

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**OPTIMALIZACE KONSTRUKCE DESKOVÉHO
FOTOBIOREAKTORU PRO KULTIVACI
MIKROŘAS V POLÁRNÍCH KLIMATICKÝCH
PODMÍNKÁCH**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

KAREL ŠNOKHOUS

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šnokhous Jméno: Karel Osobní číslo: 476053
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávající katedra/ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika a procesní technika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace konstrukce deskového fotobioreaktoru pro kultivaci mikrořas v polárních klimatických podmínkách

Název bakalářské práce anglicky:

Optimization and design of cultivation system for microalgae production under polar climate conditions

Pokyny pro vypracování:

Optimalizujte stávající konstrukci deskového fotobioreaktoru. Konstrukce fotobioreaktoru by měla být uzpůsobena provozu v polárních podmínkách. Zpracujte literární a patentovou rešerši existujících konstrukčních variant. Na základě kritické rešerše optimalizujte otočnou konstrukci zařízení, která bude zajišťovat natáčení desky fotobioreaktoru podle polohy slunce. Vypracujte výkresovou dokumentaci konstrukčních úprav.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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


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


Datum zadání bakalářské práce: 21.04.2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 04.06.2021

Platnost zadání bakalářské práce: 19.09.2021

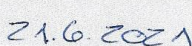

Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav
podpis vedoucí(ho) práce

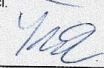

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


21.6.2021
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vykonal samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a příjmení

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Mgr. Vojtěchu Bělohlavovi za jeho cenné rady a hlavně za trpělivost a ochotu, která byla pro tento projekt nutná. Také bych chtěl poděkovat prof. Ing. Josefu Elsterovi, CSc. a doc. RNDr. Lindě Nedbalové Ph. D. za možnost podílet se na projektu fotobioreaktoru. Také bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Liškovi za práci kterou odvedl na elektrotechnické stránce projektu a také RNDr. Janě Kvíderové, Ph.D. a RNDr. Jaromíru Lukavskému, CSc., kteří se podíleli na projektu. V poslední řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu během studií a během bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora: Karel

Příjmení autora: Šnokhous

Název práce česky: Optimalizace konstrukce deskového fotobioreaktoru pro kultivaci mikrořas v polárních klimatických podmínkách

Název práce anglicky: Optimalization and design of cultivation system for microalgae production under polar climate conditions

Rozsah práce: počet stran: 77
počet obrázků: 59
počet tabulek: 6
počet příloh: 19

Akademický rok: 2020/2021

Jazyk práce: český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: B2341 Strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Vojtěch Bělohlav

Konzultant práce:

Zadavatel: Doc. Linda Nedbalová BÚ AV ČR Třeboň a Prof. Josef Elster (CPE Prf JU České Budějovice); ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Anotace česky: Bakalářská práce se zabývá kultivací mikrořas v otevřených a uzavřených kultivačních systémech a také návrhem, úpravou a optimalizací deskového fotobioreaktoru poloprovozních rozměrů, který je určený ke kultivaci řas v letním venkovním polárním podnebí. V teoretické části této práce se nachází úvod, který popisuje základní palivové produkty zpracování řas a základní kultivační podmínky, nezbytné k produkci mikrořas. Dále je zde uvedena rešerše týkající se moderních metod použití fotobioreaktorů a otevřených kultivačních systémů včetně jejich dělení, základního porovnání otevřených a uzavřených typů mezi sebou a objasněním, jaké faktory ovlivňují optimalizaci a aplikaci kultivačních zařízení. Praktická část této práce se zabývá návrhem a úpravou původní konstrukce 20 litrového fotobioreaktoru deskového typu určeného ke kultivaci řas v letních polárních podmínkách za využití maximálního slunečního záření. Součástí této části je také kapitola zahrnující testovací provoz zařízení. V práci je popsán návrh zařízení, který se řídí podmínkami, které nám zadal zadavatel. Postup návrhu je doplněný 3D modely a fotodokumentací. Podle návrhu se vypracovala výkresová dokumentace, která se nalézá v příloze.

Klíčová slova: kultivace, mikrořasy, fotobioreaktor, konstrukce deskového fotobioreaktoru, sledovač Slunce

Anotace anglicky: Bachelor thesis focus on cultivation of microalgae in open and closed cultivation systems. The thesis is also focused on design, customization and optimization of pilot-scale flat-plate photobioreactor that will be used for cultivation of microalgae in summer outdoor polar climate condition. In theoretical part of this thesis introduction chapter can be find. Introduction chapter describes basic fuel products that can be made from microalgae and conditions crucial for cultivation of microalgae. Theoretical chapter contains classification, description, factors affecting optimization and comparison of open and closed modern cultivation systems. Practical part of the thesis describes the process of design and optimization of existing flat-plate 20 l photobioreactor designated for cultivation of microalgae in summer outdoor polar climate condition while using maximal solar energy for algae growth and also fulfilling all requirements set by ordering party. The practical chapter also includes testing process. Design procedure contains 3D models and photodocumentation. Production drawings of flat-plate photobioreactor are attached in appendix.

Keywords: cultivation, microalgae, photobioreactor, design of flat-plate photobioreactor, solar tracker

Využití: Fotobioreaktor je určený pro kultivaci řas během letního období v polárních podmínkách. Toto zařízení je charakteristické schopností jednoosého otáčení kultivační nádoby za Sluncem s cílem maximalizovat využití sluneční energie.

Seznam symbolů a zkratk

a	Délka poloviny stěny nádoby [m]
b	Šířka pera [m]
C	Činitel odporu (obtékaného tělesa tekutinou)
d	Průměr hřídele [m]
d_{char}	Charakteristický rozměr obtékaného tělesa [m]
d_1	Průměr hřídele 1 [m]
d_2	Průměr hřídele 2 [m]
f	Bezrozměrný součinitel smykového tření
F_g	Gravitační síla vyvolaná tíhou nádoby [N]
F_h	Síla působící na hřídel [N]
F_t	Třecí síla [N]
F_{tmaz}	Třecí síla při použití maziva [N]
F_{wind}	Síla vyvolaná působením větru [N]
g	Gravitační zrychlení [m s ⁻²]
h	Výška nádoby [m]
H	Tloušťka vrstvy mazadla [m]
h_1	Výška pera na hřídeli 1 [m]
h_2	Výška pera na hřídeli 2 [m]
h_{max}	Maximální výška hladiny [m]
l	Délka ramena [m]
l_p	Délka pera [m]
l_s	Aktivní délka pera [mm]
l_{s1}	Aktivní délka pera na hřídeli 1 [m]
l_{s2}	Aktivní délka pera na hřídeli 2 [m]
l_{wind}	Délka ramena síly F_{wind} [m]
m	Hmotnost nádoby [kg]
M_{ESS}	Kroutící moment elektromotoru s převodovkou ESS [Nm]
M_k	Kroutící moment [Nm]
M_{kh}	Kroutící moment na hřídeli [Nm]
M_{kmaz}	Kroutící moment při použití maziva [Nm]
M_{wind}	Kroutící moment vyvolaná působením větru [Nm]
O	Obvod kruhu [m]
p_1	Tlak působící na pero na hřídeli 1 [Pa]
p_2	Tlak působící na pero na hřídeli 2 [Pa]
P_d	Dovolený tlak [Pa]
P_h	Hydrostatický tlak [Pa]
Re	Reynoldsovo číslo
r_{in}	Vnitřní poloměr třecích ploch [m]
r_{out}	Vnější poloměr třecích ploch [m]
$S_{\frac{1}{2}}$	Plocha, na kterou působí vítr [m ²]
$S_{mezikruh}$	Plocha mezikruží [m ²]
T_{opt}	Optimální teplota [°C]
T_{ot}	Perioda jedné otáčky [s]
\bar{u}	Střední rychlost proudění tekutiny [m s ⁻²]
u	Rychlost větru [m s ⁻¹]
u_{max}	Maximální rychlost během otáčky [m s ⁻²]
μ	Dynamická viskozita [Pa s]
$\mu_{40^\circ C}$	Dynamická viskozita maziva při 40°C [Pa s]

ν	Kinematická viskozita [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
$\nu_{40^\circ\text{C}}$	Kinematická viskozita maziva při 40°C [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
\emptyset	Průměr
ρ	Hustota [kg m^{-3}]
$\rho_{10^\circ\text{C}}$	Hustota vzduchu při 10°C [kg m^{-3}]
$\rho_{40^\circ\text{C}}$	Hustota maziva při 40°C [kg m^{-3}]
τ_{xy}	Napětí ve směru xy [Pa]
ATP	Adenosintrifosfát
AVČR	Akademie věd České republiky
BÚ	Botanický ústav
CO_2	Oxid uhličitý
CPE	Centrum polární ekologie
DPH	Daň z přidané hodnoty
IP	Stupeň krytí
JU	Jihočeská univerzita
MŠMT	Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky
O_2	Kyslík
pH	Vodíkový exponent
Prf	Přírodovědecká fakulta
TIG/WIG	Svařování wolframovou elektrodou v ochranné inertní atmosféře

1	Biomasa z mikrořas	12
1.1	Úvod	12
1.2	Biomasa	12
1.2.1	První generace biopaliv	12
1.2.2	Druhá generace biopaliv	13
1.2.3	Třetí generace biopaliv	13
1.2.4	Porovnání	13
1.3	Faktory ovlivňující kultivace řas	14
1.3.1	Teplotní rozsah.....	15
2	Kultivační zařízení.....	16
2.1	Kultivační systémy s otevřeným přístupem k atmosféře.....	16
2.1.1	Otevřené traťové systémy	17
2.1.2	Kruhové otevřené kultivační systémy	17
2.1.3	Otevřené nemíchané kultivační systémy	18
2.1.4	Kaskádové otevřené kultivační systémy	19
2.2	Uzavřené fotobioreaktory	19
2.2.1	Trubkové fotobioreaktor.....	20
2.2.2	Deskové fotobioreaktory	21
2.3	Hybridní fotobioreaktory	23
2.4	Míchání kultivačního média v otevřených a uzavřených systémech.....	24
2.5	Porovnání otevřených a uzavřených kultivačních systémů	25
3	Cíle práce.....	28
4	Provozní podmínky	29
4.1	Místní faktory.....	29

4.1.1	Prašnost.....	29
4.1.2	Vlhkost a slané prostředí	29
4.1.3	Teploty	30
4.1.4	Povětrnostní podmínky.....	30
5	Optimalizace otočného deskového fotobioreaktoru.....	32
6	Návrh pohonného mechanismus.....	36
6.1	Polohování sklonu komory.....	36
6.2	Rotační pohyb	37
6.2.1	Požadavky na horizontální pohonný mechanismus.....	38
6.2.2	Výpočet minimálního kroutícího momentu.....	38
6.2.3	Výpočet s mazivem	40
6.2.4	Výpočet kroutícího momentu dle povětrnostních podmínek	41
6.3	Volba krokového elektromotoru	43
6.3.1	Poptávka elektromotoru.....	45
6.4	Výsledná volba elektromotoru.....	47
7	Míchání a vzduchování kultivačního média	47
7.1	Výběr komponent pro vzduchování.....	47
8	Úprava zařízení.....	49
8.1	Přizvednutí spodního rámu konstrukce	50
8.2	Výroba víka.....	52
8.3	Přenos kroutícího momentu	54
8.4	Spojková skříň	55
8.5	Hřídelová spojka.....	58
8.5.1	Kontrola per na otláčení	59

8.6	Instalace rozvodu směsi plynu vzduchu a CO ₂	60
8.7	Příprava pro instalaci měřících prvků	62
8.8	Výsuvný rám.....	64
8.9	Elektroinstalace a ovládání pohybu zařízení.....	65
9	Testovací provoz	67
10	Závěr.....	69
11	Seznam Literatury	71
12	Seznam Obrázků.....	74
13	Seznam tabulek.....	76

1 Biomasa z mikrořas

1.1 Úvod

Po celém světě je vysoká poptávka po energiích, která se každý rok zvyšuje, a proto se snažíme využívat i jinak netradiční paliva z obnovitelných zdrojů energie. Jedním z takových typů paliv jsou paliva vytvořená z olejů řas, které jsou schopné nahradit konvenční fosilní alternativy a předčít je v nižší tvorbě emisí. To by mohlo do značné míry zpomalit proces globálního oteplování. Abychom vyrobili dostatečné množství paliva, musíme vytvořit obrovské farmy pro pěstování biomasy řas, která by se mohla sklízet v daleko kratších časových intervalech, než je možné pro jakýkoli jiný druh energetické biomasy. Abychom však dokázali vypěstovat dostatečné množství řas, tak musíme zkonstruovat zařízení, pomocí kterého vytvoříme vhodné podmínky pro růst řas. Tyto zařízení označujeme jako kultivační systémy, ve kterých probíhá cílená kultivace biomasy mikroorganismů.

1.2 Biomasa

Biomasa je souhrnné označení pro látky, ze kterých se skládají všechny druhy organického materiálu na Zemi, tedy organismy, sinice, řasy, bakterie a rostliny. Z hlediska energetiky označujeme jako biomasu skupinu látek, jejichž vhodným zpracováním, nebo přímou reakcí dokážeme získat zdroj energie. Hlavním zdrojem energie z těchto látek je uhlík vázaný v uhlovodíkových sloučeninách. Biomasu můžeme rozdělit na dvě základní skupiny. První skupina je tvořena biomasou pro energetické účely (rychle rostoucí dřeviny, travní porosty, obiloviny, olejnaté rostliny, škrobo-cukernaté rostliny a mikrobiologické organismy). Druhý typ je odpadní biomasa, tedy odpadní produkty rostlinné a živočišné výroby, průmyslové a komunální rozložitelné odpady či splašky. Biopaliva získané z biomasy můžeme rozdělit do třech základních kategorií, které se liší podle způsobu využití zdroje, ze kterého se získává palivo [1].

1.2.1 První generace biopaliv

První generace biopaliv se získává z biomasy plodin či živočichů, které by se daly jinak využít pro výrobu potravin a krmných směsí. Jsou to plodiny jako kukuřice, brambory, obilí, cukrová řepa, cukrová třtina, plodiny obsahující rostlinný olej a tuk. Biomasa obsahující vysoký podíl sacharidů se obvykle využívá po hydrolýze k produkci bioethanolu fermentací za pomoci kvasinek, bakterií

či hub. Z biomasy bohaté na oleje je olej vylisován, nebo zpracován esterifikací do podoby například bionafty [2].

1.2.2 Druhá generace biopaliv

Druhá generace biopaliva je z biomasy, která nekonkuruje výrobě potravin. Jsou to tedy hlavně odpadní produkty z lesnické těžby, organické zbytky, speciální energetické plodiny, nebo použité oleje. Biopaliva druhé generace jsou oproti palivům první generace více energeticky účinné a jsou schopné v některých ohledech konkurovat fosilním palivům. Hlavním zástupcem je opět bioethanol, jenž může zcela nahradit benzín, nebo být jeho příměsí. Z organických zbytků se v bioplynových stanicích vyrábí anaerobní fermentací bioplyn a z odpadních látek se vyrábějí hnojiva [2,3].

1.2.3 Třetí generace biopaliv

Třetí generace biopaliv se vyrábí z biomasy řas a sinic. Produkce řas i sinic nekonkuruje výrobě potravin a její energetické výnosy jsou daleko vyšší než výnosy z obdobných zdrojů biomasy. Z biomasy řas získáváme lipidy, ze kterých následně vyrábíme paliva, například bionaftu, ethanol, methanol, butanol nebo i letecká paliva, jež jsou srovnatelná s palivy z ropy. Z řas můžeme také získat i další látky, které jsou využitelné zejména ve farmaceutickém, chemickém a potravinářském průmyslu. Typickým příkladem použití je výroba krmiv pro živočišné farmy a výroba vitamínů [3].

1.2.4 Porovnání

Výroba biopaliv první generace je energeticky výhodná a v průmyslu často používaná a známá technologie. V důsledku svojí jednoduchosti není nutné zavádět technologicky náročné procesy. Problém tkví v tom, že oproti výrobě druhé a třetí generace je dost neekologická a nehospodárná, protože se znehodnotí potenciál k výrobě potravin, což se může projevit růstem cen potravin a také vyvstává etická otázka, zda raději vyrábět energii, nebo nakrmit populaci.

Aby se eliminovali nedostatky první generace, tak se vyrábí biopaliva druhé generace z převážně odpadní biomasy. Tato výroba je ekologicky velice výhodná, jelikož můžeme zpracovávat odpad z výroby a jeho zpracováním, získat energii, nebo sekundární látky vhodné například pro výrobu hnojiva. Palivo z těchto procesů navíc bývá schopné konkurovat ceně a výkonu ropných paliv. Nevýhodou oproti výrobě 1. generace biopaliv, je technologická náročnost procesu, tedy volba a realizace vhodného procesu pro rozklad specifického druhu biomasy.

Vysoký potenciál se ukrývá v biopalivech 3. generace, jenž se získávají z biomasy řas a bakterií. Největší výhodou biomasy, která je určená k výrobě biopaliva 3. generace, jsou její nízké náklady na kultivaci spojené s minimálními požadavky na kvalitu půdy a skutečnost, že kultivační cyklus může probíhat celý rok. Výhodou jsou i nižší nároky na spotřebu vody, oproti ostatním plodinám určených k výrobě biopaliv. Rychlý exponenciální růst řas vede k vysokým přírůstkům biomasy, kdy se biomasa řas může za 3,5 hodiny zdvojnásobit. Udává se že výnosy řas vztažené na jednotku plochy za rok jsou i desetinásobné oproti nejvýnosnějším olejninám určených k výrobě biopaliva 1. a 2. generace [4]. Velkou výhodou využití řas je rozmanitost jejich použití. Některé kmeny mohou být geneticky upraveny k výrobě téměř jakéhokoli paliva, či jiných cenných látek, nebo například k odbourávání CO_2 ze vzduchu, nebo k čištění odpadních vod, pro které jsou odpadní vody zdrojem živin pro růst [5]. Jedním z hlavních problémů je energeticky náročné zpracování řas a následná extrakce cenných látek. Nevýhoda biomasy určené k výrobě 3. generace biopaliv spočívá v její relativně malé rozšířenosti a neschopnosti účinné kultivace v průmyslovém měřítku s konstantní kvalitou kultivovaného média, která není závislá na vnějších vlivech. Tento problém se odstraní kultivací ve fotobioreaktorech, což je však spojené s vysokými investičními náklady. V dnešní době zatím není velkopřmyslová kultivace řas konkurenceschopná, protože při použití dostupných technologií, které jsou relativně drahé, se do kultivace a zpracování řas musí vložit více energie, než kolik z ní získáme, což se odráží na vyšší ceně látek z řas získaných. Kultivační technologie biomasy 3. generace musí projít dalším vývojem, aby byly schopné konkurovat konvenčním a již v praxi osvědčeným metodám kultivace 1. a 2. generace biomasy.

1.3 Faktory ovlivňující kultivace řas

Aby řasy produkovali lipidové látky, musí probíhat fotosyntéza. „Fotosyntéza je děj biologického charakteru, kdy se sluneční energie přeměňuje na energii chemických vazeb organických látek. Během první fáze fotosyntézy, která se nazývá primární nebo světelná, se světelná energie absorbuje fotosyntetickými pigmenty. Absorbovaná energie se pak využije k vytvoření ATP. V druhé fázi fotosyntézy, která se nazývá sekundární, se produkty světelné fáze použijí k vytvoření organických látek [6]. Další nezbytné prvky pro průběh fotosyntézy jsou uhlík, vodík a kyslík. Tyto prvky se získávají z ovzduší nebo z vody. Během denní fáze procesu fotosyntézy spotřebují řasy CO_2 a produkují O_2 a uhlovodíky za přísunu vody. Během noci se naopak spotřebovává kyslík a do ovzduší odchází CO_2 . K průběhu noční fáze již není zapotřebí voda. Řasy také potřebují i jiné prvky pro optimální růst, zejména fosfor a dusík který mohou získat z odpadních vod. Dnes brání kultivaci řas v průmyslovém měřítku neschopnost dosáhnout

výsledků kultivace v laboratorních bioreaktorech s malým objemem. Jeden z důvodů je to, že v laboratorních podmínkách se snáze regulují parametry kultivace. Možnost regulace ve velkoobjemových reaktorech pro průmyslovou kultivaci je technicky náročná. Obecně nelze říct, který parametr má na růst a množení řas největší vliv, spíše se uvádí obecně parametry, které jsou zapotřebí při kultivaci řas. Růst řas ovlivňují abiotické faktory (světlo, teplota, živiny, obsah rozpuštěného kyslíku, obsah CO₂, pH, slanost roztoku a vliv potenciálně toxických látek), biotické faktory (přítomnost bakterií, hub, virů, a přítomnost jiných řas) a operační faktory (síly vznikající promícháváním média, ředění, metody sběru a jejich frekvence). Tyto faktory se mohou snadno regulovat v laboratorních podmínkách, například udržením stálé teploty, ovlivněním intenzity nebo změnou vlnové délky světla. Problém nastává při přenosu těchto faktorů do průmyslového měřítka. Jeden z problémů v průmyslové kultivaci, je dosažení rovnoměrné distribuce světla pro řasy. Čím více se kolonie řas rozrůstají, tím méně je distribuce světla rovnoměrná, to můžeme řešit přidáním dodatečných zdrojů světla nebo intenzivním mícháním. Dalším problémem je udržení stálosti mikroorganického prostředí, což lze ve velkých objemech regulovat jen velmi omezeně [7].

