu trubic je k nahlédnutí na Obr. 39.



Obr. 39 Detail sítě řezu fotobioreaktoru v místě trubky

6.2.3 MODEL Y

Základem každé CFD simulace je spuštění vhodných modulů popisujících chování zkoumané problematiky. Osvit trubic fotobioreaktoru byl simulován pomocí radiace, proto bylo nezbytné definovat modely popisující radiaci, turbulenci a v neposlední řadě i pro energii.

RADIACE

Pro simulaci záření byl zvolen radiační model Discrete Ordinates (DO), který je schopen modelování problematiky od záření z povrchu na povrch (S2S) až po radiaci jako součásti spalování. K řešení je použito buď záření šedého tělesa, či nešedého záření využívajícího modelu šedého pásma. DO radiační model řeší radiační přenosovou rovnici pro konečný počet diskretních prostorových úhlů, kde každý disponuje svým směrovým vektorem \vec{s} s fixními globálními kartézskými souřadnicemi (x, y, z). [92]

Pro absorbující, vyzařující a rozptylující prostředí je možné rovnici radiačního přenosu na pozici \vec{r} a ve směru \vec{s} zapsat jako:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'. \quad (6.1)$$

kde: \vec{r} poziční vektor
 \vec{s} směrový vektor
 \vec{s}' směrový vektor rozptylu
s délka úseku
a koeficient absorpce
n index lomu
 σ_s koeficient rozptylu
 σ Stefan-Boltzmannova konstanta
I intenzita radiace v závislosti na \vec{r} a \vec{s}

T	lokální teplota
Φ	fázová funkce
Ω'	prostorový úhel

Pro simulaci radiace v polopropustném prostředí je nezbytné znát index lomu n . Součet $(a + \sigma_s)$ udává, jak moc je dané prostředí neprůhledné či přímo jeho optickou tloušťku. Jelikož DO model uvažuje přenosovou radiační rovnici jako rovnici pole, je zapotřebí přepsat rovnici 6.1 do tvaru:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')d\Omega'. \quad (6.2)$$

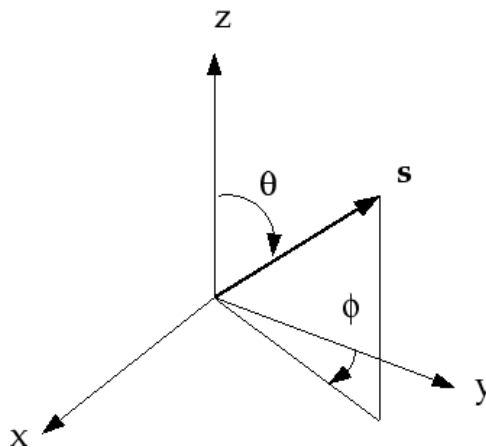
Pro spektrální intenzitu radiace $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ je možné rovnici 6.2 upravit následovně:

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')d\Omega'. \quad (6.3)$$

kde:	λ	vlnová délka
	a_λ	spektrální absorpční koeficient
	$I_{b\lambda}$	intenzita radiace černého tělesa (dáno Planckovou funkcí)

Index lomu n , koeficient rozptylu σ_s a rozptylová fázová funkce Φ jsou parametry na vlnové délce nezávislémi.

Pro DO model je nezbytné definovat úhlovou diskretizaci²⁴ radiačního záření. Obecný 4π prostor je rozdělený do osmi podprostorů – oktantů, kdy každý jeden oktant je možné diskretizovat do vektoru $N_\theta \times N_\phi$ prostorových úhlů pomocí sférických souřadnic (Obr. 40). Polární úhel θ udává odklon od osy a azimutální úhel ϕ udává úhel mezi průvodičem a rovinou určenou osou z s polárním průměrem. Pro potřeby 2D simulace stačilo definovat pouze polární úhly a jejich pixelizaci, která určuje jednotlivé divize simulovaných radiačních paprsků. Účelem pixelizace je zamezení překrytí řídicího úhlu například vlivem odrazu a lomu. [92]



Obr. 40 Sférický souřadnicový systém [92]

²⁴ Převod spojitých modelů na diskrétní

TURBULENCE

Za účelem simulace osvětlení byl zvolen model turbulence Laminar, neboť prostředí, ve kterém se fotobioreaktor nachází, je považováno za stálé bez jakéhokoliv vnějšího či vnitřního proudění.

ENERGIE

Jelikož dochází k přenosu energie radiací, byl pro přesné vykreslení zapnut model energie.

6.2.4 MATERIÁLY

V ANSYS FLUENT [96] lze materiálům přiřadit jeden ze dvou materiálových typů. Solid pro pevné skupenství a fluid, kdy fluid se nastavuje jak pro plynné, tak kapalné skupenství. Užitými materiály typu solid byl hliník a borokřemíkové sklo, ze kterého výrobce SCHOTT [97] své trubice pod obchodní značkou Duran® vyrábí. Jelikož jeho přesná kompozice není veřejně známá, bylo pro potřeby získání optických vlastností do simulace zvoleno běžné borokřemičité sklo. Pro typ fluid byly využity materiál vzduch a uživatelsky definované médium mikrořas.

TYP SOLID

Hliník – předdefinovaný materiál v programu ANSYS FLUENT [96]

Borokřemičité sklo [98], [99]

Hustota:	$2230 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrná tepelná kapacita:	$850 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost:	$1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Koeficient rozptylu:	$0,0005 \text{ m}^{-1}$
Koeficient absorpce:	$0,0003 \text{ m}^{-1}$
Index lomu:	1,471

TYP FLUID

Vzduch – předdefinovaný materiál v programu ANSYS FLUENT [96]

Suspense mikrořas [100]

Hustota:	$1001 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Měrná tepelná kapacita:	$4182 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost:	$0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Viskozita:	$0,001003 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Koeficient rozptylu:	1 m^{-1}
Koeficient absorpce:	80 m^{-1}
Index lomu:	1,34

6.2.5 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Posledním krokem při nastavení simulace je definování okrajových podmínek. V simulaci bylo využito dvou základních typů okrajových podmínek: wall a outlet. Typ inlet definující vstupy látek do zkoumané oblasti se neaplikuje, jelikož se u řešené problematiky nevyskytuje proudění média.

WALL

Celkem čtyři různé typy okrajových podmínek wall byly definovány.

Pro LED pásy, představující zdroj emitované radiace, bylo zvoleno chování „semi-transparent“ – poloprůhledný. Množství vyzařovaného světla je určeno příkonem jednotlivých LED pásků ve formě přímého osvitu, jehož jednotkou jsou wattly na metr čtvereční ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). Pro LED emitující ve vlnových délkách červeného světla bylo nastaveno $0,144 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro CW LED bylo nastaveno $0,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Hliníkový plech, na němž jsou umístěny LED pásy, představuje pevnou neprostupnou překážku, skrze kterou není viditelné záření schopno projít. Právě proto bylo pro tuto okrajovou podmínku nastaveno chování „opaque“ – neprůhledné.

Posledními dvěma okrajovými podmínkami typu wall byla fázová rozhraní fluid-solid skleněných trubic. Jedna na vnější hraně řezu trubicí, kde dochází ke kontaktu vzduchu se sklem. Druhá na vnitřní hraně, kde do kontaktu přichází sklo se suspenzí mikrořas. U obou rozhraní, obdobně jak tomu je u wall pro LED pásy, bylo nastaveno optické chování „semi-transparent“. Druhým nastavitelným parametrem je difuzní zlomek, představující míru difuzně rozptýleného záření, které není rozptýleno opticky, či absorbováno. Pro veškeré trubice byl tento zlomek zvolen na hodnotu 0,1. Kontrolou správně vytvořené a provázané geometrie je v sekci radiace nastavené „coupled“. Rovněž obě tyto okrajové podmínky disponují svými stínovými kopiemi (-shadow), které jsou vytvořeny automaticky při provázané síti. K jejich vytvoření dojde za účelem separátního ohraničení ploch kontaktních oblastí, protože není možné, aby jedna hraniční křivka byla společná dvěma plochám.