1.3.1 Teplotní rozsah

Při kultivaci řas je velice důležité dbát na vhodný rozsah teplot. Měl by být co nejbližší k optimální teplotě kultivace řas T_{opt} [°C], čímž pak dosáhneme nejvyššího přírůstku řas. Teplota kultivace ovlivňuje i chemické složení buňky, příjem živin a fixaci CO₂. Pokud teplota kultivace bude příliš vysoká, nebo nízká, může dojít k zastavení růstu řas [8]. Optimální teploty pro růst řas se obvykle udávají v teplotních intervalech. Odborná literatura se však neshoduje na jednotných teplotách.

Tabulka 1 Přehled optimálních teplot pro kultivaci řas [7–9]

Kmen	T_{opt} [°C]
<i>Neochloris oleoabundans</i>	30
<i>Chlorella vulgaris</i>	25 - 30
<i>Scenedesmus</i>	20 - 40
Antarktické řasy	7,8 - 18

Z tabulky 1 je vidět, že pro kmen *Scenedesmus* je rozsah optimálních teplot relativně široký. Z toho můžeme vyvodit, že určení konkrétní optimální růstové teploty není jednoznačné a bude záviset na specifických podmínkách kultivace. Obecně se udává, že pro růst běžných řas jsou ideální teploty v rozmezí 15°C – 30°C [7]. Antarktické řasy se vyznačují intenzivním růstem při

teplotách 7,8°C – 18°C [9]. V literatuře však můžeme najít i extremofilní sněžné řasy, které rostou za teplot nízko nad bodem mrazu ve sněhu a ve vodě, která vznikne roztáním sněhu.

Tabulka 2 Optimální teploty růstu sněžných řas [10]

Organismus	Optimální teplota [°C]	Teplotní rozsah růstu	Místo odběru
<i>Raphidonema tatrae</i>	4	10 nebo méně	Belánské Tatry, Československo
<i>Chlainomonas rubra</i>	4 nebo méně	0 až 4	Mt. Stuart, Wash.
<i>Cylindrocystis bréhissii</i>	10	1 až 20	Pugh Mtn., Wash.
<i>Cryptomonas frigoris</i>	5	2 až 10	Vysoké Tatry, Slovensko

V dnešní době se také využívá genového inženýrství, které může ovlivnit vlastnosti řas a zvýšit tak jejich schopnost růstu, výnosu užitečných látek, nebo je jen udělat odolnějšími vůči prostředí, ve kterém je kultivujeme [5]. Vědci se stále usilovněji snaží izolovat nové druhy řas pro různé využití, ať už v potravinářském, farmaceutickém nebo energetickém průmyslu, či pro zpracování odpadních vod. Každá řasa je svým způsobem unikátní, a proto každý druh vyžaduje jiné podmínky. Z tohoto důvodu vzniká celá řada bioreaktorů pro průmyslové využití, z nichž má každý své uplatnění.

2 Kultivační zařízení

Kultivační zařízení jsou obecně reaktory, ve kterých dochází k růstu biomasy z řas. Můžeme je rozdělit na reaktory pro heterotrofní a autotrofní kultivaci. Následující rozdělení platí jen pro bioreaktory, které využívají jako zdroj energie pro růst organismů světlo, nazýváme je fotobioreaktory a otevřené kultivační systémy. Kultivační zařízení dělíme podle kontaktu kultivačního média s okolním prostředím na otevřené a uzavřené systémy (fotobioreaktory) a hybridní systémy, které slučují charakteristiky dvou přechozích kategorií. Dále pak můžeme tyto zařízení třídit podle jejich geometrie. Fotobioreaktory se také mohou dělit podle typu míchaní kultivačního média a podle toho, zda probíhá výměna plynů přímo ve fotobioreaktoru, nebo v zadržovací nádobě, která je od fotobioreaktoru oddělena [11].

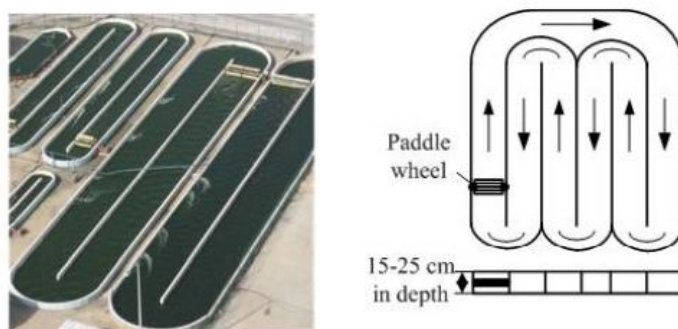
2.1 Kultivační systémy s otevřeným přístupem k atmosféře

Otevřené kultivační systémy se vyznačují přímým stykem řasové suspenze se vzduchem z atmosféry. Kultivační médium není fyzicky odděleno od vlivu okolního prostředí. Otevřené systémy jsou poměrně velké, mohou mít kruhový tvar o průměru jednotek až desítek metrů nebo mají tvar tratě, která může být i sto metrů dlouhá. Plocha těchto zařízení může zabírat stovky

hektarů, to je typické pro otevřené nemíchané systémy, ale i několik desítek m² jako většina systémů kaskádových systémů.

2.1.1 Otevřené traťové systémy

Otevřené traťové kultivační systémy obrázek 1 jsou tvořeny buď oddělenými, nebo spojitými kanály o délce několik desítek metrů až stovek metrů a šířce kolem několika metrů. Jejich hloubka zpravidla činí 0,15 - 0,25 m a poměr délky ku šířce kanálu se jako optimální udává 1:10. Tyto kanály jsou obvykle postaveny z betonu, mohou být vykopány v zemi, nebo jsou vyrobeny z dostatečně odolné plastové konstrukce. Proudění roztoku může být zajištěno čerpadlem, ale spíše se využívá lopatkové kolo, které je účinnější. Optimální rychlost proudění se uvádí od 0,1 m s⁻¹ do 0,3 m s⁻¹, neboť při nižších rychlostech může docházet k usazování řas na dně kanálu. Vyšší rychlosti jsou z hlediska růstu řas výhodnější, ale výkon potřebný pro dosažení průtokové rychlosti s jejím zvyšováním prudce roste. Díky vyšším rychlostem dochází k lepšímu promíchávání kultivačního média a řasy jsou rovnoměrněji vystavené slunečnímu záření, živinám a CO₂. Traťové systémy jsou nejčastěji využívány ze všech otevřených kultivačních systémů, zejména díky jejich technicky nenáročné konstrukci a nízkým provozním a investičním nákladům. Udává se, že denní přírůstek řas za den může být 10 až 25 g na m² ozářené plochy a koncentrace řas může být i 1 g sušiny na litr. Výnosy jsou ale silně ovlivněné okolními podmínkami [11–13].

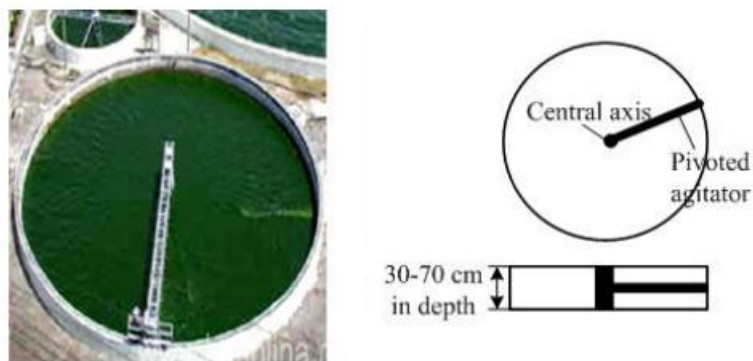


Obrázek 1 Otevřený traťový kultivační systém [12]

2.1.2 Kruhové otevřené kultivační systémy

Tyto systémy mají tvar kruhu a jejich průměr je obvykle kolem 45 m a mohou být hluboké 0,3 – 0,7 m. Pro vznik cirkulace oběhu je zapotřebí míchadlo, které může mít nejčastěji jedno nebo dvě ramena, která promíchávají roztok otáčením kolem středu systému. Průměr kruhových otevřených kultivačních systémů je omezen pouze délkou míchacího ramena. Míchání pomocí ramena je energeticky náročné a pro průměry otevřených kultivačních systémů, které jsou větší než 50 m je nedostačující pro promíchání média. Tyto fotobioreaktory se používají zejména ke

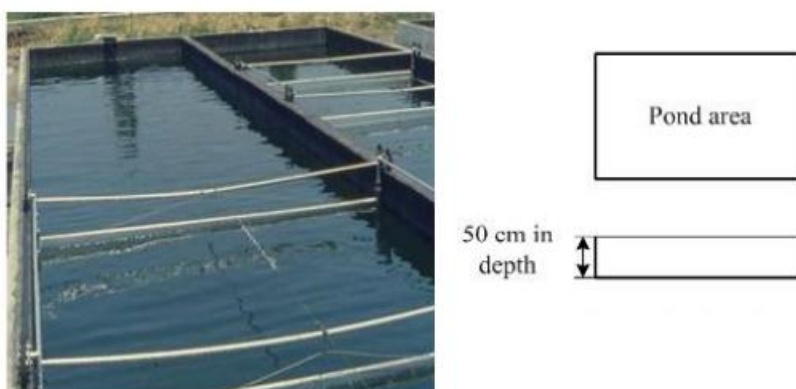
tvorbě řas pro potravinářský průmysl (*Chlorella*), nebo mohou být určeny pro úpravu odpadních vod [12]. Schéma a vzhled kruhového otevřeného kultivačního systému je zobrazen na obrázku 2.



Obrázek 2 Otevřený fotobioreaktor otevřeného typu [12]

2.1.3 Otevřené nemíchané kultivační systémy

Velmi často se používají otevřené nemíchané kultivační systémy (obrázek 3), které na rozdíl od dvou přechozích typů nemají zařízení, které by promíchávalo kultivační médium s řasami. Kultivační médium ale může být velmi mírně promícháváno přirozeně působením větru a konvekce. Tyto systémy se mohou vytvořit z jezer přírodního původu, nebo účelově postavit. Uměle postavené objekty mají obvykle obdélníkovou geometrii a hloubku do 0,5 m. Otevřené nemíchané systémy se vyznačují technicky nejjednodušší stavbou a velmi nízkými investičními i provozními náklady, jsou však limitované zejména škálou kultivovatelných řas, které jsou charakteristické extrémofilním chováním, například tolerancí na velmi vysokou slanost nebo zásaditost vody. Odolnost vůči slanému či zásaditému prostředí řasám zajišťuje výhodu nad ostatními organismy, které ve slaném nebo zásaditém prostředí nejsou schopny přežít. Tyto technologie jsou také limitovány velmi nízkými přírůstkem biomasy a s tím souvisejícími vysokými nároky na zpracování řídkého roztoku řas [11].



Obrázek 3 Otevřený nemíchaný fotobioreaktor [12]

2.1.4 Kaskádové otevřené kultivační systémy

Jedním z dalších typů otevřených systémů je typ kaskádový, který je charakterizován prouděním kultivačního roztoku po systému kaskád z nakloněných rovin do zadržovací nádrže, ze které je pak médium obvykle čerpadlem dovedeno zpět na do systému kaskád. Na obrázku 4 se nachází kaskádový systém, který se nachází v areálu ALGATECH Mikrobiologického ústavu AVČR poblíž Třeboně. Po nakloněné dráze o šířce až několika metrů proudí tenká vrstva řasové suspenze o rychlosti kolem $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Po nakloněné rovině proudí roztok řas v tenké a husté vrstvě, ve které jsou řasy rovnoměrně vystaveny světelnému záření. Výsledkem této kultivace je intenzivní růst biomasy řas, který zpomaluje, až když kultivační médium dosáhne velmi vysoké koncentrace řas. Předností kaskádového kultivačního systému jsou hlavně nízké náklady spojené se sklizením díky vysoké koncentraci řas, která je až stonásobně vyšší než u traťových systémů. Kaskádové systémy se v průmyslovém měřítku příliš neosvědčily, protože měly několik problémů, zejména se zajištěním průtoku suspenze a s kontaminací. Dnes se tyto systémy nepoužívají pro komerční účely, protože jejich výnosy nejsou dostatečně vysoké vzhledem k vysokým investičním i provozním nákladům [11,14,15].



Obrázek 4 Kaskádový fotobioreaktor [14]

2.2 Uzavřené fotobioreaktory

V uzavřených fotobioreaktorech je médium fyzicky odděleno od okolního prostředí, což má výhodu především v tom, že na suspenzi nemá vliv okolní prostředí a kontaminace z okolí je omezena na minimum. Uzavřenost systému je nutná z hlediska přesné regulace provozních parametrů. Díky malé hrozbě kontaminace a přesné regulaci kultivačních podmínek, můžeme v uzavřených fotobioreaktorech opakovaně kultivovat kmeny řas, které ke svému růstu potřebují kombinaci téměř sterilního prostředí a velmi specifických kultivačních podmínek, jakých nejsme schopni dosáhnout v otevřených fotobioreaktorech. Po celém světě existuje mnoho typů

uzavřených fotobioreaktorů, které se rozdělují zejména dle samotné geometrie kultivační nádoby, která může obvykle nabývat tvaru desky, trubky nebo i pyramidy či jiných tvarů. Konstrukce uzavřených fotobioreaktorů je charakteristická použitím nejčastěji transparentních materiálů, jako jsou plasty či sklo, avšak nezbytným prvkem jsou také ocelové konstrukce. Vývoj uzavřených komerčních fotobioreaktorů je relativně nový obor, který započal vývojem zhruba před 70 lety, ale až v posledních 30 letech se intenzivně rozvíjí metody této kultivace [11].

2.2.1 Trubkové fotobioreaktor

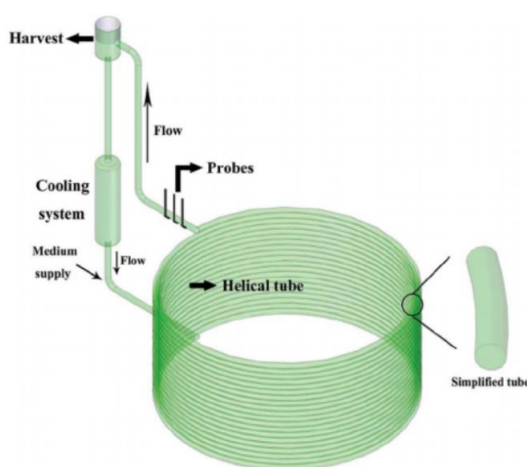
Trubkové fotobioreaktory jsou typické svojí konstrukcí skládající se z řady rovných trubek o stejných průměrech a délkách, ve kterých může proudit horizontálně, vertikálně či pod sklonem suspenze vody, řas, plynů a živin. Fotobioreaktor se může skládat z jedné nebo více trubek spojených na koncích trubkami ve tvaru U (serpentinové), nebo manifoldem, kdy jsou trubky v řadě na začátku a konci vybaveny společným přívodem a odvodem suspenze. Tím se může dosáhnout vysokého využití malé plochy v jednom okruhu. Pokud zařadíme několik takových okruhů nad sebe, můžeme dosáhnout ještě vyššího využití zastavěné plochy. Proudění je možné ovlivnit pomocí čerpadla, nebo pomocí probublávání plynu. Suspenze cirkuluje mezi uzavřenou plochou a výměníkem, který je potřebný pro výměnu O_2 a CO_2 . Důvodem je, že při vysokém obsahu O_2 může docházet k inhibici řas, což má za následek snížení jejich růstu. Dle uspořádání trubek můžeme trubkové fotobioreaktory dělit na vertikálně uspořádané serpentinové (obrázek 5), horizontální manifoldové (obrázek 6) a spirálové (obrázek 7) nebo na nakloněné fotobioreaktory, které jsou konstrukčně podobné horizontálním fotobioreaktorům [11,12,14].



Obrázek 5 Vertikální trubkový fotobioreaktor [14]



Obrázek 6 Horizontální fotobioreaktor [14]



Obrázek 7 Fotobioreaktor spirálového typu [16]

2.2.2 Deskové fotobioreaktory

Deskové fotobioreaktory jsou typické svojí stavbou, která se skládá z obdélníkové transparentní nádoby o tloušťce 0,01 - 0,30 m. Obvykle jsou tyto fotobioreaktory nakloněné kolmo ke zdroji světelného záření, aby bylo co nejvíce světla využito ve fotosyntetických procesech. Na obrázku 8 se nachází deskový fotobioreaktor se svisle orientovanou kultivační nádobou. Oběh kultivačního média může být zajištěn čerpadlem nebo probubláváním. Probublávání technologií bublinkového sloupce je velmi častá volba pro vertikálně orientované ploché fotobioreaktory. Tato technologie umožňuje snadné míchání, odkysličování a přidávání CO₂ do suspenze. Pro zajištění výměny plynů přímo v kultivační komoře je nejideálnější umístit systém distribuce plynu do dolní části komory fotobioreaktoru. Bubliny vzduchu nebo jiného plynu stoupají zespodu až k hladině po nejdelší možné dráze. Tím míchají kultivační médium a brání v sedimentaci řas. Další variantou je promíchávání kultivačního média v oddělené nádobě určené k výměně plynů. Zde

samotný oběh kultivačního média mezi oddělenou nádobou a kultivační komorou zajišťuje čerpadlo. Pro konstrukci stěn deskového fotobioreaktoru se nejčastěji využívají skleněné nebo plastové transparentní materiály. Experimentuje se s tloušťkou a počtem skel, či jejich náklony, kterými pak docílíme ideálního odrazu a rozptylu světla v komoře fotobioreaktoru. Cílem je rovnoměrnější vystavení řas slunečnímu záření a tím intenzifikace růstu řas. Objemy Deskových fotobioreaktorů mohou dosahovat až několika m³. Tepelná regulace se může provádět ostřikem stěn nádoby fotobioreaktoru vodou, zastíněním, nebo samotnou regulací natočení plochy fotobioreaktoru, pokud to je technicky možné [11,12].



Obrázek 8 Deskový fotobioreaktor [12]

Jeden z otočných deskových fotobioreaktorů navrhl Hindersin a kol. (2013). Tento fotobioreaktor (obrázek 9) sledující Slunce využívá technologii dvouosého sledovače Slunce (solar tracker), jenž umožňuje rotační pohyb ve dvou osách. Pohon sledující polohu Slunce nad horizontem je realizován pomocí elektrického aktuátoru a rotaci v horizontálním směru zajišťuje elektrický pohon se šnekovou převodovkou, jenž otáčí hřídelí konstrukce. Spojením rotačních pohybů v obou osách se panel vybavený deskovými komorami s kultivačním médiem natáčí do optimální polohy. Řešení využívá až o 45 % více solární energie než v případě kultivace ve stacionárním fotobioreaktoru. Pokud dojde k přehřátí média, nebo k vystavení řas příliš vysoké intenzitě slunečního záření, tak se pohon přepne do režimu stínění. Panel se pak natočí do pozice s nižší intenzitou slunečního záření, kde setrvává, dokud se kultivační médium dostatečně neochladí. Následně se pohon opět přepne do režimu sledování Slunce. Toto otočné řešení je nevýhodné především vysokými investičními náklady oproti konvenčním deskovým fotobioreaktorům. Pro použití například ke sledování Slunce v polárních oblastech tato konstrukce není ideální, jelikož není schopna otočení o 360° [17].