OUTLET

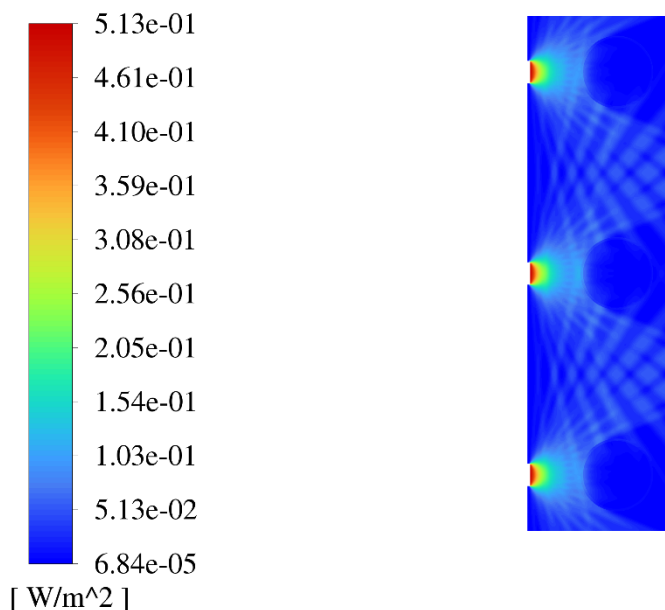
Pro zóny, kde je ukončena zkoumaná oblast vyzařování radiace a volně přechází do volného prostoru.

6.3 VÝSLEDKY SIMULACE

Hlavním cílem CFD simulace osvitu fotobioreaktoru bylo zjištění chování emitovaného světla v prostoru mezi LED světly a trubicemi s médiem mikrořas. Druhou zkoumanou metrikou bylo množství energie pohlcené řasou. Ke kvalitativnímu zhodnocení řešení osvitu byly zvoleny kontury pro vykreslení dopadajícího záření (Incident Radiation), absorbované radiace v objemu (Volumetric Absorbed Radiation) a teplota radiace (Radiation Temperature). Význam pro případné úpravy konstrukce a osvětlovacího celku mají první dvě zmíněné veličiny. Rozložení radiační teploty je přidáno pro snazší ilustraci směrů jednotlivých paprsků radiačního modelu včetně jejich odrazů.

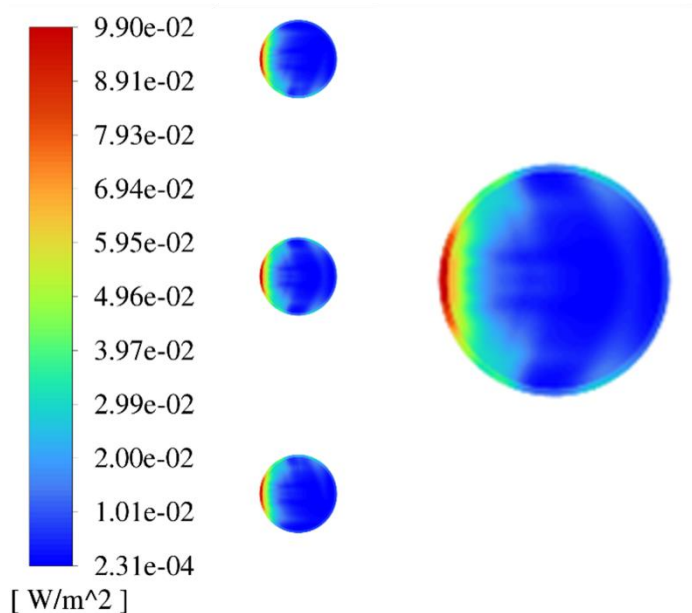
6.3.1 DOPADAJÍCÍ RADIACE

Dopadající radiace, jejíž kontura je vykreslena na Obr. 41, představuje směřování jednotlivých světelných paprsků vzduchem a jejich následný odraz od skleněných trubic. Neznamená to, že by veškeré světlo, které LED pásy produkují bylo odraženo nazpět do volného prostoru. V této škále hodnot však vykreslení distribuce dopadajícího záření neumožňuje zřetelný náhled na chování světla v suspenzi mikrořas.



Obr. 41 Vykreslení dopadající radiace

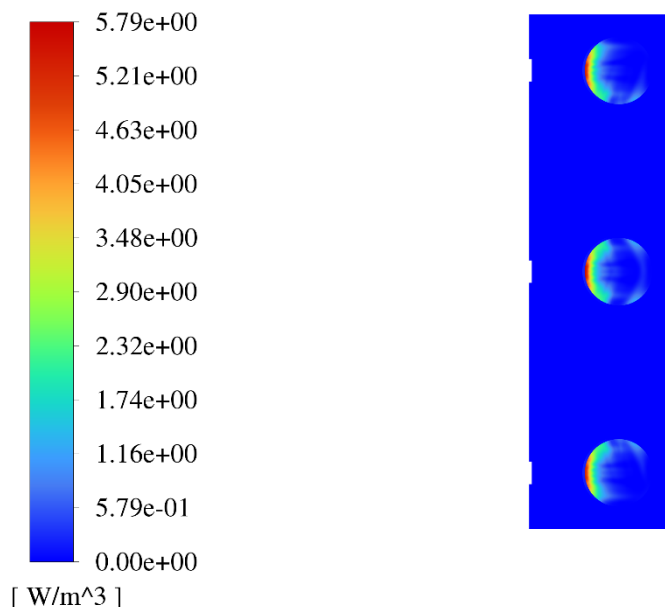
Na Obr. 42 je rovněž vykresleno dopadající záření. Vykreslení kontury je nyní omezeno pouze na skleněné trubice a mikrořasovou suspenzi, která díky měřítku vykreslení na předcházející kontuře nemohla být pozorována. Zde je možné sledovat, jak významná část dopadající radiace se dostává k mikrořase na straně bližší ložené k samotnému zdroji vyzařovaného světla, kdy fotony světla urazí nejkratší možnou vzdálenost. Na detailu je možné pozorovat i částečný rozptyl záření ve skleněné trubici v okrajových oblastech dopadajícího světla. V těchto oblastech je zdrojem dopadající radiace nejbližší sousední LED světlo, nikoliv světlo umístěné souběžně s trubicí. Na odvrácené straně trubic, vzdálenější od LEDkového zdroje, se vykreslená radiace dostane odrazem uvnitř trubic. Její velikost je však o dva řády nižší, a tedy téměř zanedbatelná.



Obr. 42 Vykreslení dopadající radiace v trubicích včetně detailu

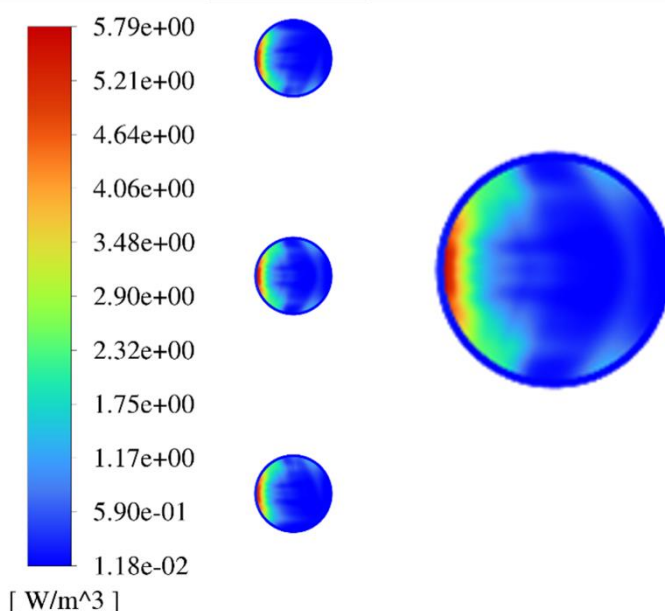
6.3.2 OBJEMOVÁ ABSORBOVANÁ RADIACE

Objemová absorpce radiace na Obr. 43 není výrazně zastoupená v prostoru mezi trubicemi a LED osvětlením. Toto chování má za následek programem definovaný materiál vzduch, pro který jsou koeficienty rozptylu a absorpce nastaveny shodně nulové.



Obr. 43 Vykreslení objemové absorbované radiace

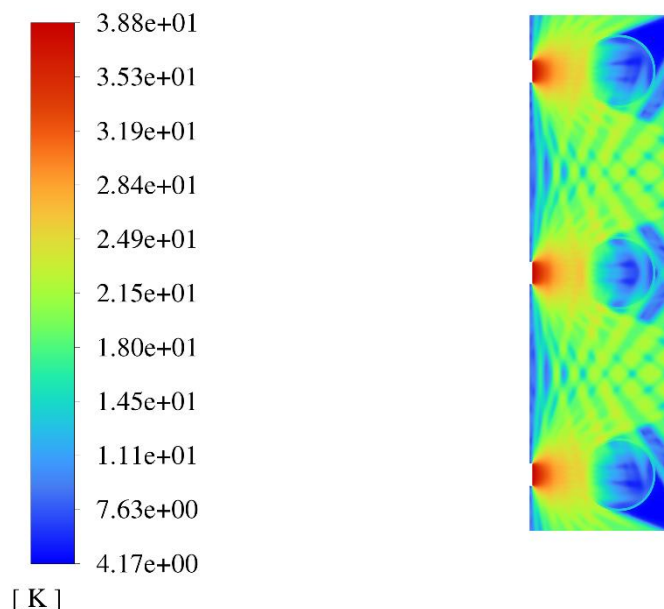
Kontura absorbované radiace na Obr. 44 je velmi podobná s rozložením dopadající radiace z Obr. 42. Je tedy vidět přímá souvislost mezi dopadajícím zářením a absorbovanou radiací. Nejvíce energie je mikrořasou pohlceno v oblasti nejbližší zdroji světla. Na rozdíl od dopadající radiace je možné pozorovat, že absorpce energie záření v trubicích je minimální, ale není nulová. Většina vyzařované energie tedy dojde až k mikrořase, kde dojde k jejímu pohlcení.



Obr. 44 Vykreslení objemové absorbované radiace včetně detailu

6.3.3 TEPLOTA RADIACE

Z rozložení radiační teploty na Obr. 45 v okolí trubic fotobioreaktoru je možné pozorovat, že značná míra emitovaného světla je mařena prostým vyzařováním do okolí bez zjevného využití.



Obr. 45 Vykreslení radiační teploty

6.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE

Pomocí simulace bylo možné potvrdit pozorované chování na reálném experimentálním fotobioreaktoru. K záchytu radiací přenášené světelné energie dochází primárně na vnitřní straně trubic (bližší k LED světlům). Část emitovaného světla k řase proniká i z prostoru mezi trubicemi reaktoru. K tomu dochází vlivem 120° úhlu osvitu, kterým LED pásy disponují. Vlivem odrazů v trubicích samotných se zanedbatelná část světelné energie k mikrořase dostává i z vnější neosvětlené strany fotobioreaktoru.

K určení celkové emitované energie z LED světel, dopadající radiace na vnější část trubic a též množství pronikající energie k médiu mikrořas byl použit modul Fluxes. Emitované množství energie činí 0,016 W. Na povrch trubic dopadá 0,0074 W, tedy přibližně polovina z vyzařovaného množství a po absorpci skleněnými trubicemi se k mikrořase dostává 0,0073 W.

Z rozložení radiační teploty je vidět, že značná část vyzařovaného světla není využita a volně osvětluje okolní prostředí na místo řasy samotné. Pro maximalizaci využití této ztrátové energie by bylo možné celý fotobioreaktor opatřit opláštěním s vnitřní vysoce reflektivní stěnou. Ta by zamezovala vyzařování do okolí. Odražené paprsky by pak mohly ozařovat médium mikrořas po celém obvodu trubic, a tak napomáhat vyšší míře fotosyntézy, a tedy i výnosu biomasy. Problematická by se u takového řešení mohla být kumulace tepla v tomto uzavřeném prostoru, protože část světelné energie se vždy přemění na energii tepelnou, která by neměla možnost volně unikat do okolí.

ZÁVĚR

Možnost řízené kultivace mikrořas ve fotobioreaktorech není žádnou novou zázračnou technologií, která by přišla jako všespásná odpověď na stále akutnější volání po boji s globálním oteplováním. Koncepce pěstování fotoautotrofních organismů pomocí kultivačních zařízení vytvářejících ideální prostředí pro růst je známá po desítky let. I přes dlouholetý výzkum věnovaný této problematice s cílem odladit tuto technologii, existuje stále řada problémů znemožňujících velkoobjemové zapojení do průmyslové výroby.

Odpovědí na poptávku po nových „čistých“ zdrojích energií může být právě průmyslová kultivace mikrořas a jejich následné zpracování. Díky schopnosti lapit oxid uhličitý, je možné rafinací této suroviny získávat téměř uhlíkově neutrální palivo – biodiesel. Uhlíková neutralita biodieselu je přímo závislá na vlastní uhlíkové stopě spjaté s rafinací lipidů obsažených ve vypěstovaných mikrořasách. Dalším energeticky potentním způsobem zpracování získané biomasy je její využití jakožto vstupní suroviny do bioplynových stanic. Nejméně, ale stále ekologicky přínosným způsobem je přímé spalování například jako příměs komunálního odpadu v provozech ZEVO.

V porovnání s ostatními, běžně využívanými energetickými plodinami, obsahuje biomasa mikrořas řádově vyšší množství olejnatých složek na jednotku pěstební plochy. Dosud málo využívaným aspektem je možnost vertikálního rozměru kultivačních zařízení. Na rozdíl od běžných plodin vyžadujících ornou půdu je možné fotobioreaktory vystavět prakticky kdekoli a neubírat ze zemědělsky využitelné plochy. Největší překážkou tak nadále zůstává vysoký obsah vody ve vypěstované mikrořase, kterou je zapotřebí z biomasy extrahovat. Snížení podílu vody může být dosaženo vhodným sušením, či samotným pěstováním. Úpravou kultivačních podmínek může být docíleno znatelně vyšší výtěžnosti v gramech na litr vypěstované mikrořasové suspenze.

Kromě energetického využití je řasa vhodně využitelná jako vstupní surovina do dalších oblastí průmyslové produkce včetně potravinářství, kosmetiky a farmaceutiky. Navozením stresových podmínek dochází z hlediska chemického složení k výrazným změnám. Uvnitř buněk tak může dojít například k tvorbě zcela odlišných fotosyntetických barviv (karotenoidy namísto chlorofylu).

Mikrořasy nemusí být nezbytně jen vstupní výrobní surovinou. Praktické využití nabízí i na konci energetického řetězce, kdy jsou schopné extrahovat škodlivé látky z toku spalin nebo zachytávat těžké kovy a zbytkové živiny způsobující eutrofizaci vod v čističkách odpadních vod.

Za účelem pěstování mikrořas jsou vyvíjené kultivační zařízení zvaná fotobioreaktory, mající za cíl maximalizovat výtěžnost biomasy úpravou růstových podmínek, a to zejména světla. Právě světlo je jedním z klíčových faktorů ovlivňujících růst fotosyntetizujících organismů, v tomto případě mikrořas. K tomu lze využít jak přirozené, tak umělé světlo, kdy prezentovaná práce je zaměřena převážně na to umělé. Míra osvětlení může být pozitivním a zároveň limitujícím faktorem. Její nepříznivý vliv se projevuje při překročení vlastní schopnosti řasy nadále absorbovat světelnou energii. Vlivem nadměrného osvětlení dochází prvně k energetickým ztrátám neabsorbované energie v celém systému a následně i uhybnutí živé kultury vlivem spálení fotosyntetického aparátu. Tyto hodnoty jsou specifické pro každou kombinaci fotobioreaktoru a druhu nasazené řasy. K jejich určení je nezbytné provést experimentální měření.

Z čistě ekonomického pohledu zůstává přirozené světlo nejdostupnějším a nejsnazším řešením zdroje světelné energie. Ovšem při uvážení dalších faktorů se přestává nadále jevit jako lukrativní, neboť například v našich zeměpisných podmínkách je v průběhu roku velmi nestálé. Umělé zdroje disponují zásadní výhodou a tou je krátkodobá i dlouhodobá časová stálost světelného toku, kterou je možné dle potřeby upravovat. Kultivační zařízení spoléhající jen a pouze na sluneční svit jsou odkázány na nepřízeň počasí a další faktory ovlivňující množství světla k mikrořasám. Zdroje umělé mají možnost plného přizpůsobení pro danou aplikaci. LED zdroje mezi umělými zdroji jednoznačně dominují svojí efektivitou konverze elektrické energie na světelnou, rozmanitostí konstrukce a plně definovatelnými světelnými parametry.

Vzhledem k tomu, že světlo má na růst mikrořasy zásadní vliv, jsou rozsáhlé experimenty s ní nevyhnutelné. Za tímto účelem bylo v praktické části této práce při vývoji nového zařízení navrženo umělé osvětlení zařízení. Osvětlení se skládalo ze dvou typů led pásků (bílý a RGB), přičemž každá z 8 trubic byla osvětlena a dané světlo bylo regulovatelné. Následně byla provedena řada experimentů. Během experimentálního testování nově vyvíjeného fotobioreaktoru bylo na základě tří úspěšných testů a jednoho zkušebního provozu určeno předběžné vhodné nastavení délky osvitů (fotoperiody) pro současné konstrukční řešení. Zjištěna byla i jistá úskalí omezující maximální potenciál tohoto kultivačního zařízení. Limitujícím faktorem se jeví růst pH, jež se mezně blížil horní doporučené hranici pro řasy rodu *Chlorella*. Řešením by mohlo být vzduchování se zvýšeným podílem oxidu uhličitého, který by v kombinaci s vodou vytvářel kyselé sloučeniny stabilizující pH v suspenzi mikrořas.