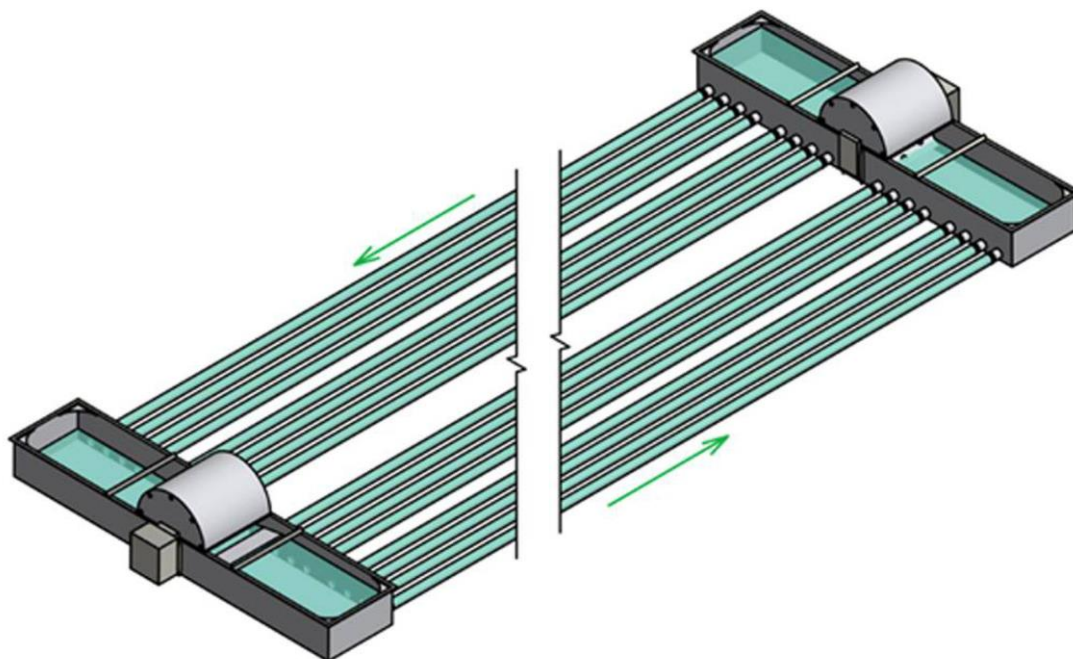


Obrázek 9 Deskový fotobioreaktor sledující Slunce [17]

2.3 Hybridní fotobioreaktory

Spojením technologie uzavřených a otevřených fotobioreaktorů chceme docílit nízkých provozních nákladů otevřených fotobioreaktorů a zároveň vysoké regulovatelnosti a nízkého rizika kontaminace uzavřených systémů. Výsledné zařízení vzniklé spojením technologií nazýváme hybridní fotobioreaktor. Hybridní fotobioreaktory se skládají ze dvou systémů, první je otevřený systém, kde probíhá výměna plynů. V tomto systému jsou řasy vystaveny slunečnímu záření, také zde mohou být umístěna zařízení typická pro otevřené systémy, například lopatkové kolo. Otevřená část fotobioreaktoru zajišťuje rychlý růst biomasy z řas. Druhý systém je uzavřený, čímž se sníží riziko kontaminace, a i v této části jsou řasy vystaveny slunečnímu záření. Uzavřená část také vystavuje řasy stresu nedostatkem živin, což má za následek tvorbu zásobních látek řas, které jsou cílem kultivace (pigmenty, mastné kyseliny, vitamíny, antioxidanty, proteiny, steroly, antibakteriální a antivirové látky) [18]. K vytvoření části uzavřeného systému odděleného od atmosféry, se mohou použít nafukovací vaky, které slouží jako membrána mezi kultivačním prostorem a okolím. Hybridní systém, který vznikl spojením trubkového fotobioreaktoru a otevřeného systému traťového typu je zobrazen na obrázku 10. Obecně hlavním nedostatkem těchto systémů je špatná optimalizace odvodu O_2 , který vzniká při fotosyntéze řas. Další nevýhodou je termoregulace, proto musíme chladit kultivační médium zahřáté například skleníkovým efektem vaku. Tyto systémy se obtížně čistí a jsou náchylné k biofoulingu, což je nežádoucí proces usazování a zanášení zařízení biologickou hmotou, která nepříznivě ovlivňuje

prozařování kultivačního média a může zde docházet k vyhánění zachycených řas a následné kontaminaci zpracovávaného kultivačního média [14,19,20].



Obrázek 10 Hybridní fotobioreaktor [20]

2.4 Míchání kultivačního média v otevřených a uzavřených systémech

Pro správný růst řas a průběh fotosyntézy je nutné dostatečně promíchávat kultivační médium. Udává se, že míchání zvyšuje produktivitu kultivace řas. Míchání roztoku s vysokou koncentrací řas způsobuje rovnoměrné vystavení řasové kultury slunečnímu záření a tím se zintenzivní průběh fotosyntézy. Míchání by mělo být zároveň šetrné, protože rostoucí intenzita míchání může řasovou kulturu stresovat. Stres způsobí zpomalení průběhu fotosyntézy, nebo přeruší fotosyntézu úplně a tím se zastaví i růst řas [21]. Pro promíchání kultivačního média v kultivačních systémech se používá technologie míchání pomocí mechanického míchadla, čerpadla nebo bublinkového sloupce. Technologie mechanického míchadla jsou nejvhodnější pro otevřené traťové systémy. Pro uzavřené fotobioreaktory je vhodné řešení míchání čerpadlem, nebo bublinkovým sloupcem. Míchání bublinkovým sloupcem je pro uzavřené systémy nejobvyklejší. Je výhodný především z hlediska jednoduché instalace a provozu. Bublinkový sloupec je více šetrný k řasám než čerpadlo. Fotobioreaktory s tímto typem míchání jsou vhodné i pro pěstování náchylných řas, které nemohou být kultivovány mícháním čerpadly. Míchací zařízení může být umístěno buď přímo v kultivační nádobě, nebo k míchání a výměně plynů dochází v okruhu odděleném od kultivační zóny [11,21].

2.5 Porovnání otevřených a uzavřených kultivačních systémů

Uzavřené fotobioreaktory se využívají zejména díky vysoké účinnosti na malé ploše. Přírůstek i hustota řas v uzavřených fotobioreaktorech je několikanásobně vyšší než u otevřených systémů, což má za následek vysoké snížení nákladů na sběr. Uzavřené fotobioreaktory skýtají mnoho možností přesné regulace parametrů jako je pH, obsah plynů, teplota, množství slunečního záření a promíchávání. Fyzické oddělení média a okolí umožňuje dosáhnouti minimálního rizika kontaminace a ovlivnění složení suspenze. Pro komerční využití se používají oba typy, které se mohou instalovat do skleníků, jejichž součástí je i tepelný výměník, který ve spojení s ostřikováním reguluje teplotu procesu a vhodným zastíněním nebo natočením fotobioreaktoru je možné regulovat intenzitu slunečního záření. Vhodnou regulací je pak možné v jednom uzavřeném systému kultivovat mnoho druhů řas. Největší nevýhodou uzavřených systémů je vysoká cena investičních nákladů, která může pohybovat kolem tisíců až statisíců korun za m² zastavěné plochy. Investiční náklady vztažené na m² osvětlené plochy fotobioreaktoru se obvykle pohybuje od několika stovek do několika tisíců korun. Investiční náklady pro stavbu fotobioreaktorů vztažené na plochu jsou téměř vždy vyšší než pro stavbu otevřených kultivačních systémů [14].

Otevřené systémy jsou velmi využívané kvůli své relativní jednoduchosti a s ní souvisejícími nízkými náklady jak na provoz, tak na stavbu. Náklady na výstavbu i provoz jsou nejvyšší pro oběhové typy, u kterých se cena průmyslových zařízení pohybuje kolem 10 - 100 milionů korun v závislosti na velikosti, typu podloží a uplatněných technologiích pro optimalizaci procesu. Náklady na výstavbu se také vyjadřují investičními náklady vztaženými na plochu. Uvádí se, že pro otevřené systémy se náklady vztažené na plochu pohybují kolem 10 - 50 amerických dolarů na m². Velkou výhodou otevřených kultivačních technologií je možnost jednoduchého zvyšování kapacity, kdy se vybuduje pouze více podobných kultivačních systémů, které se mohou propojit. To se využívá hlavně u otevřených kultivačních systémů traťového typu. Výhodou je také možné začlenění těchto zařízení do systému zpracování odpadních vod. Jednoznačná nevýhoda otevřených typů spočívá v potřebné velikosti zastavěné plochy, což v některých případech může být velký problém, hlavně v hustě zalidněných oblastech. S velikostí zastavěné plochy souvisí i velký odpar kultivačního média. Z tohoto důvodu není tento typ kultivačních systémů vhodný v oblastech s nedostatkem vody. Okolní podnebí ovlivňuje a velice omezuje tepelnou regulaci kultivace. Vysoké riziko kontaminace suspenze jinými konkurenčními mikroorganismy, viry a houbami, má za následek, že v otevřených kultivačních systémech můžeme pěstovat jen velmi málo druhů řas pro komerční účely. Jedním z dalších nedostatků je i skutečnost, že ve velkém

obsahu suspenze je jen malá koncentrace řas. V lepších případech až 0,5 g na litr. Nízká koncentrace řas zvyšuje náklady na sklizení a zpracování biomasy řas. Náklady spojené se zpracováním biomasy v otevřených systémech jsou vyšší než u uzavřených typů, kde je koncentrace řádově vyšší a náklady na sklizeň nižší. Ve velmi vhodných podmínkách je možné docílit růstu řas v otevřených systémech na jednotku plochy kolem 10 - 20 g na m² za den, to je dáno hlavně podnebím, teplotou, srážkami, promícháváním, výměnou plynů a také druhem kultivovaných řas [11]. Kontaminace je další faktor ovlivňující kultivaci, proto se v otevřených systémech nejčastěji kultivují kmeny, které nejsou ke kontaminaci náchylné. Aplikace otevřených systémů je typická tím, že se nedostatky kvality nahrazují kvantitou, respektive plochou, na níž kultivace probíhá. Oproti tomu jsou fotobioreaktory, kvůli jejich geometrii, hustotě biomasy a využití nadzemního prostoru, plošně úspornější. Uvedené charakteristiky uzavřených i otevřených systémů úzce souvisí s jejich cenou, která je úměrná složitosti zařízení, možnosti regulace a optimalizace procesu kultivace. Možnost regulace a optimalizace se promítá i do provozních nákladů. Provozní náklady otevřených systémů jsou velmi nízké, kdežto provozní náklady fotobioreaktorů jsou značně vyšší.

Kultivace řas je velice progresivní metoda budoucnosti, která se na první pohled nejeví jako obtížný proces, ale opak je pravdou. Byly vytvořeny různé druhy fotobioreaktorů, s cílem připravit co nejlepší podmínky pro růst kultivovaných řas. Obecně se nedá říct, který ze systémů je lepší, protože každý má své výhody a nevýhody. Tyto technologie limitují především investiční a provozní náklady, ale i například možnost kultivace více druhů řas po sobě. Další etapa spočívá ve vývoji zařízení, které bude dosahovat investičních nákladů otevřených systémů a zároveň bude charakteristické produktivitou a flexibilitou kultivace, jenž lze dosáhnout v uzavřených fotobioreaktorech. Pokud by se to podařilo, mohla by nastat nová revoluce v energetickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Ucelený přehled porovnání otevřených a uzavřených systémů se nachází v tabulce 3.

Tabulka 3 Porovnání uzavřených a otevřených kultivačních systémů [12,14,22,23]

Parametr	Otevřené systémy	Fotobioreaktory
Nároky na plochu	Vysoké	Nízké
Ztráta vody	Velmi vysoká, nutná regulace slanosti	Nízká
Ztráta CO ₂	Vysoká, v závislosti na hloubce	Nízká
Koncentrace O ₂	Nízká, samoregulace	Nutná instalace výměníku plynů
Teplota	Rozdílná, regulace hloubkou	Nutnost chlazení
Míchání	Nízká intenzita	Vysoká intenzita, rychlé proudění, probublávání
Čištění	Není téměř nutné	Nutné, řasy se přilepují na stěny, čištění omezuje životnost
Riziko kontaminace	Velmi vysoké, omezuje diverzitu řas vhodných ke kultivaci	Téměř žádné
Kvalita biomasy	Různá	Vysoká, možnost dosáhnout produkce stálé kvality
Koncentrace biomasy	Nízká, 0,1 - 0,5 g l ⁻¹	Vysoká, mezi 2 - 8 g l ⁻¹
Flexibilita	Nízká, pouze několik druhů řas, změna kultivovaných řas je problematická	Vysoká, mnoho druhů ke kultivaci, změna kultivovaného druhu není obtížná
Regulace a opakovatelnost	Nízká	Vysoká
Závislost na okolí	Vysoká	Střední
Doba kultivace	6 - 8 týdnů	2 - 4 týdny
Investiční náklady	Cca 100 000 \$ na hektar	Cca 1 000 000 \$ na hektar
Náklady na provoz	Nízké (promíchávání, přísun CO ₂)	Vysoké (přísun CO ₂ , odvod O ₂ , regulace pH, chlazení, čištění, údržba)
Náklady na sklizení	Vysoké, nízká koncentrace biomasy	Nízké, vysoká koncentrace biomasy

3 Cíle práce

Cílem bakalářské práce je upravit původní konstrukci deskového fotobioreaktoru do podoby, která bude umožňovat kultivaci polárních řas při maximálním využití solární energie během 24hodinového cyklu polárního dne. Kultivace bude probíhat ve dvou etapách o různých provozních podmínkách. První testovací etapa je charakteristická tím, že bude probíhat v Botanickém ústavu AVČR v Třeboni. Během první etapy budou uvedeny do provozu mechanické a elektrické prvky fotobioreaktoru, bude vyzkoušen provoz zařízení při kultivaci ve venkovních podmínkách a budou se hledat nedostatky, které se před začátkem druhé etapy vyřeší. Pro kultivaci se zkušebně použije experimentální kmen řasy vyizolované z oblasti Svalbardu. Druhá etapa bude probíhat na souostroví Svalbard (Špicberky). Zde bude fotobioreaktor umístěn ve venkovním prostředí v areálu České polární stanice Josefa Svobody nacházející se v Longyearbyenu. Kultivace v arktickém podnebí Svalbardu má za cíl získat informace týkající se růstu polárních řas v uzavřeném prostředí fotobioreaktoru, který bude vybaven měřicí aparaturou pro sběr dat určených k optimalizaci procesu kultivace polárních kmenů. Cílem je také získat informace o látkách, jenž vyprodukují polární kmeny při celodenním slunečním cyklu v přirozených podmínkách. Konstrukce a testování bioreaktoru je součástí projektu „Polyphasic assessment of diversity of phototrophic microorganisms from cold environments and their bioprospection potential. CZECH-INDIAN COOPERATIVE SCIENTIFIC RESEARCH, MŠMT, Code 2019LTAN, řešitelů Doc. Linda Nedbalová BÚ AV ČR Třebon a Prof. Josef Elster (CPE Prf JU České Budějovice). Požadavek zadavatele CPE Prf JU byl takový, aby se zachovala původní konstrukce, tedy kultivační nádoba a rám. Dalším požadavkem bylo, aby celková konstrukce mohla být rozebíratelná a vhodná pro lodní transport na Svalbard. Cílem bakalářské práce je optimalizovat veškeré úpravy do kompaktní a flexibilní podoby. Je také nutné, aby celkové technické řešení nebylo příliš složité a následné sestavení bylo uživatelsky přívětivé. Z důvodu plánované instalace deskového fotobioreaktoru na vyvýšenou plochu je také nutné, aby jednotlivé konstrukční prvky nebyly příliš těžké pro manipulaci. Jedním z dalších významných požadavků je, aby fotobioreaktor využíval maximum dostupné sluneční energie. Z toho důvodu by měla být komora fotobioreaktoru otáčivá podle pohybu slunce, podobně jako je toho docíleno u moderních fotovoltaických panelů. Cílem je, aby řasy pohltily co nejvíce sluneční energie během 24hodinového cyklu svalbardského polárního dne, kdy Slunce stále rotuje nad obzorem.

4 Provozní podmínky

4.1 Místní faktory

Druhá etapa provozu je velmi náročná na provozní podmínky. Kultivace bude probíhat ve fotobioreaktoru, který bude umístěn na České arktické vědecké stanici Josefa Svobody v Longyearbyenu na Svalbardu (obrázek 11). Pro provoz fotobioreaktoru je zásadní, že je stanice připravena na základní technické opravy v případě závady zařízení. Fotobioreaktor bude konkrétně umístěn na střeše lodního kontejneru ve výšce zhruba 2,5 metru nad zemí. Aby byl provoz reaktoru co nejspolehlivější, měl by návrh počítat především s vlivy teplot, prašností, vlhkostí či slaností prostředí, ale také i s povětrnostními podmínkami.



Obrázek 11 Česká polární stanice Josefa Svobody nacházející se v Longyearbyenu [24]

4.1.1 Prašnost

Jedním z významných rizikových faktorů je prašnost. Polární stanice, kde se fotobioreaktor bude provozovat, je v těsné blízkosti silnice, po které jezdí nákladní automobily převážející uhlí do místní elektrárny. Musíme tedy počítat jak s vlivem prachu z vozovky, tak především s vlivem jemného uhelného prachu, který by se mohl dostat do vnitřního prostoru pohonného mechanismus fotobioreaktoru. To by v daných podmínkách bez možnosti rychlého získání náhradních dílů mohlo být fatální pro činnost zařízení.

4.1.2 Vlhkost a slané prostředí

Polární stanice Josefa Svobody se nachází přímo na pobřeží Svalbardu, ten je obklopen Severním ledovým oceánem. Zařízení bude bez ochrany vystaveno zdejšími podnebními vlivům, zejména srážkám, které jsou v letních měsících v podobě deště. Musíme počítat s vlivem vlhkého a slaného prostředí, které může způsobit korozi konstrukce. Kdybychom nezvolili vhodnou volbu

materiálu k ochraně před korozí, mohla by koroze během krátké doby poškodit zařízení, do takové míry, že by bylo potřeba zařízení opravit, což by v daných podmínkách mohlo být velice náročné. Průměrné srážky za měsíc od června do srpna se pohybují od 38 mm do 70 mm na m² a průměrná vlhkost se obvykle pohybuje mezi 80 % - 90 % [25].

4.1.3 Teploty

Z dat dostupných ze serveru Timeanddate [26] byla vytvořena tabulka dat (tabulka 4), ve které jsou zobrazené průměrné, minimální a maximální teploty z průběhu let 2015 - 2020. Teploty byly naměřeny meteorologickou stanicí nacházející se na longyearbyenském letišti.

Tabulka 4 Přehled teplot v oblasti Longyearbyenu mezi lety 2015 - 2020 [26]

Měsíc	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září
Minimální teplota vzduchu od roku 2015 - 2020 [°C]	-12	-1	3	0	-9
Maximální teplota vzduchu od roku 2015 - 2020 [°C]	9	12	21	17	12
Průměrná teplota vzduchu od roku 2015 - 2020 [°C]	-0,67	4,83	8,33	6,33	3,33

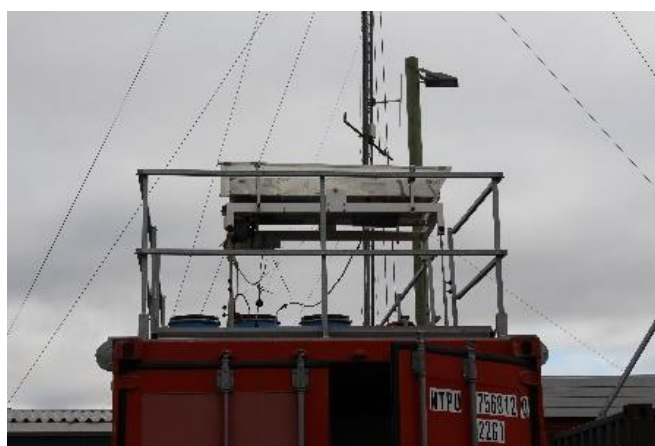
Kultivace řas by měla probíhat od začátku června do první poloviny září. Rozsah provozních teplot daných okolím, na které bude muset být zařízení dimenzováno, se bude pohybovat od 0°C do 30°C. Zařízení nebude vybaveno systémem regulace teplot. V situaci, kdy dlouhodobě poklesnou teploty pod bod mrazu, bude nutné vypustit médium z kultivační komory, aby nedošlo k jejímu poškození fázovou přeměnou vody na led. Při zkušební kultivaci v ČR během léta za zvýšených teplot nad 30°C bude vhodné kultivační komoru chladit, například ostříkem komory chladnou vodou, nebo částečným zastíněním.

4.1.4 Povětrnostní podmínky

Fotobioreaktor bude během druhé etapy umístěn ve venkovním prostředí na střeše lodního kontejneru (obrázek 12, obrázek 13), Vedle dešťových srážek bude zařízení vystaveno také silným poryvům větru. V našem případě bude fotobioreaktor provozován v letním období od června až do konce poloviny září, kdy je podnebí na Svalbardu nejkldnější a poryvy větru dosahují maximálně 50 – 60 km h⁻¹.



Obrázek 12 Střecha lodního kontejneru, kultivační plošina, fotil: prof. Ing. Josef Elster, CSc



Obrázek 13 Lodní kontejner, kultivační plošina, fotil: prof. Ing. Josef Elster, CSc

5 Optimalizace otočného deskového fotobioreaktoru

Původní konstrukce deskového fotobioreaktoru (obrázek 14) byla vytvořena Ing. Pavlem Součkem, který pracoval pro Mikrobiologický ústav AVČR v Třeboni. Výkresová dokumentace zařízení v původním stavu nebyla k dispozici, ani konkrétní informace týkající se materiálu, ze kterého je fotobioreaktor vyroben. Bylo předpokládáno, že materiál je nerezová ocel, protože na původní konstrukci nejsou známky rzi. Z důvodů chybějící výkresové dokumentace původní konstrukce zařízení bylo nutné proměřit pomocí pásmového metru a posuvného měřítka základní rozměry stávajícího zařízení.



Obrázek 14 Fotobioreaktor původní podoba, fotil: prof. Ing. Josef Elster, CSc.

Kultivační nádoba se skládá ze základního rámu tvořeného třemi U–profilů – 60, které jsou k sobě svařeny 45° pokosy do základní rámové konstrukce tvaru U. Zadní a přední stranu tvoří dvě skleněné desky o tloušťce 7 mm. Na tyto desky jsou k základnímu rámu z U–profilů umístěny 2 obdélníkové vnější rámy z dutého čtvercového profilu TR 4HR 20 x 1, které tvarem kopírují základní rám. Základní rám, skleněné desky a vnější rám jsou staženy pomocí šroubů M10 x 150. Tyto šrouby procházejí skrze tři nerezové trubky TR $\varnothing 14 \times 2$ o délce 20 mm a 60 mm, jenž jsou navařené na rámy (obrázek 15). Šroub je na svém konci utažen maticí M10 k trubce. Tento prvek se na nádobě nachází celkem desetkrát. Jako těsnící prvek je použita guma mezi sklem a vnějším a základním rámem. Vodotěsnost nádoby byla odzkoušena a nebyla zaznamenána žádná netěsnost. K vypuštění kultivačního média z fotobioreaktoru slouží nerezový kohout (obrázek 16), jenž je našroubován na trubce s vnějším závitem G1/2, která je přivařena do dna nádoby. V ose komory je také zespoda k základnímu rámu přivařena nerezová deska o rozměrech 121 x 51 x 19

mm. Na středu desky je pak přivařena hřídel o průměru 20 mm, která má na svém konci drážku 6P9 (obrázek 18) pro pero 6e7 x 6. Výkres nádoby je k dispozici v příloze ve výkresu 001-002.



Obrázek 15 Fotobioreaktor pohled na bok nádoby



Obrázek 16 Vzorkovací kohout

Spodní rám (obrázek 17) je vytvořen svařením několika rámuů do jednoho celku. Ve středu spodního rámu je umístěn ložiskový domek. První z rámuů má obdélníkový tvar o rozměrech 560 x 565 mm a je tvořen čtyřmi dutými čtvercovými profily TR 4HR 30 x 1, které jsou k sobě svařeny pokosy. Součástí tohoto rámu je i U-profil 120 x 3 – 500, procházející středem obdélníku, ke kterému je z obou stran přivařen. Druhý rám má tvar kruhu o vnějším průměru 800 mm, který je vytvořen ohnutím dutého obdélníkového profilu TR 4HR 34 x 28,5. Čtvercový rám je podepřen čtyřmi nohama z dutého čtvercového profilu TR 4HR 30 x 1 – 200, které jsou přivařeny k rohům rámu. Nohy mají zespoda navařeny plech P3 30 x 30, v jehož ose se nachází díra se závitem M8,

do níž je zašroubována krátká závitová tyč M8. Na konci závitové tyče se nachází čtvercový plech P3 50 x 50.



Obrázek 17 Spodní rám



Obrázek 18 Hřídel nádoby

V jednoduchém ložiskovém domku, nad kterým je uložen distanční a zároveň krycí prstenec (obrázek 19), se nachází dvě ložiska značky KINEX 6204-2ZR (obrázek 20, obrázek 21). Ložiska jsou jednořadá radiální kuličková s ocelovou klecí. Z obou stran jsou ložiska kryta plechem a jsou nerozebíratelná. Mazivo ložiska je určeno do teplot od -30°C do 110°C .



Obrázek 19 Uložení, krycí prsten



Obrázek 20 Ložisko KINEX 6204-2ZR



Obrázek 21 Ložisko v ložiskovém domku

Z prvního pohledu se celá konstrukce jevila jako velice kvalitně vyrobené stabilní zařízení. Nejdříve byly vizuálně zkontrolovány nerezové svarové spoje rámu i nádoby. Vizualní kontrolou nebyla odhalena žádná vada svarů a podrobnější kontrola nebyla zapotřebí. Dále byla zkontrolována skleněná stěna kultivační komory, kde taktéž nebylo nalezeno žádné poškození. Kontrola gumového těsnění proběhla pomocí zkoušky vodotěsnosti fotobioreaktoru. Komora byla naplněna vodou a po dobu několika hodin kontrolována, zda neubývá voda v kultivační komoře. Nebyly zaznamenány poklesy hladiny ani průsaky. Největší technologickou chybou konstrukce bylo zakončení hřídele. Na konci hřídele se nachází drážka pro pero, která má jeden konec volný. V původním konceptu zařízení se nejspíše uvažovalo, že by se konec hřídele osadil řemenicí s řemenem a průmyslovým elektromotorem. Tento způsob pohonu by nebyl vhodný do podmínek Svalbardu, kde by byl vystaven nepříznivým vlivům okolí, tedy hlavně prachu a vlhkosti spojené se slaností. Abychom pohonný mechanismus uchránili před poškozením a zároveň zajistili bezpečnost provozu, museli bychom vytvořit ochranný kryt, jehož velikost by mohla způsobit obtíže zejména pro přepravu.

6 Návrh pohonného mechanismus

Z požadavku zadavatele vyplývalo, že kultivace řas by měla splnit podmínku využití maximálního množství solární energie natáčením komory fotobioreaktoru tak, aby sluneční záření dopadalo kolmo na skleněnou stěnu komory. Prvotní návrh měl umožnit pohyb zařízení ve dvou osách, ve směru, který by umožnil sledování polohy Slunce náklonem desky a její rotací. Pro naši práci velmi zajímavý typ fotobioreaktoru z hlediska pohonu navrhl Hindersin a kol. (2013). Tento fotobioreaktor je zmíněný v kapitole 2.2.2. Pohon náklonu je realizován pomocí elektrického aktuátoru a rotace je zajištěna šnekovou převodovkou. Pokud by naše zařízení realizovalo pohyb podobným způsobem jako Hindersin a kol. (2013), tak by se musela výrazně upravit konstrukci celého deskového fotobioreaktoru. Bylo by také nutné navrhnout stabilní řešení upevnění konstrukce.

6.1 Polohování sklonu komory

Pro náklon kultivační komory není zařízení uzpůsobeno a k jeho realizaci by se muselo zasáhnout do konstrukce rámu i kultivační nádoby. Jedním z návrhů byla naklápěcí plošina, jejíž natáčení by bylo realizováno ozubením a hřídelí. Systém naklápění by byl nainstalován na rotační plošině. Další návrh uvažoval pohon v podobě systému hydraulických pístů a ramen, které by se nacházely na svislé hřídeli. Podobné systémy jsou hojně využity v moderních fotovoltaických

panelech, které sledují Slunce. Tyto technologie se označují pod termínem sledovač Slunce. Existuje několik variant sledovačů Slunce s písty či lineárními aktuátory, nebo s natáčením pomocí hřídele určené pro provoz fotovoltaických panelů. Na trhu zatím není žádná technologie určená přímo pro optimalizaci využití světla pro provoz fotobioreaktoru. Charakteristika provozu fotovoltaiky spočívá ve využití maximální solární energie díky natočení panelu do pozice s nejvyšší možnou světelnou intenzitou, ale pro kultivaci řas může být dlouhodobé setrvání v takové oblasti nežádoucí a může dojít ke zpomalení růstu řas, či až k fotoinhibici, která je způsobena poškozením řas vysokou teplotou, nebo příliš vysokou intenzitou záření [17].

Od možnosti vertikálního pohybu jsme odstoupili z několika důvodů. Hlavním důvodem je fakt, že by se musel do značné míry upravit rám i kultivační nádoba, což by mělo výrazný vliv na cenu této technologie. Jedním z požadavků zadavatele byla rozložitelná konstrukce, vhodné rozměry a nižší váha zařízení, protože zařízení se bude přepravovat z České republiky na Svalbard, kde bude zařízení usazeno na střechu lodního kontejneru. Při zanedbání vertikálního pohybu lze předpokládat snížení účinnosti využití světelného záření. S ohledem na horizontální pohyb slunce nad obzorem (maximální úhel slunce nad horizontem je 35°) lze předpokládat, že vertikální pohyb desky nebude mít výrazný vliv na světelnou účinnost. Možnost natočení ve vertikálním směru má význam především v oblastech a obdobích, kdy sluneční paprsky dopadají pod vysoký úhlem, tedy například během letního období v ČR nebo v rovníkových oblastech.

6.2 Rotační pohyb

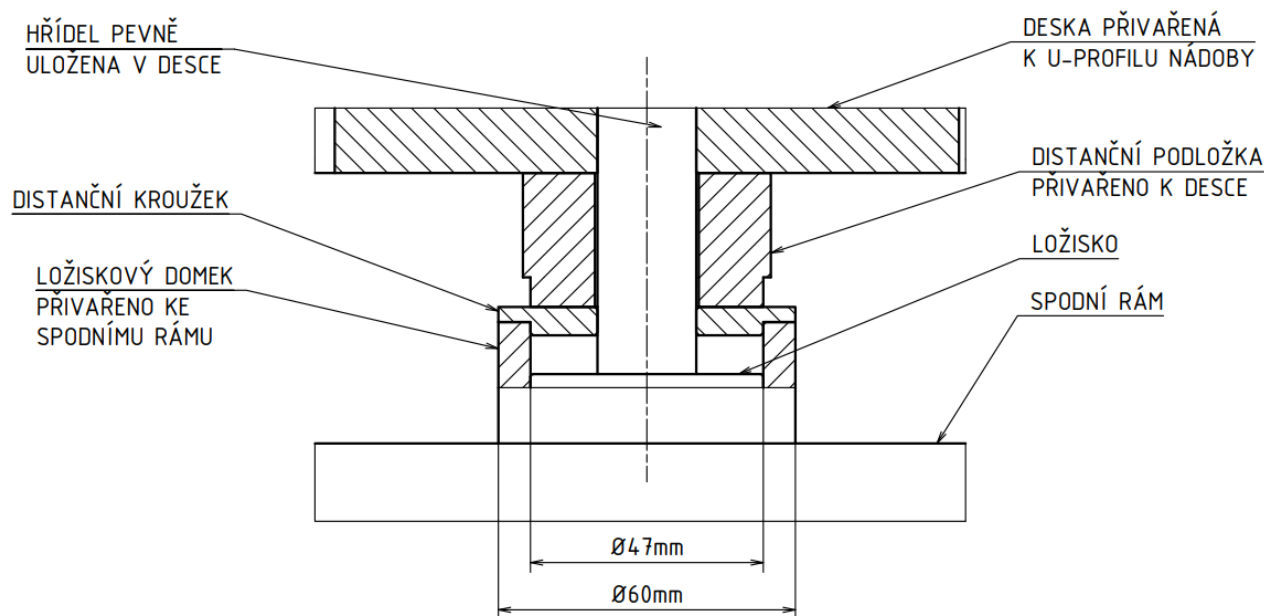
Původní zařízení již bylo z části připraveno pro pohyb v radiálním směru, pomocí hřídele s drážkou, která byla vsazena do ložiskového domku, který je součástí konstrukce. Rotační pohyb zařízení musí kopírovat otáčky Slunce. Jedna otáčka bude rozložena při provozu na Svalbardu do 24 hodin. Vzhledem k původnímu stavu bylo vyhodnoceno několik variant. Klasické průmyslové elektromotory jsou obvykle navrženy na vysoké otáčky a výkony. Rychlost otáček bychom mohli regulovat pomocí kombinace frekvenčního měniče a převodovky, pak už by ale nešlo přesně řídit v jaké poloze se motor nachází. Proto byly zvoleny jako vhodné krokové a servové elektromotory. Závěr při dalším rozhodování byl, že nejlepší volba jsou krokové motory, protože se lépe kontroluje jejich poloha. Aby servomotor mohl pracovat, musí být jeho součástí servoměnič, který je připojen k enkodéru na hřídeli. Enkodér snímá polohu hřídele motoru, čímž slouží jako zpětná vazba. Servoměnič ovládá otáčky serva, funguje tedy obdobně jako frekvenční měnič klasických elektromotorů. U krokového motoru je poloha řízena podle počtu pulzů, které jsou vysílány z generátoru pulzů. V našem případě bude generátor pulzů driver.

6.2.1 Požadavky na horizontální pohonný mechanismus

Ve všech variantách bylo vhodné použití krokového elektromotoru, zejména kvůli jeho rozsáhlé a snadné programovatelnosti a relativně vysokému výkonu vzhledem k velikosti. Výhoda je i bezpečnost, která je dána malou velikostí proudu a napětí při nízkých otáčkách. Při volbě krokového motoru je možné vybírat ze široké škály variant, které se od sebe liší výkonem, úrovní krytí, provozním prostředím a možnostmi osazení. Pro naše použití bylo nejdůležitější, aby motor mohl být v provozu v prašném a vlhkém prostředí. Motor bude vybaven převodovkou s pomalým převodem, aby měl vyšší než potřebný výkon. Také bylo nutné, aby motor fungoval jako brzda bránící v samovolném natáčení nádoby fotobioreaktoru.

6.2.2 Výpočet minimálního kroutícího momentu

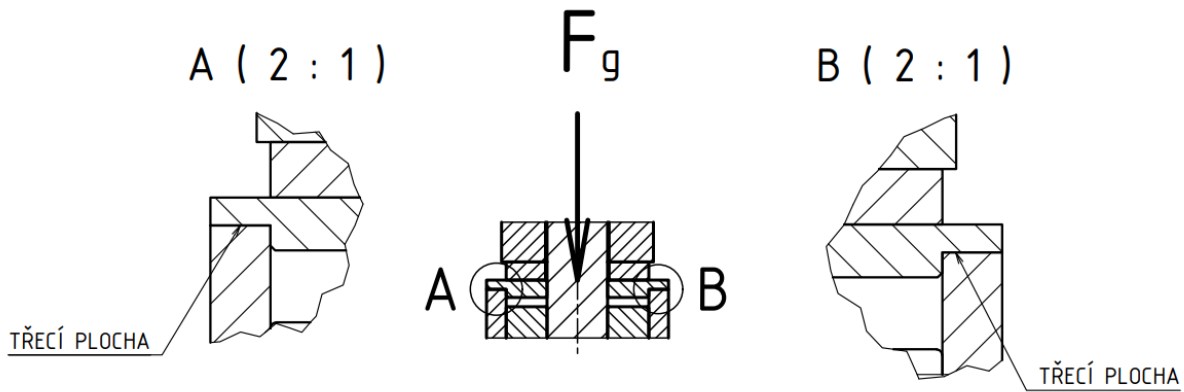
Odpor při otáčení nádoby je způsoben převážně třením mezi kruhovou plochou ložiskového domku a distančním kroužkem. Distanční kroužek je k domku tlačěn deskou, která spojuje rám nádoby a hřídel. Schéma uložení se nachází v obrázku 22. Přítlačná síla je rovna gravitační síle, kterou získáme vynásobením hmotnosti nádoby naplněné kultivačním médiem gravitačním zrychlením. Váha prázdné nádoby se pohybuje kolem 20 kilogramů a plánované množství kultivačního média je 20 litrů. Hustota kultivačního média je přibližně stejná jako hustota čisté vody tedy přibližně 1000 kg m^{-3} .



Obrázek 22 Schéma uložení

Pracovní váha nádoby byla stanovena vzhledem k bezpečnosti na $m = 50$ kg. Gravitační zrychlení bylo stanoveno jako $g = 9,81$ m s⁻², gravitační síla F_g [N] (obrázek 23) pak byla vypočtena ze vztahu (1).

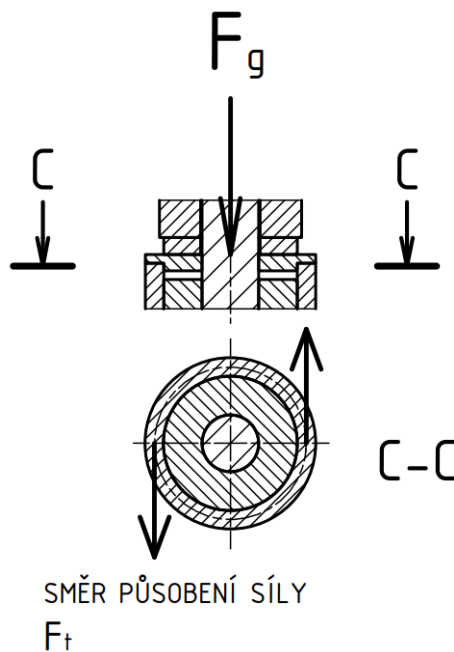
$$F_g = m \cdot g = 50 \cdot 9,81 = 490,5 \text{ N} \quad (1)$$



Obrázek 23 Třecí plochy

Třecí síla F_t [N] (obrázek 24), která působí na těleso a brání v otáčení, se získá ze vztahu (2), jako součin gravitační síly F_g a bezrozměrného součinitele smykového tření. Součinitel smykového tření pro ocel uvažujeme $f = 0,15$.

$$F_t = F_g \cdot f = 490,5 \cdot 0,15 = 73,6 \text{ N} \quad (2)$$



Obrázek 24 Schéma sil

Dále si musíme stanovit kroutící moment M_k [Nm] podle vztahu (4), který by vznikl působením síly F_t ze vztahu (2) po rameni o délce l [m]. Délku ramene je možné určit ze vztahu (3) jako střední délku vnějšího poloměru r_{out} [m] a vnitřního poloměru r_{in} [m] kruhových ploch, které se o sebe třou. Vzdálenost počátku šipky síly F_t a středu součásti v obrázku 24 značí střední délku vnějšího poloměru.

$$l = \frac{(r_{in} + r_{out})}{2} = \frac{0,0300 + 0,0235}{2} = 0,0268 \text{ m} \quad (3)$$

$$M_k = l \cdot F_t = 0,0268 \cdot 73,6 = 1,97 \text{ Nm} \quad (4)$$

Z výpočtu vyplývá, že teoreticky budeme potřebovat krokový motor, jehož kroutící moment bude vyšší než 2 Nm. Potřebný kroutící moment by se mohl snížit, kdyby se snížil součinitel tření, to se docílí tím, že plochy ve styku se namažou vhodným mazivem, nebo se do konstrukce přidá axiální ložisko. V této situaci to není nutné, protože malý kroutící moment je schopna pokrýt většina dostupných krokových elektromotorů s převodovým systémem.

6.2.3 Výpočet s mazivem

Pokud bychom potřebovali zjistit, jak se změní kroutící moment M_{kmaz} [Nm] potřebný k uvedení hřídele do rotace, tak budeme postupovat dle vztahu (9). Pro výpočet je však nutné si vyjádřit dynamickou viskozitu μ [Pa s], kterou je možné určit ze vztahu (5) součinem kinematische viskozity ν [m² s⁻¹] a hustoty ρ [kg m⁻³]. Jako mazivo jsme se rozhodli použít vazelínu na bázi lithiového komplexu Deltaplex 2EP Grease, jejíž kinematische viskozita dosahuje hodnoty $\mu_{40^\circ\text{C}} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ při 40°C. Hustotu maziva výrobce neudává. Pro výpočet je tedy možné využít hustotu podobných běžně dostupných maziv, která dosahuje hodnoty $\rho_{40^\circ\text{C}} = 900 \text{ kg m}^{-3}$ při teplotě 40°C.

$$\begin{aligned} \mu_{40^\circ\text{C}} &= \nu_{40^\circ\text{C}} \cdot \rho_{40^\circ\text{C}} = 200 \cdot 10^{-6} \cdot 900 = \\ &= 0,18 \text{ Pa s} \end{aligned} \quad (5)$$

Určení maximální rychlosti otáčení je možné získat ze vztahu (6).

$$u_{max} = \frac{O}{T_{ot}} = \frac{(2\pi \cdot l)}{T_{ot}} = \frac{2\pi \left(\frac{r_{in} + r_{out}}{2}\right)}{1200} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \quad (6)$$

Kde O [m] je obvod kruhu daný středním průměrem mezikruží a T_{ot} [s] je doba jednoho otočení při maximální rychlosti (jedna otáčka za 20 minut).

Napětí τ_{xy} [Pa] získáme ze vztahu (7) jako součin dynamické viskozity $\mu_{40^\circ C}$ [Pa s] a maximální rychlosti u_{max} [$m s^{-1}$] dělené tloušťkou vrstvy mazadla $H = 0,001$ m.