Zkoumané byly různé délky světelné a temnostní fáze. Pro potřeby stimulace absorpčního spektra byla řasa přisvětlována červeným světlem. Z tří provedených experimentů nejlépe vyšel cyklus s délkou fotoperiody 18 hodin a nejnižší celkovou spotřebou elektrické energie činící 13,6 kWh s denním odběrem 4,5 kWh.

Pro ověření experimentálních výsledků byla provedena zjednodušená CFD simulace osvětlení, za pomoci které bylo zhodnoceno řešení osvětlovacího celku vyvíjeného fotobioreaktoru. Z hlediska produkované světla a absorbované radiace je zřejmé, že přibližně polovina emitované energie je zmařena vyzářením do okolí. Toto je způsobeno širokým úhlem osvitů, kterým LED světla disponují. Vyšší míry absorbované energie by mohlo být docíleno například přiblížením trubic blíže k osvětlovacím páskům. Zjištěno též bylo, že většina absorbované energie se soustředila u vnitřní stěny trubic. Aby byl zajištěn dostatečný přívod světelné energie do média mikrořas, je nezbytné, aby médium v trubicích proudilo v turbulentním režimu a docházelo k jeho mísení.

I přes dvoudobou pozornost čítající desítky let výzkumů a publikovaných prací další vývoj kultivace mikrořas neustává. Nejen samotné kultivační podmínky dané pěstebními zařízeními – nejčastěji fotobioreaktory, ale současně i řasy samotné jsou zkoumány a nadále rozvíjeny. Díky rychlé reprodukci a genetickému inženýrství bude v blízké budoucnosti možné kultivovat specializované rody řas na konkrétní průmyslové aplikace zvyšující jejich ekonomickou validitu. Na zjištěné výsledky by bylo vhodné navázat další řadou experimentů zkoumajících například vliv modré části spektra na růst mikrořas, či vhodné kombinace modrého a červeného přisvětlování.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?. In: *News: European Parliament* [online]. [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050>
- [2] WANG, Liang, Min MIN, Yecong LI, Paul CHEN, Yifeng CHEN, Yuhuan LIU, Yingkuan WANG a Roger RUAN. Cultivation of Green Algae *Chlorella* sp. in Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant. *Applied Biochemistry and Biotechnology* [online]. 2010, **162**(4), 1174-1186 [cit. 2023-02-12]. ISSN 0273-2289. Dostupné z: doi:10.1007/s12010-009-8866-7
- [3] MUTALE-JOAN, Chanda, Laila SBABOU a El HICHAM. Microalgae and Cyanobacteria: How Exploiting These Microbial Resources Can Address the Underlying Challenges Related to Food Sources and Sustainable Agriculture. *Journal of Plant Growth Regulation* [online]. 2023, **42**(1), 1-20 [cit. 2023-02-14]. ISSN 0721-7595. Dostupné z: doi:10.1007/s00344-021-10534-9
- [4] SCHIRRMEISTER, Bettina, Jurriaan DE VOS, Alexandre ANTONELLI a Homayoun BAGHERI. Evolution of multicellularity coincided with increased diversification of cyanobacteria and the Great Oxidation Event. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2013, **110**(5), 1791-1796 [cit. 2023-02-12]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1209927110
- [5] GUIRY, Michael D. How many species of algae are there?. *Journal of Phycology* [online]. 2012, **48**(5), 1057-1063 [cit. 2023-02-14]. ISSN 00223646. Dostupné z: doi:10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x
- [6] MASOJÍDEK, J., R. KOPECKÝ a O. PRASIL. *Mikrořasy - Solární továrna v jedné buňce*. Středisko společných činností AV ČR v.v.i., 2016. ISBN 2464-6245.
- [7] TORRES-TIJI, Yasin, Francis FIELDS a Stephen MAYFIELD. Microalgae as a future food source. *Biotechnology Advances* [online]. 2020, **41** [cit. 2023-02-18]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2020.107536
- [8] SPOLAORE, Pauline, Claire JOANNIS-CASSAN, Elie DURAN a Arsène ISAMBERT. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* [online]. 2006, **101**(2), 87-96 [cit. 2023-02-14]. ISSN 13891723. Dostupné z: doi:10.1263/jbb.101.87
- [9] Algae cultures. In: *Algae: Research and Supply* [online]. 2023 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://algaeresearchsupply.com/collections/algae-cultures>

- [10] LIU, Jin a Feng CHEN. Biology and Industrial Applications of Chlorella: Advances and Prospects. In: POSTEN, Clemens a Steven FENG CHEN, ed., Clemens POSTEN, Steven FENG CHEN. *Microalgae Biotechnology* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 1-35 [cit. 2023-02-25]. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology. ISBN 978-3-319-23807-4. Dostupné z: doi:10.1007/10_2014_286
- [11] FURMANIAK, Magda, Agnieszka MISZTAK, Martyna FRAN CZUK, Annick WILMOTTE, Małgorzata WALERON a Krzysztof WALERON. Edible Cyanobacterial Genus Arthrospira: Actual State of the Art in Cultivation Methods, Genetics, and Application in Medicine. *Frontiers in Microbiology* [online]. 2017, **8** [cit. 2023-02-25]. ISSN 1664-302X. Dostupné z: doi:10.3389/fmicb.2017.02541
- [12] YEN, Hong-Wei, Shih-Hsin HO, Chun-Yen CHEN a Jo-Shu CHANG. CO₂, NO_x and SO_x removal from flue gas via microalgae cultivation: A critical review. *Biotechnology Journal* [online]. 2015, **10**(6), 829-839 [cit. 2023-02-19]. ISSN 18606768. Dostupné z: doi:10.1002/biot.201400707
- [13] YADAV, Geetanjali a Ramkrishna SEN. Microalgal green refinery concept for biosequestration of carbon-dioxide vis-à-vis wastewater remediation and bioenergy production: Recent technological advances in climate research. *Journal of CO₂ Utilization* [online]. 2017, **17**, 188-206 [cit. 2023-02-19]. ISSN 22129820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2016.12.006
- [14] NAĎ, Martin, Vladimír BRUMMER, Pavel LOŠÁK, Vítězslav MÁŠA, Kateřina SUKAČOVÁ, Dominika TATAROVÁ, Marek PERNICA a Michaela PROCHÁZKOVÁ. Waste-to-energy plants flue gas CO₂ mitigation using a novel tubular photobioreactor while producing Chlorella algae. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2023, **385**, 11 [cit. 2023-02-14]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2022.135721
- [15] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
- [16] BLANKEN, Ward, Maria CUARESMA, René WIJFFELS a Marcel JANSSEN. Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Research* [online]. 2013, **2**(4), 333-340 [cit. 2022-10-23]. ISSN 22119264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2013.09.004
- [17] KITRUNGLOADJANAPORN, P., G. SRIPONGPUN a W. TRIAMPO. Nutrient removal from the effluent of swine slaughterhouse wastewater by Chlorella vulgaris TISTR 8580. *Int'l Journal of Advances in Agricultural Environmental Engineering* [online]. 2017, (4), 28-32 [cit. 2023-02-12]. ISSN ISSN 2349-1523 EISSN 2349-1531. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.15242/IJAAEE.AE1216307