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \mu_{40^\circ C} \cdot \frac{u_{max}}{H} = \frac{1,14 \cdot 10^{-4}}{0,001} \cdot 0,18 = \\ &= 0,025 \text{ Pa}\end{aligned}\tag{7}$$

Nyní zbývá dosadit hodnoty ze vztahu (5), (6), (7) do vztahu (9) a dopočítat kroutící moment M_{kmaz} přičemž sílu F_{tmaz} [N] můžeme vyjádřit ze vztahu (8).

$$\begin{aligned}F_{tmaz} &= \tau_{xy} \cdot S_{mezikruh} = \tau_{xy} \cdot \pi(r_{out} - r_{in})^2 = \\ &= 0,025 \cdot \pi \cdot (0,03 - 0,0235)^2 = 3,32 \cdot 10^{-6} \text{ N}\end{aligned}\tag{8}$$

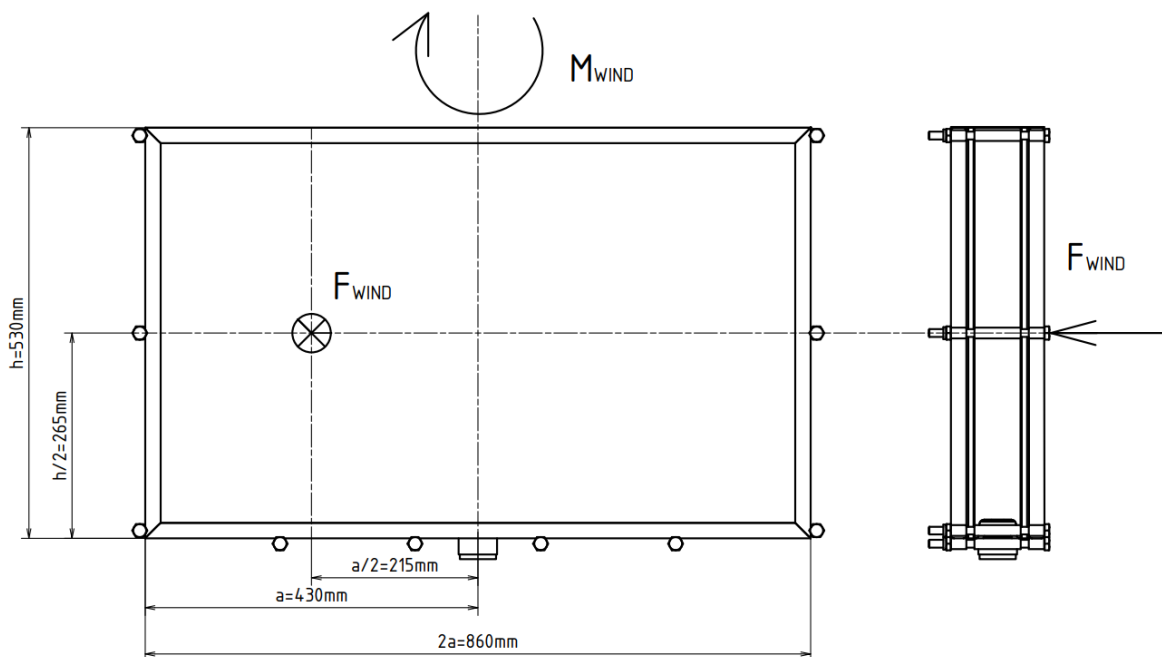
$$\begin{aligned}M_{kmaz} &= F_{tmaz} \cdot l = \tau_{xy} \cdot S_{mezikruh} \cdot l = \\ &= \mu_{40^\circ C} \cdot \frac{u_{max}}{H} \cdot \pi(r_{out} - r_{in})^2 \cdot \frac{(r_{in} + r_{out})}{2} = \\ &= 0,025 \cdot \pi \cdot (0,03 - 0,0235)^2 \cdot \left(\frac{0,0300 + 0,0235}{2}\right) = 8,95 \cdot 10^{-8} \text{ Nm}\end{aligned}\tag{9}$$

Z výpočtu (9) a (8) vyplývá, že pro uvedení hřídele nádoby do otáčivého pohybu stačí velmi malá síla a velmi nízký kroutící moment. Pro zkušební provoz se předpokládá provoz bez maziva. Pokud provoz zařízení v tomto stavu nebude optimální, tak může být použito mazivo ke snížení tření mezi plochami.

6.2.4 Výpočet kroutícího momentu dle povětrnostních podmínek

Fotobioreaktor bude umístěn na střeše lodního kontejneru na ostrově Svalbard, kde panuje větrné počasí. Měli bychom zhodnotit i vliv větru, který by mohl ovlivnit natočení kultivační komory. Výpočtem pomocí vztahu (10) je možné stanovit odporovou sílu F_{wind} [N] vyvolanou větrem působícím na polovinu plochy jedné stěny kultivační nádoby při rychlosti proudění vzduchu $u = 100 \text{ km h}^{-1}$ ($27,7 \text{ m s}^{-1}$), která je ekvivalentem rychlosti větru při bouři. Schéma výpočtu kroutícího momentu je zobrazeno na obrázku 25. Hustotu obtékané tekutiny volíme jako hustotu

vzduchu při 10°C $\rho_{10^\circ\text{C}} = 1,247 \text{ kg m}^{-3}$. Plocha kultivační nádoby, na kterou vítr působí je $S_{\frac{1}{2}} = a \cdot h$ [m²], kde $a = 0,43 \text{ m}$ je polovina délky stěny nádoby a $h = 0,53 \text{ m}$ je výška nádoby.



Obrázek 25 Působení sil a momentů vyvolaných větrem

Součinitel odporu jsme zvolili $C = 1,2$. $C = 1,2$ je typická hodnota pro tenkou desku, která je obtékána proudem tekutiny kolmo působícím na její rovinu. Pokud bychom chtěli součinitel odporu upřesnit, tak je možné využít závislost $C = f(Re)$, kde Reynoldsovo číslo vyjádříme jako $Re = \frac{\bar{u} d_{char}}{\nu}$, přičemž \bar{u} [m s⁻¹] je střední rychlost proudění tekutiny obtékající těleso, d_{char} [m] je charakteristický rozměr obtékaného tělesa, jenž určíme z literatury a ν [m² s⁻¹] je kinematičká viskozita tekutiny [27].

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_{10^\circ\text{C}} S_{\frac{1}{2}} \cdot u^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,247 \cdot (0,43 \cdot 0,53) \cdot 27,7^2 = \quad (10)$$

$$= 130,8 \text{ N}$$

Sílu vyvolanou odporem prostředí působící na polovinu stěnu nádoby jsme stanovili jako $F_{wind} = 130,8 \text{ N}$.

Výsledný kroutící moment M_{wind} [Nm] který by vznikl působením větru dle vztahu (12), je možné vypočítat ze vztahu (11), který udává délku ramene síly větru.

$$l_{wind} = \frac{a}{2} = \frac{0,43}{2} = 0,215 \quad (11)$$

$$M_{wind} = F_{wind} \cdot l_{wind} = 130,8 \cdot 0,215 = \quad (12) \\ = 28,1 \text{ Nm}$$

Výpočet ze vztahu (12) udal orientační kroutící moment, který by mohl na nádobu působit při ideálních podmínkách. Předpokladem je, že vítr bude působit na celou plochu komory téměř rovnoměrně a nebude docházet ke vzniku nežádoucího kroutícího momentu od větru, protože se oba momenty vzniklé působením větru na levou i pravou polovinu nádoby navzájem vyruší. Pro případ extrémních povětrnostních podmínek by bylo vhodné manuálně odstavit provoz fotobioreaktoru a otočnou komoru mechanicky aretovat, aby nedošlo k poškození pohonného mechanismu či samotné konstrukce fotobioreaktoru.

6.3 Volba krokového elektromotoru

Elektromotor bude provozován v náročných podmínkách, proto je nutné, aby byl dostatečně odolný vůči vlhkosti a prachu. Motor bude osazen převodovkou připojenou jako jeden kus k motoru. Velikost elektromotoru a osazení výstupní hřídele, by měla umožňovat jednoduché spojení s hřídelí nádoby a pohonného mechanismu, který by měl ideálně dosahovat kroutícího momentu mezi 20 - 30 Nm. Kroutící moment vyšší než 20 Nm, by pro provoz zařízení znamenal lehké předimenzování ale zároveň i plynulejší chod. Přesnější ověření stanovení momentu je nutné ověřit praktickou zkouškou během provozu, ovšem minimální potřebný moment je jasně daný ze vztahu (4) jako 2 Nm. Na základě těchto požadavků byl proveden průzkum trhu a na základě kterého bylo vybráno několik variant elektromotorů k dalšímu posouzení, Konkrétně byly vybrány dvě varianty elektromotoru od německé firmy Phytron a jednu variantu od čínské firmy LTO MOTORS.

Elektromotory Phytron

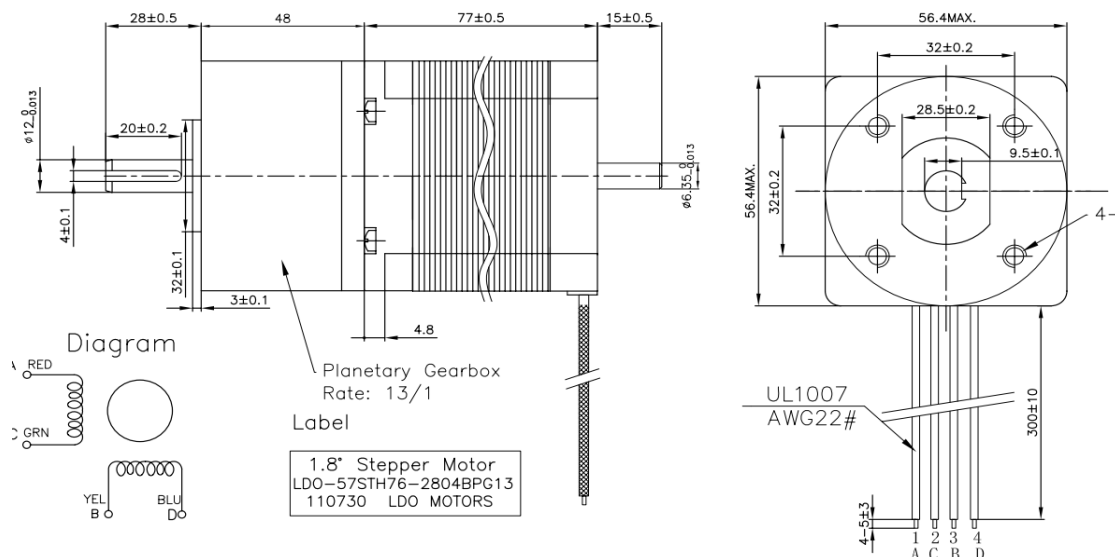
První varianta je hybridní krokový elektromotor třídy ESS určený do náročných podmínek, jako je chemický, lodní, nebo potravinářský průmysl. Tato řada se vyznačuje zejména použitím nerezové oceli, rozsahem pracovních teplot od -40°C do 150°C , kroutícím momentem od 0,15 Nm do 5,5 Nm v závislosti na velikosti elektromotoru. Velikost elektromotoru se pohybuje v rozsahu

od 45 mm do 100 mm. Standardní velikostí kroku je $1,8^\circ$ s přesností $\pm 3\%$ a stupněm krytím motoru je IP 67. Tato varianta motoru může být dovybavena integrovanou převodovkou přímo připojenou na motor a výrobce nabízí i možnost úpravy výstupní hřídele dle přání zákazníka [28].

Druhá varianta je hybridní krokový motor třídy ZSH určené také pro náročné podmínky. Třída ZSH nabízí vyšší kroutící momenty oproti variantě ESS v rozsahu od 0,45 Nm až do 17 Nm, rozsah pracovních teplot se pohybuje od -30°C do 50°C . Velikosti elektromotorů spadající pod tuto třídu se pohybují od 57 mm do 107 mm. Stupeň krytí je ve variantách IP 54 a IP 68. Standardní velikost kroku udává výrobce na $1,8^\circ$ s přesností $\pm 3\%$. Tato řada motorů může být dovybavena integrovanou planetovou vícestupňovou převodovkou do pomalého převodu, který může být až 512:1. K dispozici je i volitelné příslušenství v podobě magnetické brzdy, nebo encodéru snímajícího rotaci hřídele, díky kterému můžeme kontrolovat přesnou polohu krokového elektromotoru [29].

Elektromotor LDO-57STH76-2804BPG13 NEMA23

Další alternativa, která byla vybrána na základě průzkumu trhu, je krokový elektromotor od čínské firmy LDO MOTORS s přírubou NEMA 23 (obrázek 26). Tento motor je vybavený integrovanou planetovou převodovkou s převodem 13:1, díky které pohon dosahuje kroutícího momentu až 23,5 Nm. Velikost kroku výrobce udává $1,8^\circ$ s přesností $\pm 5\%$. Rozsah provozních teplot výrobce přímo neuvádí. Výrobce uvádí pouze třídu izolace elektromotoru B, což dle normy NEMA znamená, že by maximální teplota elektromotoru neměla přesáhnout 130°C . Stupeň krytí IP výrobce neudává, je však možné dokoupit kryt zadní strany motoru zaručující ochranu IP 40, kdy první číslice 4 udává, že motor je dle normy ČSN EN 60 529 chráněn před vniknutím pevných cizích těles do průměru 1 mm a před dotykem drátu. Druhá číslice 0 říká, že zařízení není chráněné před vodou [30]. Ochrana před vlhkostí by se v případě použití tohoto motoru musela řešit individuálně. Výstupní hřídel z převodovky elektromotoru je osazena drážkou s perem [31].



Obrázek 26 Výkres elektromotoru LDO [31]

6.3.1 Poptávka elektromotoru

Na základě průzkumu trhu byla vytvořena poptávka pro firmu RAVEO, která distribuuje motory Phytron pro Českou republiku. V poptávce bylo uvedeno, za jakých předpokladů bude probíhat provoz elektromotoru. Za podmínky provozu byly zvolené vysoká vlhkost, prašnost, slanost prostředí, a aby elektromotor pracoval do teplot až -15°C . Též bylo uvedeno, že motor bude pracovat při velmi nízkých pracovních otáčkách a nominální kroutící moment by měl být mezi 20 - 30 Nm s ohledem na bezpečnost a stabilitu provozu.

Firma RAVEO doporučila krokový elektromotor ESS 59-3.200.2,5-GPL-KLIMA s planetovou převodovkou GPL 5223/100-S-KLIMA. Základní parametry motoru i převodovky jsou uvedeny v tabulce 5 a 6. Cena řešení je 4 087 € bez DPH za motor i převodovku a jako standardní dobu dodání uvádí firma RAVEO 11 týdnů. Motor i převodovka je pro naše použití ideální z hlediska provozních podmínek, ale problémem je vysoký kroutící moment převodovky s motorem, který je $M_{ESS} = 70 \text{ Nm}$.

Tabulka 5 Parametry elektromotoru ESS 59-3

Motor	ESS 59-3.200.2,5-GPL-Klima
Velikost čtvercové příruby	59 mm
Počet kroků na otáčku	200 -
Počet fází	2 -
Proud na jednu fázi	2,5 A
Teplota prostředí	-40 až 150 °C
Maximální vlhkost	95 %
Stupeň krytí	IP 67 -
Kroutící moment	0,7 Nm
Cena bez DPH	1 848 €

Tabulka 6 Parametry převodovky GPL 52.3

Převodovka	GPL 52.3/100-S-Klima
Typ převodovky	planetová
Průměr kruhové příruby	52 mm
Počet stupňů	3
převodový poměr	100
Teplota prostředí	-40 až 150 °C
Cena bez DPH	2 239 €

Kroutící moment elektromotoru je podstatně vyšší než kroutící moment mezi 20 - 30 Nm, který uvažujeme pro pohon zařízení. Podmínka nominálního kroutícího momentu je však splněna, zároveň i podmínky týkající se pracovního prostředí jsou splněny vysokým rozsahem pracovních teplot a stupněm krytí IP 67. Vynikající vlastnosti a odolnost elektromotoru ESS jsou však vykoupeny velmi vysokou cenou a dlouhou dobou dodání.

Poptávka po elektromotoru s přírubou NEMA 23 nemusela být řešena, protože na českém trhu je mnoho distributorů těchto elektromotorů a jsou běžně k dostání v e-shopech v různém provedení za velmi příznivé ceny v řádech tisíců korun. V našem případě byl vybrán krokový elektromotor s převodovkou LDO-57STH76-2804BPG13, který na svém e-shopu distribuuje firma FIT Eurazio za cenu 3 290 Kč bez DPH [31].

Krokový elektromotor LDO-57STH76-2804 s převodovkou BPG13 nespĺňuje některé naše požadavky, zejména odolnost vůči vodě a vniku cizích částic je nedostatečná. Mohli bychom však elektromotor dovybavit krytem zadní průchozí strany, který vyřeší problém vniku cizích částic

(prachu). Maximální kroutící moment je 23,5 Nm. Tento kroutící moment je dostačující pro pohon našeho zařízení.

6.4 Výsledná volba elektromotoru

Pro testovací provoz v méně náročných podmínkách v ČR byl objednáán elektromotor LDO-57STH76-2804BPG13. Hlavním faktorem, podle kterého bylo rozhodnuto, je cena elektromotoru a dostupnost. Zmíněný elektromotor LDO je k dostání za cenu 3 290 Kč a doba doručení se pohybuje v řádu několika dní. Cílem testovacího provozu je, že pro provoz motoru bude vytvořen program, který bude řídit natáčení nádoby. Programem také ověří, jaké kroutící momenty motoru budou vhodné pro provoz zařízení. Elektromotor ESS bude volen pro bezpečný provoz na Svalbardu. Výhodou je jeho výborný stupeň krytí, který zaručuje ochranu před prachem a vodou i jeho spolehlivost spojená se jménem výrobce Phytron. Nákup tohoto motoru bude záležet na finanční situaci zadavatele, protože cena elektromotoru je vysoká a dostupnost je v řádu několika měsíců. Pokud by finanční situace nedovolila nákup motoru ESS, tak bude nutné vybrat jiný.

7 Míchání a vzduchování kultivačního média

Pro míchání kultivačního média v deskovém fotobioreaktoru o objemu 20 litrů je vhodné míchat hydraulicky pomocí čerpadla, nebo aerací. Zvolilo se míchání aerací, protože je tento typ míchání vhodný i pro pěstování náchylných řas, které mohou být stresovány nešetrným mícháním čerpadly. Dalším důvodem, pro volbu této technologie je potřeba zásobení řas oxidem uhličitým, který se může dávkovat společně se vzduchem. Systém distribuce CO₂ a systém míchání kultivačního média pomocí směsi vzduchu a CO₂ se nazývá vzduchování (aerace).

7.1 Výběr komponent pro vzduchování

Použité komponenty by měli mít následující vlastnosti.

- Variabilní výkon v řádu stovek litrů směsi vzduchu a CO₂ za hodinu, při kterém nebude docházet k usazování řas na dně nádoby
- Odolnost vůči vlivu okolí (sluneční záření, vlhkost, prach)
- Odolnost proti vzniku koroze
- Vzduchovací směs tvořena CO₂ a vzduchem
- Minimální riziko kontaminace zvenčí
- Snadná čistitelnost a sterilizace
- Jednoduchá instalace, údržba, manipulace

- Snadná rozebíratelnost

Pro proudění směsi vzduchu a CO₂ bude použit kompresor, na který bude napojena soustava vzduchovacích hadiček. Hadičky budou ústít skrz víko do nádoby. Zde se směs plynů bude uvolňovat do kultivační suspenze pomocí perforované hadičky, která se bude nacházet na dně nádoby. Aby plyn proudil do nádoby s kultivačním médiem, musíme stlačit plyn na tlak, který bude muset být vyšší než hydrostatický tlak na dně nádoby. Hydrostatický tlak je určen jako součin maximální výšky hladiny $h_{max} = 0,5$ m, gravitačního zrychlení $g = 9,81$ m s⁻² a hustoty roztoku ρ [kg m⁻³]. Hustota roztoku je přibližně stejná jako hustota čisté vody $\rho = 1\,000$ kg m⁻³ tento předpoklad byl uveden v kapitole 6.2.2. Výsledný hydrostatický tlak získaný ze vztahu (13) se rovná $P_h = 4\,905$ Pa.

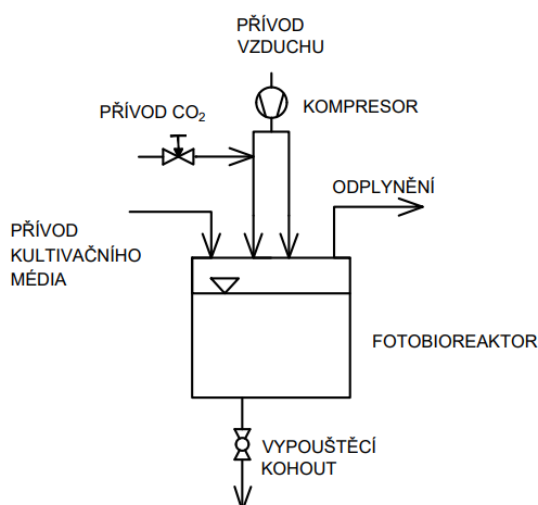
$$P_h = h_{max} \cdot g \cdot \rho = 0,5 \cdot 9,81 \cdot 1\,000 = 4\,905 \text{ Pa} \quad (13)$$

Tlak P_h je volený jako minimální tlak, který bychom požadovali po kompresoru. Je však patrné, že tento minimální tlak je velmi nízký a většina vzduchovacích kompresorů tento tlak snadno vyvine. Pro fotobioreaktor byl zvolen vzduchovací motůrek EHEIM air pump 400, který je vybaven regulací výkonu. Výkon dosahuje hodnoty až 400 litrů vzduchu za hodinu. Prodejce také udává, že výtlač motůrku jsou 2 metry a příkon 5 W [32]. Předpokládáme, že kompresor budeme provozovat v suchém prostředí, jelikož jeho odolnost vůči vodě není dostačující a hrozí vysoké riziko poruchy kompresoru. Ochranu kompresoru proti prachu zajišťuje filtr, který se nachází na zadní straně. Vzduchovací kompresor EHAIM bude určen jen pro testovací provoz, který ověří funkčnost aerace. Pro plný provoz na Svalbardu pak bude určen odolnější kompresor. Jako rozvod plynu budou sloužit hadičky z elastollanu C-98 o rozměrech 8/6 mm a 6/4 mm. Materiál hadiček je flexibilní, odolný vůči otěru, rozsah pracovních teplot je od -40°C do 60°C a pracovní tlak je až 10 bar (1 000 000 Pa). Hadičky jsou určeny zejména pro stlačený vzduch a je tedy nutné vyzkoušet vliv směsi vzduchu a CO₂ na jejich integritu. Spojení hadic bude řešeno pomocí plastových nástrčných spojek, které se běžně používají v odvětví vzduchotechniky. Vzduchovací systém bude snadno rozebíratelný a jeho úprava bude nenáročná. Z hlediska instalace se jako velmi vhodné jeví přepážkové nástrčné spojky v plastovo-mosazném provedení, které budou tvořit přepážku mezi vnitřním prostorem nádoby a okolím.

Provizorním zdrojem CO₂ bude malý akvariijní CO₂ set vybavený počítadlem bublin, uzavíracím elektromagnetem, redukčním ventilem a jehlovým ventilem pro přesnou regulaci

průtoku a tlaku CO₂ na výstupu ze setu. Při plném provozu bude zdrojem CO₂ vysokotlaká lahev s redukčním ventilem a průtokoměrem, a vzduch bude poháněn kompresorem.

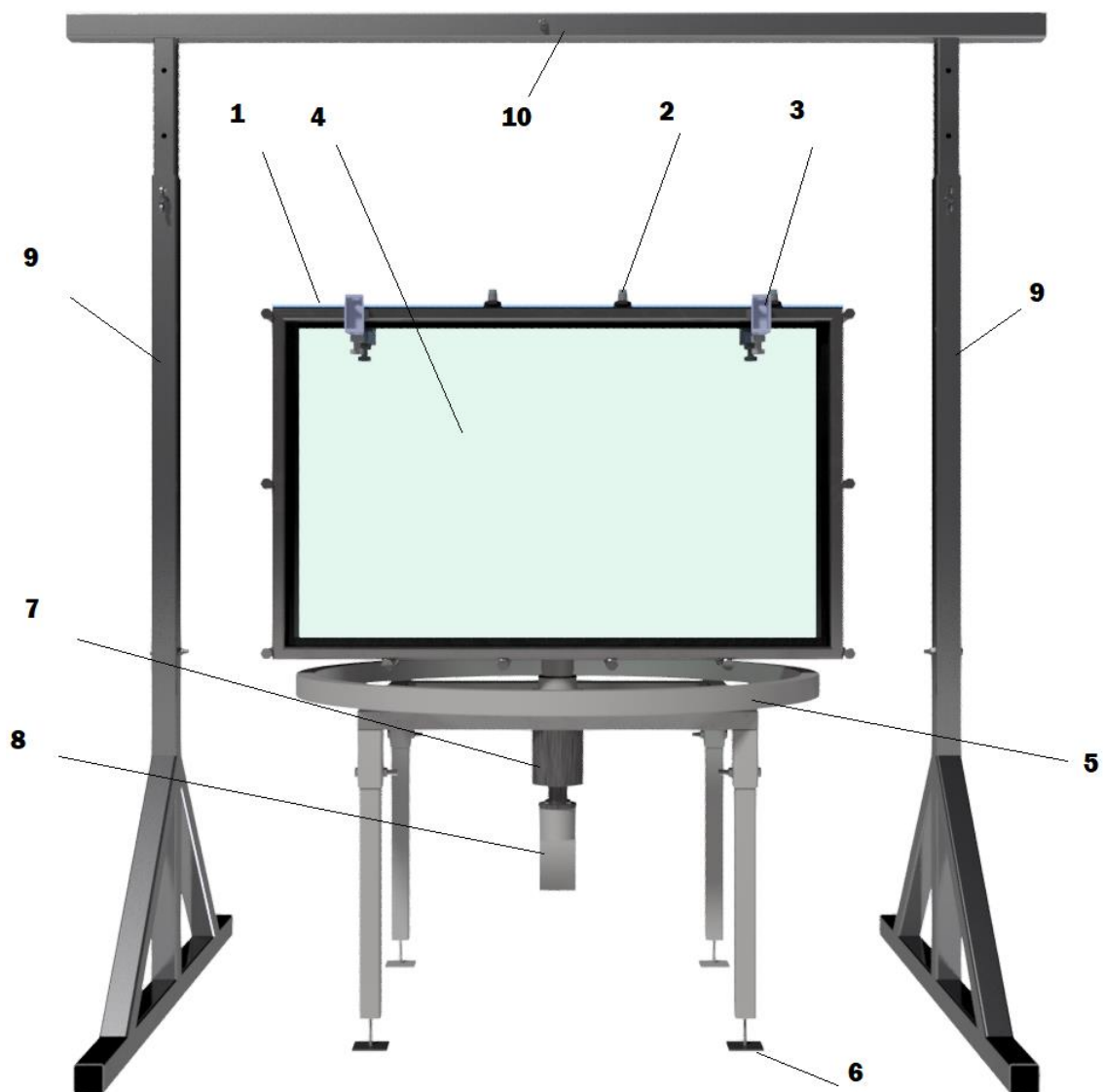
Na obrázku 27 je zobrazeno jednoduché schéma fotobioreaktoru, se vzduchovacím systémem. Do přívodu vzduchu je napojen přívod CO₂. Odplyňovací trasa je realizována jednoduše skrz víko. Víko může být z části neuzavřená v případě, že nehrozí kontaminace kultivačního média. Přívod kultivačního média může probíhat po otevření víka povolením nosíkových svorek, nebo skrz víko pomocí přepážkových spojek. Zařízení je vybaveno kohoutem pro vypuštění kultivačního média, který je instalován v dolní části komory fotobioreaktoru.



Obrázek 27 Schéma fotobioreaktoru

8 Úprava zařízení

Vytvořená konstrukce se skládá ze dvou částí. První část je konstrukce fotobioreaktoru, jehož výkres sestavy 001-001-S s kusovníkem 001-001-K se nachází v příloze práce a druhá část je výsuvný rám. Výsuvný rám byl zkonstruován za účelem vytvoření prostoru pro upevnění kabelového žlabu. Kabelovým žlabem povedou kabely výstupů sond a trasy vzduchování, které by jinak bránily v rotačním pohybu kultivační nádoby. Na rám mohou být také instalovány elektrotechnické prvky, vyžadující instalaci v elektroinstalační krabici. Obě části konstrukce jsou na obrázku 28 a očíslované pozice zobrazují komponenty. Součástí první fotobioreaktorové části je víko (pozice 1) s fittingem (pozice 2) a nosíkovými svorkami (pozice 3), celek komory fotobioreaktoru (pozice 4) s hřídelí, spodní rám (pozice 5) na stojnách se závitovou tyčí (pozice 6), spojková skříň (pozice 7), spojka (krytá spojkovou skříňí), a elektromotor LDO-57STH76-2804BPG (pozice 8). Součástí výsuvného rámu jsou dvě stojny (pozice 9) a nosník (pozice 10).

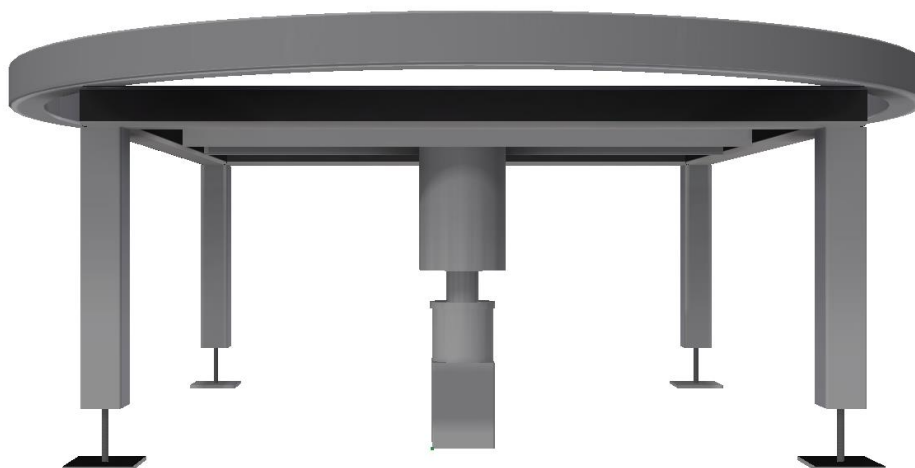


Obrázek 28 3D model fotobioreaktoru s popisem

8.1 Přizvednutí spodního rámu konstrukce

Jedním z hlavních problémů konstrukce byl malý manipulační prostor ve vertikálním směru pod spodním rámem (obrázek 29). Bylo nutné vymyslet řešení, které by zvýšilo prostor pod fotobioreaktorem a zároveň by bylo rozebíratelné. Jako nejideálnější řešení sejevilo prodloužení výšky podstavy z původních 200 mm na 400 mm (obrázek 30). Původní nohy byly uříznuty ve svarovém spoji s konstrukcí a nahrazeny kratším dutým profilem TR 4HR 35 x 2 - 80 DIN 2395 z nerezové oceli 1.4571(ČSN 17348, AISI 316Ti), do kterého byl zasunut profil TR 4HR 30 x 2 - 400 DIN 2395 z nerezové oceli 1.4571, který je zespoda zavařený čtvercovým plechem P3 30 x 30 EN 10028-7 z ploché stříhané nerezové oceli 1.4571. Plech má ve svém středu díru se závitem M5, kterým prochází závitová tyč M5 x 80 DIN 975 A-2. Závitová tyč je součástí stojny. Ke konci závitové tyče je přivařena nerezová destička sloužící jako dosedová plocha. Výška zasunutí stojny se

závitovou tyčí se může nastavit do optimální polohy dle potřeby. Výrobní výkres stojny se závitovou tyčí se nachází v příloze ve výkresu 001-006. Spojení dutých čtvercových profilů bylo realizováno pomocí čtyř šroubů se šestihrannou hlavou M8 x 55 DIN 933 A4-70 a čtyřmi křídlovými maticemi M8 DIN 315A A2 (obrázek 31). Křídlové matice byly později nahrazeny maticemi M8 DIN 934 A4-80, díky kterým byla konstrukce více stabilní. Výsledná podoba je zobrazena na obrázku 32. Výkresová dokumentace podstavce se nachází v příloze ve výkresu 001-005.



Obrázek 29 Původní spodní rám



Obrázek 30 Nový spodní rám



Obrázek 31 Šroubové spojení nohy podstavy

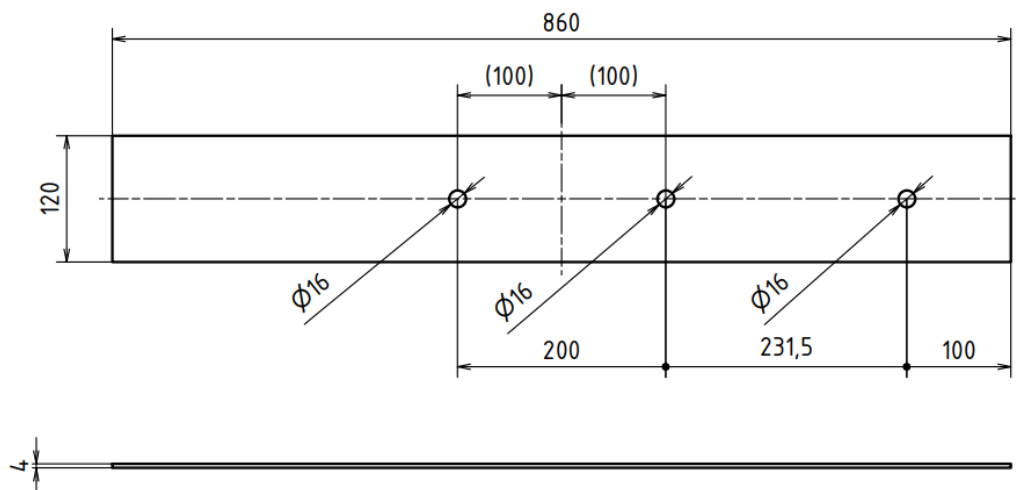


Obrázek 32 Spodní rám po úpravě

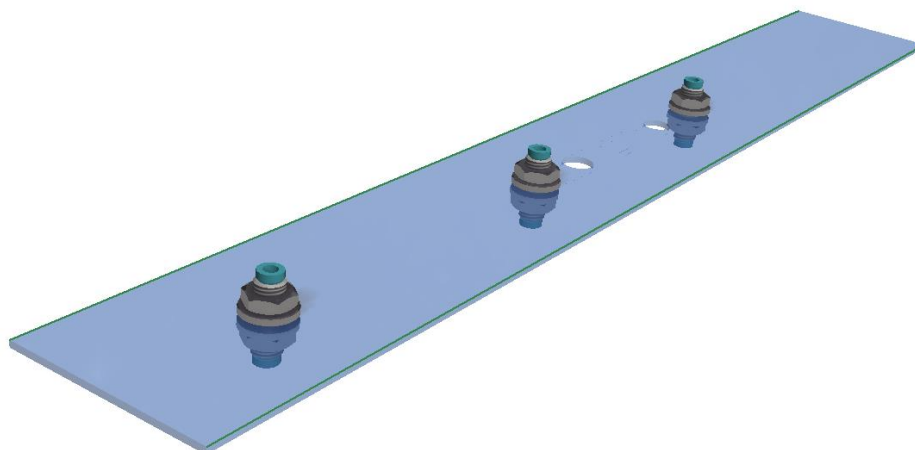
8.2 Výroba víka

Původní konstrukce fotobioreaktoru nebyla vybavena žádným víkem, Z toho důvodu muselo být vytvořeno nové víko s fittingem (obrázek 34). Funkcí víka by mělo být hlavně spolehlivé oddělení kultivačního prostoru od okolí. Ve víku bude vstup pro přívod směsi CO₂ a vzduchu do kultivačního média pomocí nástrčných spojek. Víko je zhotoveno z desky plného polykarbonátu od firmy LAV-polycarbon. Rozměry desky jsou 860 x 120 x 4 mm. Polykarbonát byl zvolen z důvodu jeho velmi dobré obrobiteľnosti, vysoké odolnosti vůči poškození a zejména kvůli vysoké propustnosti světla. Výhodou byla také nízká hmotnost polykarbonátové desky oproti desce z nerezové oceli. Do desky byly vyvrtány pomocí aku-vrtačky se stupňovitým vrtákem 3 díry o průměru 16 mm. Do těchto děr byly vloženy přepážkové nástrčné spojky. Každá spojka byla utažena z obou stran pomocí matek a podložek ke stěně víka. Víko bylo připevněno ke konstrukci použitím pozinkovaných nosíkových svorek typu TKL (obrázek 35) z oceli od firmy Fisher s průměrem šroubu M12. Nosíkové svorky TKL byly relativně mohutné a těžké, proto byly vyrobeny upravené zeštíhlené nosíkové svorky z nerezové oceli (obrázek 36). Použitím těchto zeštíhlených svorek byla zajištěna bezpečnější

instalace z hlediska možnosti poškození skleněné nádoby. Po stažení víka ke konstrukci zajišťují těsnost samolepící obdélníkové profily z pryžového porézního materiálu o šířce 15 mm a tloušťce 3 mm. Tyto pryžové pásy jsou nalepeny mezi víko a vnější rám nádoby. Geometrii víka v milimetrech je zobrazena na obrázku 33. Výkresová dokumentace se nachází v příloze ve výkresu 001-001.



Obrázek 33 Rozměry víka fotobioreaktoru



Obrázek 34 Víko s fittingem



Obrázek 35 Nosíková svorka TKL Fischer

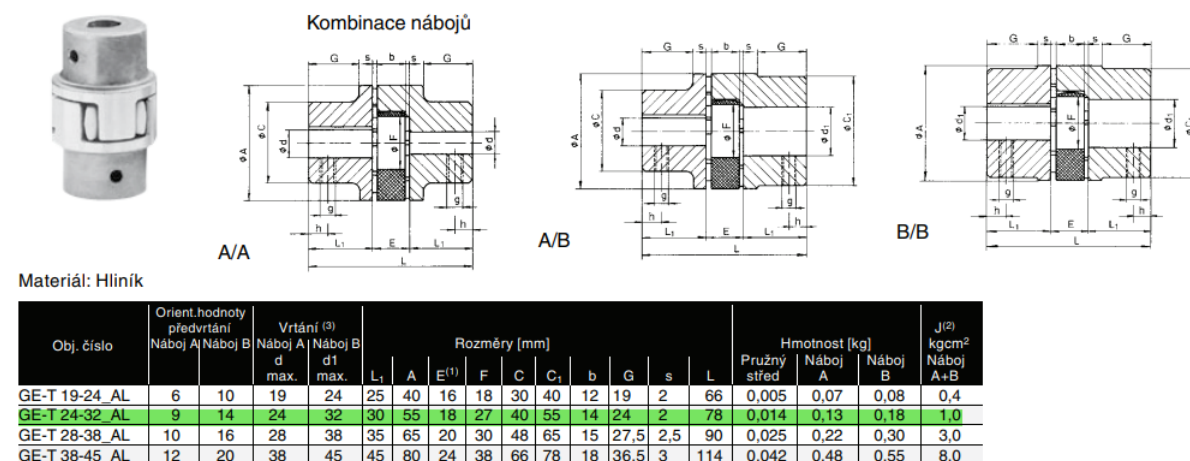


Obrázek 36 Zeštíhlená svorka

8.3 Přenos kroutícího momentu

Kroutící moment pro testovací provoz bude realizován elektromotorem s převodovkou od firmy LDO, který přenesse kroutící moment o velikosti až 23,5 Nm při velmi nízkých otáčkách. Je nutné vhodně upevnit motor k rámu, aby se přenesl kroutící moment na výstupní hřídel a dále spojkou na hřídel nádoby. Pro přenos kroutícího momentu a vyrovnání nesouososti měla být původně použita pružná spojka GE-T velikost 24/32-Al (obrázek 37) od výrobce T.E.A. Nominální přenášený kroutící moment spojky se uvádí 35 Nm (obrázek 38). Problém však nastal v tom, že elektromotor s převodovkou byl vybaven jen velmi krátkou výstupní hřídelí délky 25 mm a průměru 12 mm. Krátká výstupní hřídel ve spojení s malou roztečí uchycovacích děr výstupní strany převodovky měla za následek, že nešlo technicky použít pružnou spojku z důvodu její velikosti. Její vnější průměr činí 55 mm a po spojení výstupní hřídele a hřídele nádoby, by již nebyl dostatečný prostor pro upevnění pohonu ke spojkové skříni, která by byla upevněna k rámu. Tento problém by se mohl eliminovat prodloužením výstupní hřídele.

Zadáním zakázkové výroby byla zhotovena spojka a spojková skříň na míru. Při optimalizaci ceny, bylo stanoveno, že použité polotovary se budou volit dle normy a minimalizace odpadu obráběním. Hřídelová spojka byla vysoustružena z jednoho kusu a spojková skříň s přírubou byly svařovány. Požadavek na materiál byl takový, aby byl dobře svařitelný, obrobitelný, odolný vůči korozi a zároveň byl dost pevný pro přenos kroutícího momentu. Jako nejvhodnější materiál byla zvolena nerezová ocel 1.4571.