- [18] CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* [online]. 2007, **25**(3), 294-306 [cit. 2022-10-23]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
- [19] SHOKRAVI, Zahra, Hoofar SHOKRAVI, Maniruzzaman AZIZ a Hooman SHOKRAVI. The Fourth-Generation Biofuel: A Systematic Review on Nearly Two Decades of Research from 2008 to 2019. In: AZIZ, Maniruzzaman, Khairul KASSIM, Wan BAKAR et al., Maniruzzaman Bin A. AZIZ, KHAIRUL ANUAR KASSIM, WAN AZELEE WAN ABU BAKAR, AMINATON MARTO, Syed Anuar Faua ad Syed MUHAMMAD. *Fossil Free Fuels* [online]. Boca Raton: CRC Press: CRC Press, 2019, s. 213-251 [cit. 2023-03-12]. ISBN 9780429327773. Dostupné z: doi:10.1201/9780429327773-12
- [20] CHEN, Chun-Yen, Kuei-Ling YEH, Rifka AISYAH, Duu-Jong LEE a Jo-Shu CHANG. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology* [online]. 2011, **102**(1), 71-81 [cit. 2022-10-23]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2010.06.159
- [21] MATA, Teresa, António MARTINS a Nidia. CAETANO. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, **14**(1), 217-232 [cit. 2022-10-23]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.07.020
- [22] ZABED, Hossain, Suely AKTER, Junhua YUN, Guoyan ZHANG, Yufei ZHANG a Xianghui QI. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **117** [cit. 2023-03-07]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109503
- [23] FERMOSE, J., J.M. CORONADO, D.P. SERRANO a P. PIZARRO. Pyrolysis of microalgae for fuel production. In: *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts* [online]. Elsevier, 2017, s. 259-281 [cit. 2023-03-07]. ISBN 9780081010235. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101023-5.00011-X
- [24] SINGH, Harshita a Debabrata DAS. Biohydrogen from microalgae. In: *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products* [online]. Elsevier, 2020, s. 391-418 [cit. 2023-03-14]. ISBN 9780128185360. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818536-0.00015-4
- [25] CAPORGNO, Martín a Alexander MATHYS. Trends in Microalgae Incorporation Into Innovative Food Products With Potential Health Benefits. *Frontiers in Nutrition* [online]. 2018, **5** [cit. 2023-03-07]. ISSN 2296-861X. Dostupné z: doi:10.3389/fnut.2018.00058

- [26] CHACÓN-LEE, T.L. a G.E. GONZÁLEZ-MARIÑO. Microalgae for “Healthy” Foods- Possibilities and Challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* [online]. 2010, **9**(6), 655-675 [cit. 2023-03-06]. ISSN 15414337. Dostupné z: doi:10.1111/j.1541-4337.2010.00132.x
- [27] JHA, Durga, Vishakha JAIN, Brinda SHARMA, Anil KANT a Vijay Kumar GARLAPATI. Microalgae-based Pharmaceuticals and Nutraceuticals: An Emerging Field with Immense Market Potential. *ChemBioEng Reviews* [online]. 2017, **4**(4), 257-272 [cit. 2023-05-25]. ISSN 21969744. Dostupné z: doi:10.1002/cben.201600023
- [28] UDAYAN, Aswathy, Ashutosh Kumar PANDEY, Pooja SHARMA, Nidhin SREEKUMAR a Sunil KUMAR. Emerging industrial applications of microalgae: challenges and future perspectives. *Systems Microbiology and Biomanufacturing* [online]. 2021, **1**(4), 411-431 [cit. 2023-05-25]. ISSN 2662-7655. Dostupné z: doi:10.1007/s43393-021-00038-8
- [29] RAHMAN, A. a C.D. MILLER. Microalgae as a Source of Bioplastics. In: *Algal Green Chemistry* [online]. Elsevier, 2017, s. 121-138 [cit. 2023-05-25]. ISBN 9780444637840. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63784-0.00006-0
- [30] AISHVARYA, V., J. JENA, N. PRADHAN, P. PANDA a L. SUKLA. Microalgae: Cultivation and Application. In: SUKLA, Lala Behari, Nilotpala PRADHAN, Sandeep PANDA a Barada Kanta MISHRA, ed., Lala SUKLA, Nilotpala PRADHAN, Sandeep PANDA, Barada MISHRA. *Environmental Microbial Biotechnology* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 289-311 [cit. 2023-02-27]. Soil Biology. ISBN 978-3-319-19017-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-19018-1_15
- [31] YEN, Hong-Wei, I-Chen HU, Chun-Yen CHEN a Jo-Shu CHANG. Design of Photobioreactors for Algal Cultivation. In: *Biofuels from Algae* [online]. Elsevier, 2014, s. 23-45 [cit. 2023-02-28]. ISBN 9780444595584. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-59558-4.00002-4
- [32] GERKEN, Henri, Dr SUN a Jin LIU, ed. *Recent Advances in Microalgal Biotechnology* [online]. OMICS International, 2016 [cit. 2023-03-03]. ISBN 9781632780669. Dostupné z: doi:10.4172/978-1-63278-066-9-67
- [33] CHOWDURY, Kamrul, Nurun NAHAR a Ujjwal DEB. The Growth Factors Involved in Microalgae Cultivation for Biofuel Production: A Review. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering* [online]. 2020, **09**(04), 185-215 [cit. 2023-02-28]. ISSN 2168-1562. Dostupné z: doi:10.4236/cweee.2020.94012
- [34] GATAMANENI, Bhalamurugan, Valérie ORSAT a Mark LEFSRUD. Factors Affecting Growth of Various Microalgal Species. *Environmental Engineering Science* [online]. 2018, **35**(10), 1037-1048 [cit. 2023-03-03]. ISSN 1557-9018. Dostupné z: doi:10.1089/ees.2017.0521

- [35] GOH, Chang-Hyo, Suk-Min KO, Seokchan KOH, Young-Joo KIM a Hyeun-Jong BAE. Photosynthesis and Environments: Photoinhibition and Repair Mechanisms in Plants. *Journal of Plant Biology* [online]. 2012, **55**(2), 93-101 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1226-9239. Dostupné z: doi:10.1007/s12374-011-9195-2
- [36] MITTAG, Maria. *Circadian rhythms in microalgae* [online]. In: . Elsevier, 2001, s. 213-247 [cit. 2023-05-26]. International Review of Cytology. ISBN 9780123646101. Dostupné z: doi:10.1016/S0074-7696(01)06023-5
- [37] HALL, D. a Krishna RAO. *Photosynthesis*. 6th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, x, 214 s. : il. ISBN 978-0-521-64497-6.
- [38] Vitamin D and your health: Breaking old rules, raising new hopes. In: *Harvard Health Publishing: Harvard Medical School* [online]. President and Fellows of Harvard College, 2023 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.health.harvard.edu/staying-healthy/vitamin-d-and-your-health-breaking-old-rules-raising-new-hopes>
- [39] MASOJÍDEK, Jiří, Giuseppe TORZILLO a Michal KOBLÍŽEK. Photosynthesis in Microalgae. In: RICHMOND, Amos a Qiang HU, ed., Amos RICHMOND, Qiang HU. *Handbook of Microalgal Culture* [online]. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013, s. 21-36 [cit. 2023-02-04]. ISBN 9781118567166. Dostupné z: doi:10.1002/9781118567166.ch2
- [40] MESSINGER, Johannes, Dmitriy SHEVELA, David GINLEY a David CAHEN. Principles of photosynthesis. In: GINLEY, David S. a David CAHEN, ed., David GINLEY, David CAHEN. *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, s. 302-314 [cit. 2023-02-07]. ISBN 9780511718786. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511718786.028
- [41] GLOSER, Jan. *Fyziologie rostlin*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 1995. ISBN 80-210-1062-2.
- [42] Chloroplast. In: *BCcampus Open Publishing: Open Textbooks Adapted and Created by BC Faculty* [online]. Pressbooks [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://open-textbc.ca/biology/chapter/3-3-eukaryotic-cells/>
- [43] AMIN, Muhamed. *Computational Insights Into The Oxygen Evolving Complex Of Photosystem II*. New York, 2014. Dizertace. City University of New York.
- [44] KARLSON, P. *Základy biochemie*. 2. dopl.vyd. Praha: Academia, 1971, 474 s.
- [45] Fotosyntéza. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotosynt%C3%A9za#Absorpce_foton%C5%AF