Obrázek 37 Katalog pružná spojka GE-T rozměry [33]

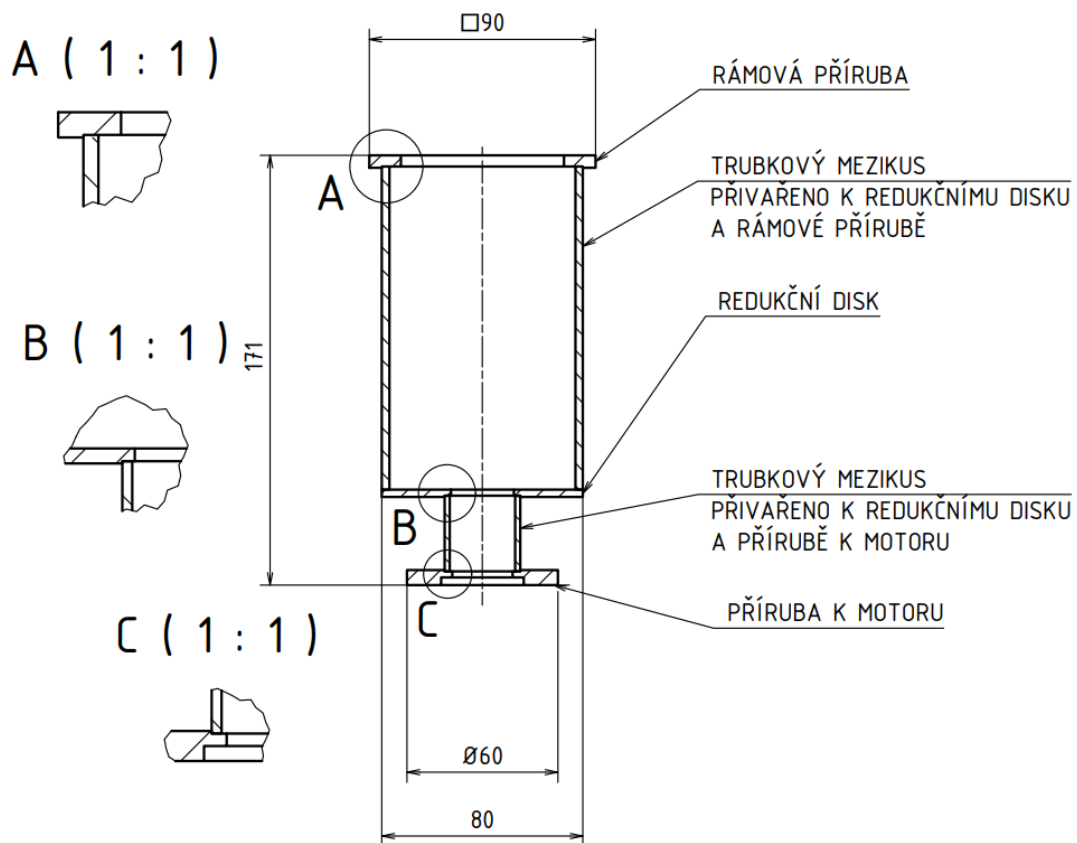
Střed 94° Shore					
Pružný střed	Velikost spojky	Kroutící moment [Nm]			Max. otáčky [min ⁻¹]
		nominální T _{KN}	max. T _{Kmax}	střídavý T _{KW}	
94° Shore barva: černá	19/24	10	20	2,6	14000
	24/32	35	70	9	10600
	28/38	95	190	25	8500
	38/45	190	380	49	7100
	42/55	265	530	69	6000
	48/60	310	620	81	5600
	55/70	410	820	105	4750
	65/75	625	1250	163	4250
	75/90	975	1950	254	3550
	90/100	2400	4800	624	2800

Obrázek 38 Katalog pružná spojka GE-T dynamické poměry [33]

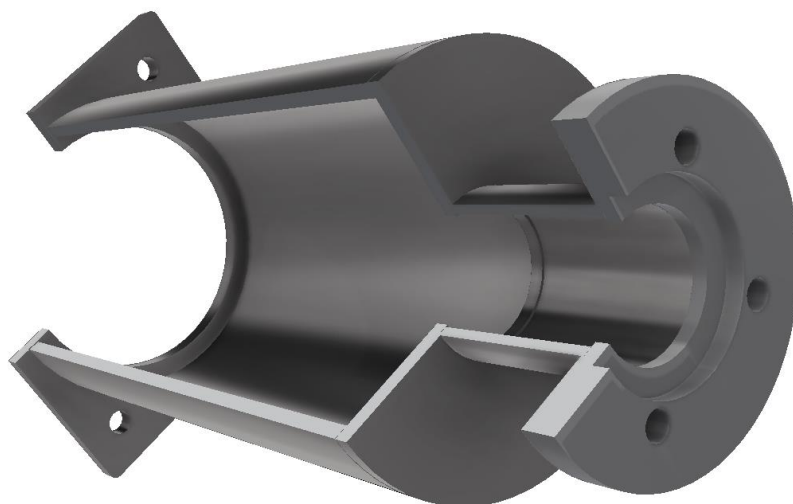
8.4 Spojková skříň

Funkcí spojkové skříňe (obrázek 40) z nerezové oceli 1.4571 je upevnění motoru ke konstrukci (obrázek 42) a tím vytvoření stabilní základny pohonu. Také zamezuje vniku uhelného prachu do prostoru hřídelí, spojky a ložisek, kde by se jinak prach mohl usazovat a postupně by mohlo dojít až k zadření pohonu. Skříň také chrání tyto části před vodou. Spojková skříň se skládá z pěti nerezových částí. Konkrétně se jedná o dvě příruby, dvě trubek

a jeden plech, jenž slouží jako redukce průměru mezi trubkami. První čtvercová příruba upevňuje skříň k rámu pomocí čtyř šroubů se šestihrannou hlavou M6 x 20 DIN 933 A4-70 a čtyř matic M6 DIN 934 A4-80. Druhá kruhová příruba se čtyřmi šrouby se šestihrannou hlavou M5 x 14 DIN 933 A4-70 slouží pro upevnění spojkové skříňe k pohonu. Trubky, které se svařily s plechem, zajišťují spojení přírub. Pro usnadnění svaření metodou TIG (WIG) jsou komponenty skříňe opatřeny mělkým zahloubením, které slouží jako pomůcka pro vystředění sestavy skříňe a tím i zpřesnění procesu svařování. Základní schéma s rozměry sestavy spojkové skříňe je k dispozici na obrázku 39. Výkres sestavy i s kusovníkem se nachází v příloze ve výkresu 002-001-S. Výrobní výkresy komponent sestavy se nachází ve výkresech 002-00X.



Obrázek 39 Spojková skříň



Obrázek 40 Model spojkové skříně v řezu



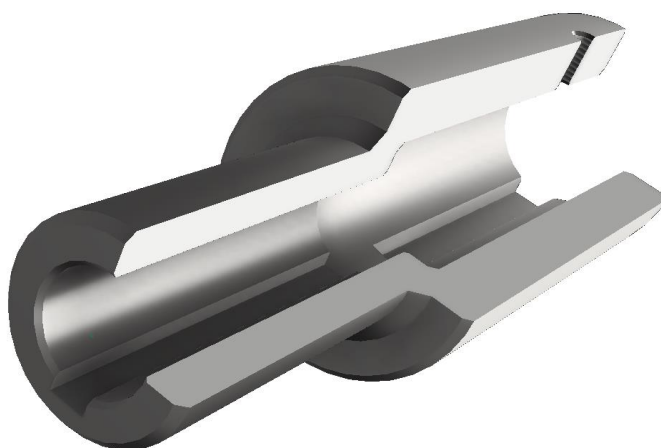
Obrázek 41 Spojková skříň po bodování



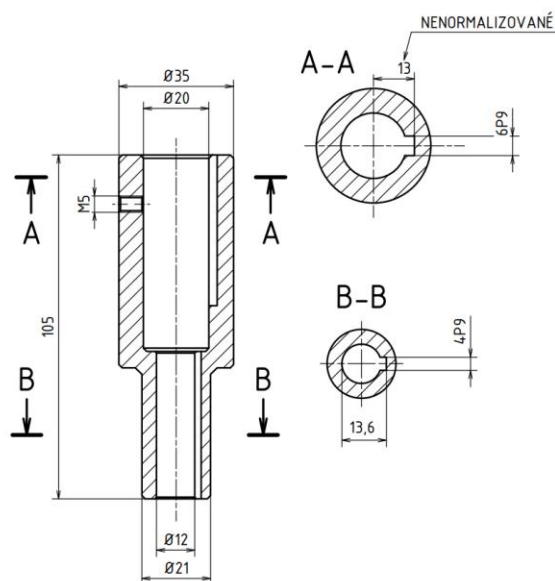
Obrázek 42 Spojení elektromotoru se skříní a spojkou

8.5 Hřídelová spojka

Pro přenos kroutícího momentu byla navržena nerezová spojka (obrázek 43). Na straně hřídele z motoru byla do spojky vyvrtána a vysoustružena díra $\varnothing 12\text{h}7$, do ní byla vytvořena průchozí drážka 4P9 pro pero 4e7 x 4 x 25 ČSN 02 2562 a na straně hřídele kultivační nádoby byla vyvrtána a vysoustružena díra $\varnothing 20\text{h}7$, do které byla obražena drážka 6P9. Výroba drážky 6P9 v původní hřídeli kultivační nádoby se zřejmě neřídila normou ČSN 02 2562 pro hřídele a díry o průměru 20 mm. Úsek spojky, kterým procházela hřídel nádoby, byl opatřen dírou se závitem M5 pro šroub stavěcí s čípkem M5 x 8 DIN 915 A-2. Tímto prvkem se upevnila hřídel nádoby při montáži zařízení. Základní rozměry spojky se nachází na obrázku 44. Výrobní výkres se nachází v příloze ve výkresu 001-004.



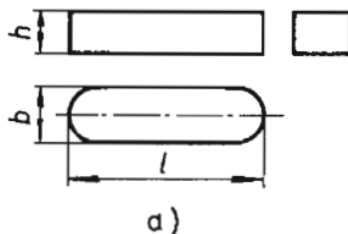
Obrázek 43 Model hřídelové spojky



Obrázek 44 Rozměry hřídelové spojky

8.5.1 Kontrola per na otláčení

Z důvodu bezpečnosti byla nutná kontrola těsných per na otláčení. Nejdříve bylo zkontrolováno více namáhané pero na hřídeli $\varnothing 12h7$ poté pero na hřídeli $\varnothing 20h7$. V literatuře se uvádí dovolený tlak pro ocelová pera až $P_d = 200$ MPa. Postup byl volen podle známých vztahů pro výpočet kroutícího momentu dostupných z literatury [34]. Do vztahů se dosazovaly rozměry charakteristické pro těsné pero (obrázek 45). Konkrétně se jedná průměr hřídele d [m], výška pera h [m] a aktivní délka pera l_s [m], která je získána ze vzorce (14) odečtením šířky pera b [m] od délky pera l_p [m]. Pokud by na hřídel o průměru d (půlka ramena síly F_h) působila síla F_h [N], může se pomocí ní vyjádřit kroutící moment M_{kh} [Nm]. V našem případě se uvažuje kroutící moment $M_{kh} = 23,5$ Nm daný elektromotorem.



Obrázek 45 Těsné pero [34]

$$M_{kh} = F_h \cdot \frac{d}{2} = \frac{1}{4} \cdot d \cdot h \cdot l_s \cdot P_d \quad (13)$$

$$l_s = l_p - b \quad (14)$$

Po úpravě vztahu (13) na vztah (15) a (16) získáme ze vztahu (15) tlak $p_1 [Pa]$ působící na bok pera hřídele o průměru $d_1 = 12 \text{ mm}$, $h_1 = 4 \text{ mm}$, $b_1 = 4 \text{ mm}$, $l_{p1} = 20 \text{ mm}$ a ze vztahu (16) tlak $p_2 [Pa]$, který působí na bok pera hřídele o průměru $d_2 = 20 \text{ mm}$, $h_2 = 6 \text{ mm}$, $b_2 = 6 \text{ mm}$, $l_{p2} = 20 \text{ mm}$. Do vztahu (15) a (16) se dosazuje $M_{kh} = 23\,500 \text{ Nmm}$ a délkové rozměry se dosazují v mm.

$$p_1 = \frac{M_{kh} \cdot 4}{d_1 \cdot l_{s1} \cdot h} = \frac{23\,500 \cdot 4}{12 \cdot (20 - 4) \cdot 4} = 122,4 \text{ MPa} \quad (15)$$

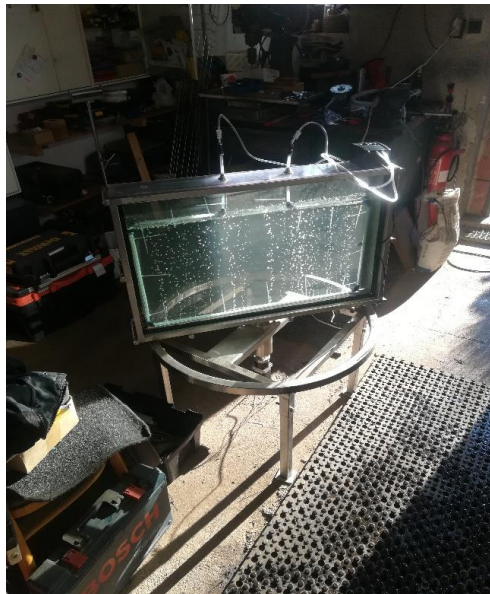
$$p_2 = \frac{M_{kh} \cdot 4}{d_2 \cdot l_{s2} \cdot h_2} = \frac{23\,500 \cdot 4}{20 \cdot (20 - 6) \cdot 6} = 56 \text{ MPa} \quad (16)$$

Z výsledku je patrné, že tlak působící na spoj na hřídeli o průměru 20 mm splňuje podmínku $p_2 < p_d$. Můžeme také vidět, že tlak na boky pera hřídele o průměru 12 mm je nižší než tlak dovolený $p_1 < p_d$. Oba spoje splňují podmínku dovoleného tlaku a jsou tedy bezpečně navrženy. Pokud budeme chtít zvýšit bezpečnost pohonného mechanismu, musíme buď snížit kroutící moment pohonu, nebo zvětšit rozměry per. Předpokládáme, že provozní kroutící moment bude nižší než 23,5 Nm.

8.6 Instalace rozvodu směsi plynu vzduchu a CO₂

Byl sestaven okruh, který je tvořen dvěma trasami elastolanových (termoplastický polyurethan) hadiček. Obě trasy jsou připojeny ke vzduchovacímu motůrku. Jedna z tras je vybavena spojkou tvaru Y, která slouží pro smíchání proudu CO₂ ze setu (obrázek 47) a proudu vzduchu z motůrku. Na obou trasách se nachází zpětný ventil, jenž brání zpětnému nasátí kultivačního roztoku. Těsně za zpětným ventilem se trasy napojují na přepážkové nástrčné spojky, které jsou umístěny ve víku kultivační nádoby. Do kultivační komory vstupuje z jednoho směru trasa se směsí vzduchu a CO₂ a z druhého směru vstupuje trasa, v níž proudí jen vzduch. V komoře mohou být trasy vnitřního okruhu uspořádány do libovolných tvarů, které jsou

omezeny jen vnitřními rozměry kultivační komory. Pro testovací provoz byl vytvořen okruh pomocí nástrčných spojek ve tvaru L, který kopíruje vnitřní profil kultivační komory fotobioreaktoru. Spojení dvou tras bylo realizováno pomocí perforované trubice, skrz kterou se do kultivačního média může uvolnit směs plynů CO_2 a vzduchu. Protože hadičky byly skladovány ve smotaném tvaru, tak musel být vnitřní okruh vyztužen nerezovými tyčemi, které byly staženy stahovacími páskami k hadičkám rozvodu plynu, aby nedocházelo ke krutu a ohybu vnitřních tras v důsledku působení vztahové síly a sil vyvolaných tvarovou pamětí materiálu hadiček, který měl snahu vrátit se do původní podoby.

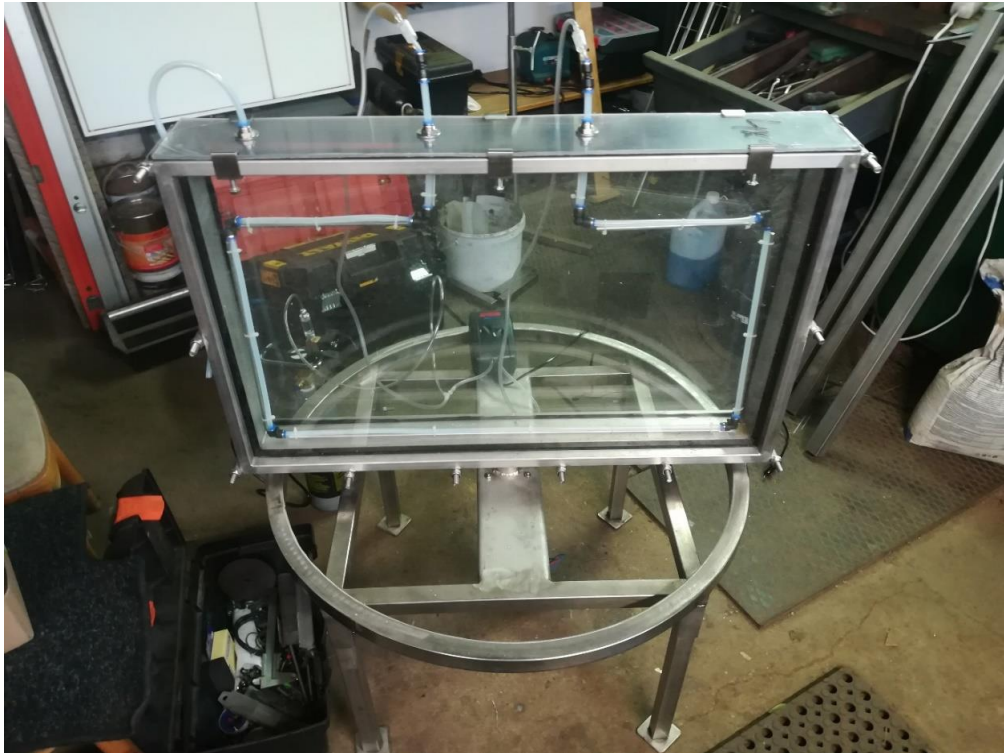


Obrázek 46 Test vzduchovacího systému



Obrázek 47 CO2 set

Fotobioreaktor byl po testu dovybaven třetí trasou, která může sloužit jako přívod kultivačního média do fotobioreaktoru, nebo jako odvzdušnění komory. Tato trasa se nachází na obrázku 48 v levé části víka.



Obrázek 48 Fotobioreaktor

8.7 Příprava pro instalaci měřících prvků

Dle požadavku zadavatele Centra polární ekologie Přf JU bylo nutné vytvořit do fotobioreaktoru hrdlo pro sondu měřící teplotu kultivačního média (obrázek 49) a hrdlo určené pro fluorescenční sondu. Hrdla mohla být umístěna do nerezové stěny kultivační nádoby pod hladinou kultivačního média. V tomto případě by pak bylo nutné vyvrtat do stěny díru a do díry navařit mufnu a vzniklé hrdlo utěsnit. Hrdlo může být také vyvrtáno do víka nádoby a sonda se pak může upevnit v závislosti na jejím konstrukčním řešení. Po zvážení obou možností bylo rozhodnuto, vytvořit hrdla sond do víka (obrázek 50, obrázek 51). Toto řešení je technicky méně složité. Další důvod je, že sondy jsou určeny pro měření ve svislé poloze. Do víka byly vyvrtány dvě díry, do kterých se zasunuly sondy. Na závitová hrdla sond byly nasazeny dvě matice, které byly staženy k víku z horní a spodní strany. Tím bylo docíleno upevnění sond, které zaručovalo jednoduchou instalaci s dostatečnou tuhostí uložení sondy. Pro spolehlivost naměřených dat je nutné vybavit vzduchovací systém ventilem, který uzavře přívod vzduchu a CO₂, protože vzduchování narušuje měření sond.



Obrázek 49 Teplotní sonda



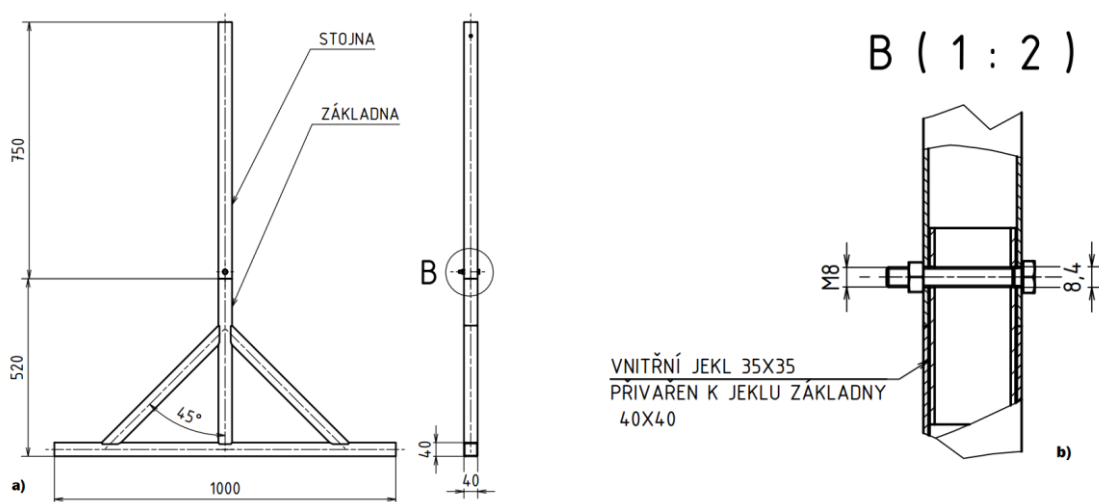
Obrázek 50 Instalace fluorescenční sondy 1



Obrázek 51 Instalace fluorescenční sondy 2

8.8 Výsuvný rám

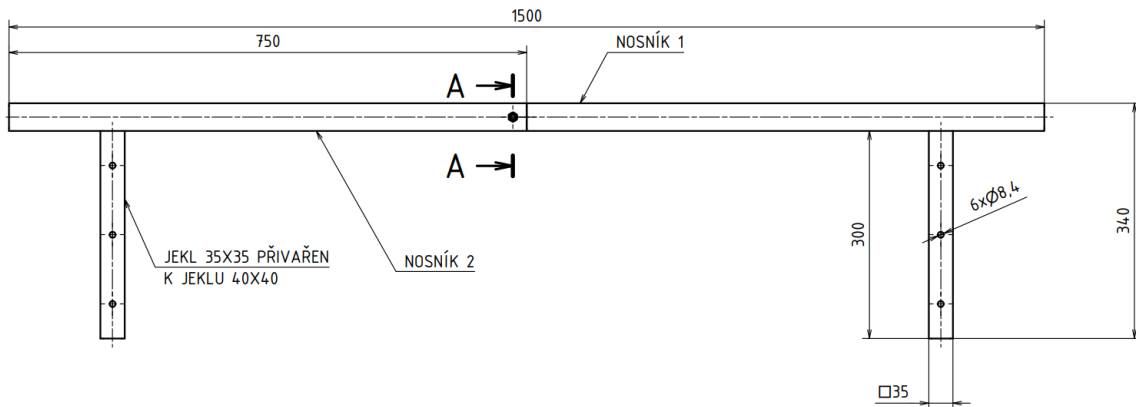
Z nerezových dutých čtvercových profilů byl svařen výsuvný rám, který se skládal ze dvou stojen (obrázek 52) a nosníku (obrázek 54). Dle požadavku na dopravu, musela být konstrukce tvořena díly dlouhými maximálně 1000 mm. Tento rozměr byl dán vnitřními rozměry přepravní bedny. Abychom tomuto požadavku vyhověli, musela být konstrukce rozebíratelná. Stojny byly složeny ze dvou částí. První částí byla základna tvaru trojúhelníku svařená ze třech profilů TR 4HR 40 x 2 - 500 DIN 2395 a jednoho profilu TR 4HR 40 x 2 - 1000 DIN 2395 z nerezové oceli 1.4571. Druhá část byla svislá část stojny z profilu TR 4HR 40 x 2 - 750 DIN 2395 1.4571, jenž byla k základně připojena šroubovým spojem (obrázek 53) k profilu 35 x 2 - 80 DIN 2395 1.4571, který byl vsazen a přivařen do profilu základny TR 4HR 40 x 2 - 500 DIN 2395.