- [46] VOET, Donald a Judith VOET. *Biochemie*. 1. vyd. Praha: Victoria Publishing, 1995. ISBN 80-85605-44-9.
- [47] WILSON, David a Franz MATSCHINSKY. Metabolic Homeostasis in Life as We Know It: Its Origin and Thermodynamic Basis. *Frontiers in Physiology* [online]. 2021, **12**, 12 [cit. 2023-02-18]. ISSN 1664-042X. Dostupné z: doi:10.3389/fphys.2021.658997
- [48] SINGH, Uday a A. AHLUWALIA. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* [online]. 2013, **18**(1), 73-95 [cit. 2023-03-14]. ISSN 1381-2386. Dostupné z: doi:10.1007/s11027-012-9393-3
- [49] CARVALHO, Ana, Susana SILVA, José BAPTISTA a F. MALCATA. Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online]. 2011, **89**(5), 1275-1288 [cit. 2023-03-19]. ISSN 0175-7598. Dostupné z: doi:10.1007/s00253-010-3047-8
- [50] ZHANG, Liang, Biao ZHANG, Xun ZHU, Haixing CHANG, Shiqi OU a Hong WANG. Role of Bioreactors in Microbial Biomass and Energy Conversion. In: LIAO, Qiang, Jo-shu CHANG, Christiane HERRMANN a Ao XIA, ed. *Bioreactors for Microbial Biomass and Energy Conversion* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2018, s. 39-78 [cit. 2023-05-26]. Green Energy and Technology. ISBN 978-981-10-7676-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-7677-0_2
- [51] MAHMOUDI KHATIR, Nadia a Hooman FATOOREHCHI. An Electronic System for Monitoring Sunlight Intensity toward Optimal Growth of Microalgae for Sustainable Production of Biodiesel. In: *Proceedings of The 1st World Sustainability Forum* [online]. Basel, Switzerland: MDPI, 2011, s. 765- [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: doi:10.3390/wsf-00765
- [52] Y. SHEN, , W. YUAN, Z. J. PEI, Q. WU a E. MAO. Microalgae Mass Production Methods. *Transactions of the ASABE* [online]. 2009, **52**(4), 1275-1287 [cit. 2023-03-28]. ISSN 2151-0040. Dostupné z: doi:10.13031/2013.27771
- [53] ANAND RAJENDRAN, , GARY A. ANDERSON, XINGZHONG YAN a STEPHEN GENT. Light in a Photobioreactor. In: *2013 Kansas City, Missouri, July 21 - July 24, 2013* [online]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013, s. - [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: doi:10.13031/aim.20131620672
- [54] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, Petr DUB, ed. *Fyzika*. Druhé, přepracované vydání. Přeložil Miroslav ČERNÝ, přeložil Jiří KOMRSKA, přeložil Michal LENC, přeložil Bohumila LENCOVÁ, přeložil Miroslav LIŠKA, přeložil Jana MUSILOVÁ, přeložil Pavla MUSILOVÁ, přeložil Jan OBDRŽÁLEK, přeložil Jiří PETRÁČEK, přeložil Jiří SPOUSTA, přeložil Marian ŠTRUNC. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2021. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.

- [55] Převodník jednotek osvětlení pro rostliny. In: *LedMeGrow* [online]. LedMeGrow, 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://www.ledmegrow.cz/o-nakupu/prevodnik-jednotek-osvetleni-pro-rostliny/?fbclid=IwAR1NKIZlxmDZ3Q1C4OX5Xq-KEsKOEbSELw8nBtv7o8_nV4bc09OorNw_Vvw
- [56] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. : il. (převážně barev.) ; 21 cm. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [57] MÖTTUS, Matti, Madis SULEV, Frédéric BARET, Raoul LOPEZ-LOZANO a Anu REINART. Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modeling. In: MEYERS, Robert A., ed., Robert MEYERS. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* [online]. New York, NY: Springer New York, 2012, s. 7902-7932 [cit. 2023-03-19]. ISBN 978-0-387-89469-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-0851-3_451
- [58] Elektromagnetické spektrum. In: *Khan Academy* [online]. 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecnachemie/xfed2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xfed2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- [59] Photosynthesis and light-absorbing pigments. In: *Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, Inc., 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/algae/Photosynthesis-and-light-absorbing-pigments>
- [60] Plants-Absorption-versus-LED-Lights-Wavelength. In: *CircuitBread* [online]. Boise (ID): SwellFox, 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.circuitbread.com/ee-faq/how-are-leds-used-for-growing-plants>
- [61] Horticulture lightning metrics. In: *Fluence* [online]. 2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://fluence.science/science-articles/horticulture-lighting-metrics/>
- [62] THIMIYAN, Richard a Royal HEINS. Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. *HortScience* [online]. 1983, **18**(6) [cit. 2023-03-25]. ISSN 2327-9834. Dostupné z: doi:10.21273/HORTSCI.18.6.818
- [63] CIE 1960 Chromaticity diagram. In: *Arrant-Light: Lightning your business since 1984* [online]. Turku, Finland, 2016 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://light.fi/wp-content/uploads/2016/04/CIE-1960-Chromaticity-diagram-1194x597.png>
- [64] Barevná teplota. In: *TechniLED.cz: LED osvětlení pro domácnost i průmysl* [online]. Omko Digital a.s., 2014 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <http://www.techniled.cz/20-barevna-teplota/>

- [65] BANIIYAA, Rupak Raj. *Study of various metrics evaluating color quality of light sources* [online]. Espoo, 2015 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2012/urn100575.pdf>. Master of Science thesis. Aalto University, Department of Electronics, Lighting Unit. Vedoucí práce Liisa Halonen.
- [66] KOPP, Greg a Judith LEAN. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters* [online]. 2011, **38**(1), - [cit. 2023-03-28]. ISSN 00948276. Dostupné z: doi:10.1029/2010GL045777
- [67] Introduction to Solar Radiation. In: *Newport* [online]. Newport Corporation, 2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation>
- [68] MICHAEL, Peter, Danvers JOHNSTON a Wilfrido MORENO. A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering* [online]. 2020, **8**(4), 153-166 [cit. 2023-03-29]. ISSN 2335-2124. Dostupné z: doi:10.21595/jme.2020.21667
- [69] *Photovoltaic Geographical Information System* [online]. Ispra, Italy: European Commission, Joint Research Centre Energy Efficiency and Renewables Unit, 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#
- [70] Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR. In: *TZB-info* [online]. 2001 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [71] POSTEN, Clemens. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences* [online]. 2009, **9**(3), 165-177 [cit. 2023-03-29]. ISSN 16180240. Dostupné z: doi:10.1002/elsc.200900003
- [72] SUNPIPE tubusové světlovody. In: *American Bohemian Corporation s.r.o.* [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.abcweb.cz/sunpipe-tubusove-svetlovody>
- [73] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje - lineární zářivky. *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public s. r. o., 1998-2023, **2008**(02), 56-58. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37032.pdf>
- [74] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje - kompaktní zářivky. *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public s. r. o., 1998-2023, **2008**(03), 43-45. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37410.pdf>
- [75] ERBLAND, Patrick, Sarah CARON, Michael PETERSON a Andrei ALYOKHIN. Design and performance of a low-cost, automated, large-scale photobioreactor for microalgae production. *Aquacultural Engineering* [online]. 2020, **90** [cit. 2023-04-04]. ISSN 01448609. Dostupné z: doi:10.1016/j.aquaeng.2020.102103

- [76] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje - světelné diody. *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public s. r. o., 1998-2023, **2009**(05), 68-71. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf>
- [77] ABOMOHRÁ, Abd, Hao SHANG, Mostafa EL-SHEEKH, Hamed ELADEL, Reham EBAID, Shuang WANG a Qian WANG. Night illumination using monochromatic light-emitting diodes for enhanced microalgal growth and biodiesel production. *Bioresource Technology* [online]. 2019, **288** [cit. 2022-09-25]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2019.121514
- [78] XUE, Shengzhang, Qinghua ZHANG, Xia WU, Chenghu YAN a Wei CONG. A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfill flashing light effects of microalgae. *Bioresource Technology* [online]. 2013, **138**, 141-147 [cit. 2022-08-07]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2013.03.156
- [79] Spektrum „kaltweiß“ über RGB gemischt. In: *Led-lichtband.info: LED-Streifen Vergleich & LED-Lichtband Installation* [online]. 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://led-lichtband.info/wp-content/uploads/2021/06/RGB-kw-Spektrum.jpg>
- [80] Efficiency of LEDs: The highest luminous efficacy of a white LED. In: *DIAL: Light is our profession* [online]. Lüdenscheid: DIAL GmbH, 2023 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.dial.de/en-GB/projects/efficiency-of-leds-the-highest-luminous-efficacy-of-a-white-led/>
- [81] AGRAWAL, D. C., Harvey S. LEFF a V. J. MENON. Efficiency and efficacy of incandescent lamps. *American Journal of Physics* [online]. 1996, **64**(5), 649-654 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.18260
- [82] STANIER, R Y, R KUNISAWA, M MANDEL a G COHEN-BAZIRE. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales). *Bacteriological Reviews* [online]. 1971, **35**(2), 171-205 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0005-3678. Dostupné z: doi:10.1128/br.35.2.171-205.1971
- [83] ŠURÁŇ, Michal. *Návrh a testování horizontálního fotobioreaktoru* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149675>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Lošák.
- [84] Algal growth phases including determination of the growth rate and population doubling time. In: *ANACC Methods and Materials: Australian National Algae Culture Collection's algal culturing methods and materials* [online]. Black Mountain: CSIRO [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://research.csiro.au/anaccmethods/physiological-techniques/biomass-estimation/algal-growth-phases-including-determination-of-the-growth-rate-and-population-doubling-time/#growthfig>

- [85] PRICE, Kelsey a Ihab FARAG. Resources Conservation in Microalgae Biodiesel Production. *International Journal of Engineering and Technical Research* [online]. 2013, 1(8), 49-56 [cit. 2023-05-15]. ISSN 2321-0869. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/259868136-Resources-Conservation-in-Microalgae-Biodiesel-Production>
- [86] Testo 540 - Light meter. In: *Testo: Be sure*. [online]. West Chester, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.testo.com/en-US/testo-540/p/0560-0540>;
- [87] LabQuest Mini. In: *Vernier: science education* [online]. Beaverton, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.vernier.com/product/labquest-mini/>
- [88] PH Sensor. In: *Vernier: science education* [online]. Beaverton, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.vernier.com/product/ph-sensor/>
- [89] Turbidity Sensor. In: *Vernier: science education* [online]. Beaverton, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.vernier.com/product/turbidity-sensor/>
- [90] *Ansys Workbench* [online]. In: . Dostupné také z: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>. ANSYS Inc.
- [91] BELEY, Noémi. *Geometry of Tube Radiant Heaters*. Praha, 2016. Diplomová práce. Czech Technology University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Environmental Engineering. Vedoucí práce Martin Barták.
- [92] *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide* [online]. 2009. Dostupné také z: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm. ANSYS Inc.
- [93] *Solidworks* [online]. Dostupné také z: <https://www.solidworks.com/>. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation.
- [94] *Ansys Spaceclaim* [online]. Dostupné také z: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>. ANSYS Inc.
- [95] *Ansys Mechanical* [online]. Dostupné také z: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>. ANSYS Inc.
- [96] *Ansys Fluent* [online]. Dostupné také z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. ANSYS Inc.
- [97] *SCHOTT: Glass Made of Ideas* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.schott.com/en-us>
- [98] BOROSILICATE GLASS MATERIAL PROPERTIES. In: *Imerta* [online]. Rochester, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.imetra.com/borosilicate-glass-material-properties/>

- [99] BOROSILICATE GLASS PROPERTIES. In: *De Dietrich: Process systems* [online]. Heverlee-Leuven [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://bx.dedietrich.com/en/solutions-products/borosilicate-glass-properties>
- [100] WHEATON, Zachary C. a Gautham KRISHNAMOORTHY. Modeling radiative transfer in photobioreactors for algal growth. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2012, **87**, 64-73 [cit. 2023-05-26]. ISSN 01681699. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compag.2012.05.002](https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.05.002)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

λ	[nm]	Vlnová délka
φ	[°]	Polovina vrcholového rovinného úhlu kužele
$\Phi(\lambda)$	[lm]	Světelný tok
Φ_{CW}	[lm]	Světelný tok bílých LED
$\Phi_e(\lambda)$	[W]	Zářivý tok
$\Phi_{m,CW}$	[lm·m ⁻¹]	Metrický světelný tok bílých LED
$\Phi_{m,RGB}$	[lm·m ⁻¹]	Metrický světelný tok RGB LED
Φ_{RGB}	[lm]	Světelný tok RGB LED
Ω	[sr]	Prostorový úhel
c	[m·s ⁻¹]	Rychlost světla
E	[J]	Energie fotonu o určité vlnové délce
E_{CW}	[lm·m ⁻²], [lx]	Intenzita osvitů bílých LED
$E_{\check{c}}$	[J]	Energie fotonu červeného světla
$E_{\check{c},m}$	[J]	Energie fotonu červeného světla v jednom μ mol
E_m	[J]	Energie fotonu modrého světla
$E_{m,m}$	[J]	Energie fotonu modrého světla v jednom μ mol
E_{RGB}	[lm·m ⁻²], [lx]	Intenzita osvitů RGB LED
f	[Hz], [s ⁻¹]	Frekvence
h	[J·s], [eV·s]	Planckova konstanta
h	[m]	Výška kulové výseče
$K(\lambda)$	[lm·W ⁻¹]	Světelný účinek monochromatického záření
$K'(\lambda)$	[lm·W ⁻¹]	Skotopický světelný účinek monochromatického záření
K_m	[lm·W ⁻¹]	Maximální hodnota spektrálního průběhu $K(\lambda)$
l	[m]	Délka LED pásků
L	[m]	Celková délka osvětlovacích LED pásků
n	[-]	Počet fotonů
N_A	[mol ⁻¹]	Avogadrova konstanta
n_m	[mol]	Látkové množství
r	[m]	Poloměr osvětlené plochy
S_{celk}	[m ²]	Celková osvětlená plocha
$S_{KV,celk}$	[m ²]	Celková plocha kulových ploch kulové výseče
S_{PV}	[m ²]	Plocha třetiny pláště válce

$S_{PV,celk}$	[m ²]	Celková válcová plocha
T_c	[K]	Teplota chromatičnosti
$V(\lambda)$	[-]	Poměrná světelná účinnost
$V'(\lambda)$	[-]	Skotopická poměrná světelná účinnost

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia	Jednotka teploty
$\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	mikroEinstein na čtvereční metr a sekundu	Zastaralá jednotka PPFD
μmol	mikromol	Jednotka látkového množství
$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	mikromol na čtvereční metr a sekundu	Jednotka PPFD
$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	mikromol za sekundu	Jednotka PPF
<i>3M</i>	Minnesota Mining and Manufacturing Company	Americká technologická společnost
<i>A</i>	Ampér	Jednotka proudu
<i>ABC</i>	American Bohemian Corporation	Dodavatel světlovodů
<i>AC</i>	Alternating current	Střídavý proud
<i>ADP</i>		Adenosindifosfát
<i>Ag/AgCl</i>		Chlorostříbrná elektroda
<i>ATP</i>		Adenosintrifosfát
<i>AV ČR</i>		Akademie věd České republiky
<i>BG11</i>		Růstové médium
<i>Ca</i>		Vápník
<i>CaCl₂</i>		Chlorid vápenatý
<i>CEITEC</i>	Central European Institute of Technology	Středoevropský technologický institut
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics	Výpočetní dynamika tekutin
<i>CO</i>		Oxid uhelnatý
<i>Co</i>		Kobalt
<i>Co(NO₃)₂·6H₂O</i>		Hexahydrát dusičnanu sodného
<i>CO₂</i>		Oxid uhličitý
<i>CRI</i>	Colour Rendering Index	Index podání barev
<i>CuSO₄·5H₂O</i>		Pentahydrát síranu měďnatého
<i>CW</i>	Cold White	Studená bílá
<i>DC</i>	Direct current	Stejnoseměrný proud
<i>DO</i>	Discrete Ordinates	Radiační model
<i>EF</i>		Efektivita fotosyntézy
<i>eV·s</i>	Elektronvolt sekunda	Jednotka Planckovy konstanty

<i>Fe</i>		Železo
<i>FS I</i>		Fotosystém I
<i>FS II</i>		Fotosystém II
$g \cdot L^{-1}$	gram na litr	Jednotka objemového hmotnosti
<i>GHz</i>	Gigahertz	Jednotka frekvence
<i>h</i>	hodina	Jednotka času
H^+		Vodíkový kation
H_2		Molekula vodíku
H_2O		Voda
H_2S		Sulfan
H_3BO_3		Kyselina boritá
H_3PO_4		Kyselina fosforečná
HCO_3^-		Hydrogenuhličitan
<i>Hz</i>		Jednotka frekvence
CH_2O		Organické uhlohydráty
CH_4		Metan
<i>CHSK</i>		Chemická spotřeba kyslíku
<i>IP</i>	Ingress Protection	Stupeň krytí
<i>J</i>	Joule	Jednotka práce
<i>J·s</i>	Joule sekunda	Jednotka Planckovy konstanty
<i>K</i>		Draslík
<i>K</i>	Kelvin	Jednotka teploty
K_2HPO_4		Hydrogen fosforečnan draselný
<i>km</i>	kilometr	Jednotka vzdálenosti
$kW \cdot h$	kilowatthodina	Jednotka energie
$kW \cdot h \cdot m^{-2}$	kilowatthodina na metr čtvereční	Jednotka plošné distribuce světelného příkonu
$l \cdot min^{-1}$	litr za minutu	Jednotka průtoku
<i>LED</i>	Light-Emitting Diode	Světlo emitující dioda
<i>LENP</i>		Laboratoře energeticky náročných procesů
<i>lm</i>	lumen	Jednotka světelného toku
$lm \cdot m^{-1}$	lumen na metr	Jednotka metrického světelného toku
$lm \cdot m^{-2}$	lumen na čtvereční metr	Jednotka intenzity osvětlení