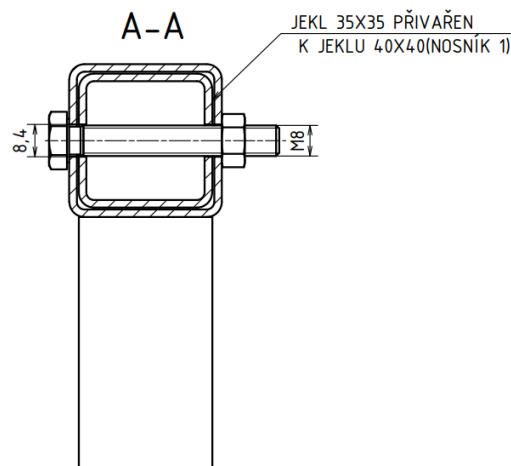
Obrázek 52 Stojna, (a) Spojení stojny se základnou, (b) Detail šroubového spojení stojny se základnou

Výsuvný nosník (obrázek 53) byl složen ze dvou stejných částí, které byly k sobě připojeny obdobným způsobem šroubového spojení jako základna a stojna. Do nosníku 1 z profilu TR 4HR 40 x 2 - 750 DIN 2395 byl vsazen a přivařen profil TR 4HR 35 x 2 - 80 DIN 2395. Do nosníku 2 z profilu TR 4HR 40 x 2 - 750 DIN 2395 a do profilu TR 4HR 35 x 2 - 80 DIN 2395 byla vyvrtána díra $\varnothing 8,4$ mm, kterou prochází šroub M8 x 55 - DIN933 A4-70. Šroubový spoj (obrázek 54) byl utažen maticí se šestihrannou hlavou M8 DIN 934 A4-80. Výsuvnost rámu byla zajištěna vyvrtáním děr $\varnothing 8,4$ mm do svislého profilu stojny a do svislých profilů 35 x 2 - 300 DIN

2395, jenž jsou přivařeny k nosníkům 1 a 2. Dírami prochází šrouby M8 x 55 DIN 933 A4-70, které jsou utaženy křídlovými maticemi M8 DIN 315A A2.



Obrázek 53 Nosník



Obrázek 54 Řez A-A šroubové spojení nosníku 1 a nosníku 2, obrázek vychází z obrázku 53

Výkres sestavy se nachází v příloze ve výkresu 003-001-S, výrobní výkres nosníku se nachází ve výkresu 003-001 a výkres stojny je ve výkresu 003-002. Kusovník 003-001-K výsuvného rámu se nachází v příloze práce.

8.9 Elektroinstalace a ovládání pohybu zařízení

Pro ovládání motoru LDO-57STH76-2804BPG13 (NEMA23) byl vybrán digitální driver Leadshine EM705 (obrázek 56), který je vhodný pro motory velikosti NEMA 23 a 34.



Obrázek 55 Driver Leadshine EM705

Jako zdroj proudu pro motor a driver byl vybrán zdroj DRP-240-24 MEAN WELL (obrázek 57), jehož výstupní proud je 10 A a výstupní napětí je 24 V. Výkon zdroje činí 240 W.



Obrázek 56 Zdroj MEANWELL DRP-240-24

Pro naprogramování pohonného mechanismu sledujícího Slunce byla využita platforma Arduino s knihovnou SolTrack a modulem esp32-wifi. Knihovna SolTrack se používá pro zjištění polohy Slunce pomocí funkce, která závisí na čase a poloze zařízení. Modul esp32-wifi se využívá pro připojení Arduina k síti wifi, aby se zajistila aktuální data o čase. Aby nedošlo k otočení hřídele s kultivační nádobou o více než 180°, což by mohlo mít za následek poškození

kabelů a vzduchotechniky, muselo být zařízení vybaveno dojezdovými senzory. Jako dojezdové senzory byly vybrány Hallovy sondy, které byly připojeny k řídicímu systému pohonu natáčení fotobioreaktoru. Programování a elektroinstalaci navrhl a instaloval Ing. Jiří Liška zaměstnanec BÚ AVČR v Třeboni.

9 Testovací provoz

Testovací provoz bez pohonu probíhal nepřetržitě od začátku dubna v areálu Botanického ústavu AVČR v Třeboni. Byla prověřena funkčnost zařízení z hlediska správné funkce vzduchování. Zde se došlo k závěru, že vzduchovací motůrek kapacitně nestačí, a proto byl pořízen malý nízkotlaký membránový kompresor Atman HP-12000 vhodný do venkovních podmínek. Kultivace probíhala po několik dní za teplot lehce pod bodem mrazu, kdy docházelo k mírnému namrznání kultivačního roztoku ke skleněné stěně nad hladinou, zároveň byl pozorován vznik menších ledových ker na hladině. Díky intenzivnímu míchaní však nedocházelo ke vzniku větších ker, které by mohly poškodit zařízení. Zbytek testování probíhal za normálních jarních a letních teplot. Testovací řasa, která byla vyizolována z půdy na Svalbardu, byla nasazena začátkem dubna (obrázek 58) a zhruba v půlce května byla sklizena (obrázek 59). Kultivace vybrané kultury řas proběhla úspěšně.



Obrázek 57 Začátek kultivace 2.4.2021, fotil: RNDr. Jaromír Lukavský CSc



Obrázek 58 Konec kultivace 11.5.2021, fotil: RNDr. Jaromír Lukavský CSc

Test pohonu proběhl v půlce června 2021. Byla zkontrolována funkčnost mechanismu pro přenos kroutícího momentu. Dále byly prověřeny silové poměry a plynulý chod pohonu.

Zkouška Kalibračního programu pro vymezení počáteční polohy komory fotobioreaktoru a nastavení komory do optimální polohy proběhla úspěšně. Video z testu je v příloze práce.



Obrázek 59 Test pohonu

10 Závěr

Cílem bakalářská práce bylo optimalizovat konstrukci otočného fotobioreaktoru, který se bude natáčet za Sluncem a zároveň konstrukci i pohon uzpůsobit k provozu v letních polárních podmínkách. V práci byla zpracována rešerše, která se věnuje základnímu rozdělení biomasy, popsání a roztřídění základních typů fotobioreaktorů a kultivačním podmínkám ovlivňující růst řas. Konstrukce fotobioreaktoru byla upravena dle požadavků zadavatele, kde hlavními požadavky byla schopnost konstrukce fotobioreaktoru otáčení se za Sluncem, odolnost zařízení proti vlivu prachu a korozi a možnost rozebíratelnosti zařízení kvůli přepravě.

Konkrétní úpravy konstrukce spočívají v přizvednutí podstavy, aby vznikl prostor pro instalaci elektromotoru a mechanismu, který bude přenášet kroutící moment. Mechanismus se skládá ze spojky a spojkové skříně, která chrání mechanismus před vlivy okolí a také upevňuje motor ke konstrukci. Kvůli utěsnění kultivační komory bylo navrženo a vyrobeno se vyrobilo víko z polykarbonátu, ve kterém jsou umístěné přepážkové nástrčné spojky pro přívod vzduchu a CO₂ do řasové suspenze. Součástí víka jsou i dvě díry, určené jako hrdla pro sondy. Pro vytvoření manipulačního prostoru nad fotobioreaktorem se zkonstruoval výsuvný rám s kabelovým žlabem, kterým vedou vzduchovací hadice bez rizika namotání se během rotace

komory fotobioreaktoru. Rám také slouží pro instalaci elektromontážní krabice. Pro všechny navržené části zařízení byla vytvořena výkresová dokumentace konstrukčních úprav včetně kusovníku se nachází v příloze.

Pro navrženou optimalizaci konstrukce byl proveden testovací provoz, který proběhl úspěšně. Další vývoj tohoto zařízení spočívá v instalaci odolnějšího elektromotoru, jeho dalšího testování a samotný provoz na Svalbardu.

11 Seznam literatury

- [1] I. Rawat, R. Ranjith Kumar, T. Mutanda, F. Bux, Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production, *Appl. Energy*. 103 (2013) 444–467. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.004>.
- [2] K. Robak, M. Balcerak, Review of second generation bioethanol production from residual biomass, *Food Technol. Biotechnol.* 56 (2018) 174–187. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>.
- [3] R.A. Lee, J.M. Lavoie, From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity, *Anim. Front.* 3 (2013) 6–11. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0010>.
- [4] L. Brennan, P. Owende, Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>.
- [5] R. Radakovits, R.E. Jinkerson, A. Darzins, M.C. Posewitz, Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production, *Eukaryot. Cell.* 9 (2010) 486–501. <https://doi.org/10.1128/EC.00364-09>.
- [6] PAVLOVÁ, Libuše. *Fyziologie rostlin*. Praha: Karolinum, (2005). ISBN 80-246-0985-1.
- [7] E. Van Esbroeck, Temperature control of microalgae cultivation under variable conditions, Wageningen University & Research, (2018). <https://edepot.wur.nl/455088>.
- [8] K.O. Cassidy, Evaluating Algal Growth At Different Temperatures, University of Kentucky, (2011). https://uknowledge.uky.edu/bae_etds/3/.
- [9] T. Bayer, N.V. Alba, Temperature optima for growth and photosynthetic processes in *Trebouxia erici* isolated from an Antarctic lichen and cultivated in a temperature gradient, *Czech Polar Reports.* 7 (2017) 34–44. <https://doi.org/10.5817/CPR2017-1-4>.
- [10] R.W. Hoham, Optimum Temperatures and Temperature Ranges for Growth of Snow Algae, *Arct. Alp. Res.* 7 (1975) 13. <https://doi.org/10.2307/1550094>.
- [11] M.R. Tredici, Mass Production of Microalgae: Photobioreactors, in: Edited by Amos

- Richmond (Ed.), *Handb. Microalgal Cult.*, Blackwell Publishing Ltd, 2007: pp. 178–214.
<https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch9>.
- [12] Y. Shen, W. Yuan, Z. J. Pei, Q. Wu, E. Mao, *Microalgae Mass Production Methods*, *Trans. ASABE*. 52 (2009) 1275–1287. <https://doi.org/10.13031/2013.27771>.
- [13] J.H. De Vree, *Outdoor microalgae production*, Wageningen University, (2016).
<https://doi.org/10.18174/387236>.
- [14] G. Chini Zittelli, L. Rodolfi, N. Bassi, N. Biondi, M.R. Tredici, *Photobioreactors for microalgal biofuel production*, in: *Algae for Biofuels and Energy*, 2013: pp. 225–266.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-5479-9_7.
- [15] J. Doucha, K. Lívanský, *High density outdoor microalgal culture*, in: Z.M. Bajpaj Rakesh, Prokop Aleš (Ed.), *Algal Biorefineries Vol. 1 Cultiv. Cells Prod.*, Springer, 2014: pp. 147–173. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7494-0_6.
- [16] E.T. Sero, N. Siziba, T. Bunhu, R. Shoko, E. Jonathan, *Biophotonics for improving algal photobioreactor performance: A review*, *Int. J. Energy Res.* 44 (2020) 5071–5092.
<https://doi.org/10.1002/er.5059>.
- [17] S. Hindersin, M. Leupold, M. Kerner, D. Hanelt, *Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors*, *Bioprocess Biosyst. Eng.* 36 (2013) 345–355. <https://doi.org/10.1007/s00449-012-0790-5>.
- [18] Co víte o řasách? *Alga.cz* [online]. © CENTRUM ALGATECH, 2014 [cit. 2021-7-23].
Dostupné z: <https://www.alga.cz/c-548-co-vite-o-rasach-.html>
- [19] V. Bělohav, T. Jirout, L. Krátký, *Possibilities of implementation of photobioreactors on industrial scale*, *Chem. List.* 112 (2018) 183–190.
- [20] R. Díez-Montero, V. Belohlav, A. Ortiz, E. Uggetti, M.J. García-Galán, J. García, *Evaluation of daily and seasonal variations in a semi-closed photobioreactor for microalgae-based bioremediation of agricultural runoff at full-scale*, *Algal Res.* 47 (2020) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101859>.
- [21] A. Richmond, *Biological Principles of Mass Cultivation*, in: A. Richmond (Ed.), *Handb. Microalgal Cult.*, Blackwell Publishing Ltd, (2007): pp. 125–177.

<https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch8>.

- [22] J. Xu, J. Cheng, K. Xin, J. Xu, W. Yang, Strengthening flash light effect with a pond-tubular hybrid photobioreactor to improve microalgal biomass yield, *Bioresour. Technol.* 318 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124079>.
- [23] D. Das, Algal biorefinery: An integrated approach, *Algal Biorefinery An Integr. Approach.* (2016) 1–467. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22813-6>.
- [24] Payerův dům v Longyearbyen. Prf.jcu.cz [online]. České Budějovice: © Přírodovědecká fakulta JU, 2021 [cit. 2021-7-24]. Dostupné z: <https://www.prf.jcu.cz/cars/payer.html>
- [25] Longyearbyen (Svalbard) Monthly Climate Averages,. *Worldweatheronline.com* [online]. © WORLD WEATHER ONLINE, 2021 [cit. 2021-7-24]. Dostupné z: <https://www.worldweatheronline.com/longyearbyen-svalbard-weather-averages/sogn-og-fjordane/no.aspx>.
- [26] Climate & Weather Averages in Longyearbyen, Svalbard, Norway. *Timeanddate.com* [online]. © Time and Date AS, 2021 [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://www.timeanddate.com/weather/norway/longyearbyen/climate>
- [27] NOŽIČKA, Jiří. *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2865-8.
- [28] ESS / ESH. *Phytron.eu* [online]. © Phytron, 2021 [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://www.phytron.eu/products/motors-actuators/ess-esh/>
- [29] ZSH. *Phytron.eu* [online]. © Phytron, 2021 [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://www.phytron.eu/products/motors-actuators/zsh/>
- [30] Tabulka krytí IP (popis stupňů). *Elektrika.cz* [online]. 2021: © Elektrika.info [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/krip030918>
- [31] Krokový motor Nema23 76mm s převodovkou 1:13. *Cnc.inshop.cz* [online]. FIT Eurazio, 2021 [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/krokove-motory-drivery/krokovy-motor-nema23-76mm-s-prevodovkou-113>
- [32] Vzduchovací motorek EHEIM Air pump 400. *Rataj-spz.cz* [online]. © RATAJ, 2021 [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://www.rataj-spz.cz/vzduchovaci-motorky/377-eheim->

air-pump-400

- [33] PRUŽNÉ SPOJKY SE STŘEDÍCÍM DŮLKEM. Teatechnik.cz [online]. © Teatechnik, 2021 [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/pruzne-spojky/>
- [34] BOLEK, Alfréd a Josef KOCHMAN. Části strojů. 1. svazek. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Česká matice technická, č. spisu 349. ISBN 80-03-00046-7.

12 Seznam obrázků

Obrázek 1 Otevřený traťový kultivační systém [12].....	17
Obrázek 2 Otevřený fotobioreaktor otevřeného typu [12]	18
Obrázek 3 Otevřený nemíchaný fotobioreaktor [12].....	18
Obrázek 4 Kaskádový fotobioreaktor [14]	19
Obrázek 5 Vertikální trubkový fotobioreaktor [14]	20
Obrázek 6 Horizontální fotobioreaktor [14]	21
Obrázek 7 Fotobioreaktor spirálového typu [16].....	21
Obrázek 8 Deskový fotobioreaktor[12].....	22
Obrázek 9 Deskový fotobioreaktor sledující Slunce [17]	23
Obrázek 10 Hybridní fotobioreaktor [20].....	24
Obrázek 11 Česká polární stanice Josefa Svobody nacházející se v Longyearbyenu [24]	29
Obrázek 12 Střecha lodního kontejneru, kultivační plošina, fotil: prof. Ing. Josef Elster, CSc	31
Obrázek 13 Lodní kontejner, kultivační plošina, fotil: prof. Ing. Josef Elster, CSc	31
Obrázek 14 Fotobioreaktor původní podoba, fotil: prof. Ing. Josef Elster, CSc.....	32
Obrázek 15 Fotobioreaktor pohled na bok nádoby	33
Obrázek 16 Vzorkovací kohout	33

Obrázek 17 Spodní rám	34
Obrázek 18 Hřídle nádoby.....	34
Obrázek 19 Uložení, krycí prsten	35
Obrázek 20 Ložisko KINEX 6204-2ZR.....	35
Obrázek 21 Ložisko v ložiskovém domku	35
Obrázek 22 Schéma uložení	38
Obrázek 23 Třecí plochy	39
Obrázek 24 Schéma sil.....	39
Obrázek 25 Působení sil a momentů větrem	42
Obrázek 26 Výkres elektromotoru LDO [31]	45
Obrázek 27 Schéma fotobioreaktoru	49
Obrázek 28 3D model fotobioreaktoru s popisem.....	50
Obrázek 29 Původní spodní rám	51
Obrázek 30 Nový spodní rám	51
Obrázek 31 Šroubové spojení nohy podstavy	52
Obrázek 32 Spodní rám po úpravě.....	52
Obrázek 33 Rozměry víka fotobioreaktoru	53
Obrázek 34 Víko s fittingem	53
Obrázek 35 Nosníková svorka TKL Fischer	54
Obrázek 36 Zeštíhlená svorka	54
Obrázek 37 Katalog pružná spojka GE-T rozměry [33].....	55
Obrázek 38 Katalog pružná spojka GE-T dynamické poměry [33]	55
Obrázek 39 Spojková skříň	56

Obrázek 40 Model spojkové skříně v řezu	57
Obrázek 41 Spojková skříň po bodování	57
Obrázek 42 Spojení elektromotoru se skříní a spojkou	58
Obrázek 43 Model hřídelové spojky.....	58
Obrázek 44 Rozměry hřídelové spojky	59
Obrázek 45 Těsné pero [34]	59
Obrázek 46 Test vzduchovacího systému	61
Obrázek 47 CO2 set.....	61
Obrázek 48 Fotobioreaktor	62
Obrázek 49 Teplotní sonda	63
Obrázek 50 Instalace fluorescenční sondy 1	63
Obrázek 51 Instalace fluorescenční sondy 2	63
Obrázek 52 Stojna, (a) Spojení stojny se základnou, (b) Detail šroubového spojení stojny se základnou	64
Obrázek 53 Nosník	65
Obrázek 54 Řez A-A šroubové spojení nosníku 1 a nosníku 2, obrázek vychází z obrázku 53.	65
Obrázek 55 Driver Leadshine EM705	66
Obrázek 56 Zdroj MEANWELL DRP-240-24.....	66
Obrázek 57 Začátek kultivace 2.4.2021, fotil: RNDr. Jaromír Lukavský CSc	67
Obrázek 58 Konec kultivace 11.5.2021, fotil: RNDr. Jaromír Lukavský CSc.....	68
Obrázek 59 Test pohonu	69
13 Seznam tabulek	
Tabulka 1 Přehled optimálních teplot pro kultivaci řas[7–9].....	15
Tabulka 2 Optimální teploty růstu sněžných řas [10]	16

Tabulka 3 Porovnání uzavřených a otevřených kultivačních systémů [12,14,22,23]	27
Tabulka 4 Přehled teplot v oblasti Longyearbyenu mezi lety 2015 - 2020 [26].....	30
Tabulka 5 Parametry elektromotoru ESS 59-3.....	46
Tabulka 6 Parametry převodovky GPL 52.3	46