$lm \cdot W^{-1}$	lumen na Watt	Jednotka světelného účinku monochromatického záření
<i>LPG</i>	Liquified Petroleum Gas	Zkapalněný ropný plyn
<i>lx</i>	lux	Jednotka intenzity osvětlení
<i>m</i>	metr	Jednotka vzdálenosti
$m \cdot s^{-1}$	metr za sekundu	Jednotka rychlosti
m^{-1}	metr na -1	Jednotka koeficientu rozptylu a absorpce
m^2	metr čtvereční	Jednotka plochy
<i>Mg</i>		Hořčík
<i>mg</i>	miligram	Jednotka hmotnosti
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$		Heptahydrát síranu manganatého
MK^{-1}	Megakelvin na -1	Jednotka náhradní teploty chromatčnosti
<i>mm</i>	milimetr	Jednotka vzdálenosti
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$		Tetrahydrát chloridu manganatého
<i>Mo</i>		Molybden
<i>mol</i>	mol	Jednotka látkového množství
mol^{-1}	mol na -1	Převrácená hodnota látkového množství
<i>MS</i>	Microsoft	Americká technologická společnost
<i>N</i>		Dusík
Na_2CO_3		Uhličitan sodný
$Na_2EDTA \cdot 7H_2O$		Heptahydrát disodné soli kyseliny etylendiamintetraoctové
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$		Dihydrát molybdenanu sodného
<i>NAD(P)H</i>		Nikotinamidadenindinukleotidfosfát
<i>NADP⁺</i>		Redukovaná forma NAD(P)H
$NaNO_3$		Dusitan sodný
<i>NETME</i>	New Technologies in Mechanical Engineering	Výzkumné centrum při VUT v Brně
NH_3		Čpavek
<i>nm</i>	nanometr	Jednotka vzdálenosti
<i>NO</i>		Oxid dusný
<i>NO_x</i>	Noxy	Oxidy dusíku
<i>NPK</i>	Nitrogen Phosphorus Potassium	Hnojivo z dusíku, fosforu a draslíku
<i>NTU</i>	Nephelometric Turbidity Units	Jednotka zákalu

O_2		Molekula kyslíku
OH^-		Hydroxylová skupina
P		Fosfor
PO_4^{3-}		Zbytek kyseliny fosforečné
Pa		Jednotka tlaku
PAR	Photosynthetic Active Radiation	Fotosynteticky aktivní záření
PHA		Polyhydroxyalkanoáty
P_i		Fosfátový zbytek
PLA		Polymléčná kyselina
pm	Picometr	Jednotka vzdálenosti
P_{max}		Maximální míra fotosyntézy
PN		Polovodičový přechod
PPF	Photosynthetic Photon Flux	Fotosyntetický fotonový tok
$PPFD$	Photosynthetic Photon Flux Density	Hustota fotosyntetického fotonového toku
ppm	Particles per million	Počet částic na milion
PVC		Polyvinylchlorid
$PVGIS-SARAH2$		Označení družice
PWM	Pulse Width Modulation	Pulsně šířková modulace
RGB	Red Green Blue	Barevný model červená-zelená-modrá
RTE	Radiation Transfer Equation	Rovnice radiačního přenosu
$Rubisco$	ribulosa-1,5-bisfosfát-karboxylasa/oxygenáza	Enzym v Calvin-Bensonově cyklu
S		Síra
$s.r.o.$		Společnost s ručením omezeným
s^{-1}	Sekunda na -1	Jednotka frekvence
$S2S$	Surface to surface	Radiační model
SI	Système international	Mezinárodní soustava jednotek
SO_2		Oxid siřičitý
sr	Steradián	Jednotka prostorového úhlu
TZL		Tuhé znečišťující látky
USA	United States of America	Spojené státy americké
UV	Ultraviolet	Ultrafialové záření

<i>V</i>		Vanad
<i>V</i>	Volt	Jednotka napětí
<i>v.v.i.</i>		Veřejná výzkumná instituce
<i>W</i>	Watt	Jednotka výkonu
<i>W·h</i>	Wattodina	Jednotka energie
<i>W·m⁻¹</i>	Watt na metr	Jednotka metrického příkonu
<i>W·m⁻²</i>	Watt na metr čtvereční	Jednotka dopadající radiace
<i>WHO</i>	World Health Organisation	Světová zdravotnická organizace
<i>ZEVO</i>		Zařízení na energetické využití odpadu
<i>Zn</i>		Zinek
<i>ZnSO₄·7H₂O</i>		Heptahydrát síranu zinečnatého

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Na světle závislé a temnostní reakce probíhající v chloroplastu [40]	22
Obr. 2 Stavba chloroplastu [42].....	23
Obr. 3 Z-schéma světelných reakcí v FS II a FS I [45]	23
Obr. 4 Calvinův cyklus [47]	25
Obr. 5 Křivka závislosti osvitů a fotosyntézy pro mikrořasy	26
Obr. 6 Druhy fotobioreaktorů [51]	27
Obr. 7 Odraz světla v bublině vzduchu [53].....	28
Obr. 8 Spektra nejběžnějších světelných zdrojů [55].....	30
Obr. 9 Elektromagnetické spektrum s vyznačeným viditelným spektrem [58]	32
Obr. 10 Relativní absorpce fotosyntetických barviv [60]	32
Obr. 11 CIE 1960 Diagram chromatičnosti s čarami konstantní teploty chromatičnosti [63] ..	33
Obr. 12 Stupnice barevného vjemu dle teploty chromatičnosti [64].....	34
Obr. 13 Roční distribuce příkonu světla v kWh·m ⁻² [69].....	35
Obr. 14 Konstrukce zářivky [73].....	37
Obr. 15 Fotobioreaktor s fluorescentním osvětlením [75]	37
Obr. 16 PN přechod v propustném směru	38
Obr. 17 Schéma fotobioreaktoru s optickými vlákny [78]	39
Obr. 18 Spektrální složení RGB LED pro studenou bílou [79].....	41
Obr. 19 Experimentální fotobioreaktor	42
Obr. 20 Osvětlený fotobioreaktor s médiem mikrořas	42
Obr. 21 Cold White LED (vlevo) a RGB LED (vpravo) pásy	45
Obr. 22 RGB řídicí jednotka (vlevo), dálkové ovládání (vpravo).....	46
Obr. 23 Zdroj UTD-24-500	47
Obr. 24 Elektroinstalace LED osvětlení	48
Obr. 25 Zapojení řídicí jednotky mezi zdroj a rozvody	49
Obr. 26 Rozvody LED pásek CW (vlevo), RGB (vpravo)	49
Obr. 27 Schéma elektroinstalace	50
Obr. 28 Pět růstových fází kultury mikrořas [85].....	52
Obr. 29 Luxmetr testo 540 [86]	53
Obr. 30 Vernier LabQuest Mini [87].....	54
Obr. 31 pH senzor [88]	55
Obr. 32 Senzor turbidity [89]	55
Obr. 33 Růstový cyklus s fotoperiodou 24 hodin.....	57
Obr. 34 Růstový cyklus s fotoperiodou 12 hodin.....	57
Obr. 35 Růstový cyklus s fotoperiodou 18 hodin.....	58
Obr. 36 Délka růstového cyklu v závislosti na fotoperiodě	58
Obr. 37 Srovnání růstových cyklů.....	59
Obr. 38 Síť řezu trubkovou částí fotobioreaktoru	61
Obr. 39 Detail sítě řezu fotobioreaktoru v místě trubky.....	62
Obr. 40 Sférický souřadnicový systém [92]	63
Obr. 41 Vykreslení dopadající radiace	66
Obr. 42 Vykreslení dopadající radiace v trubicích včetně detailu.....	66
Obr. 43 Vykreslení objemové absorbované radiace.....	67
Obr. 44 Vykreslení objemové absorbované radiace včetně detailu.....	67
Obr. 45 Vykreslení radiační teploty	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Nejběžnější kultury pro kultivaci [9]	13
Tab. 2 Průměrný měsíční sluneční svit v hodinách [70]	36
Tab. 3 Získané hodnoty PPFD pro jednotlivá nastavení osvětlení	45
Tab. 4 Chemická kompozice BG11 [82]	51

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1

Výpočet PPF.D.xlsx