

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**FOTOBIOREAKTORY PRO KULTIVACI ŘAS
V EXTRÉMNÍCH KLIMATICKÝCH
PODMÍNKÁCH**
DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

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: Energetika a procesní inženýrství
Specializace: Procesní inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Fotobioreaktory pro kultivaci mikrořas v extrémních klimatických podmínkách

Název diplomové práce anglicky:

Photobioreactors for cultivation of microalgae under extreme climatic conditions

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární, průmyslovou a patentovou rešerši stávajících kultivačních systémů umožňujících efektivní využívání slunečního záření. Na základě zpracované kritické rešerše určete nejvhodnější konstrukce fotobioreaktorů využitelných v poloprovozním měřítku v extrémních klimatických podmínkách odpovídající polárním oblastem a zimním měsícům ve střední Evropě. Vytvořte strojně technologické schéma zvolených kultivačních systémů. Navrhněte základní konstrukční uspořádání fotobioreaktorů a návrh zpracujte ve formě 3D modelu a basic design výkresové dokumentace. Při návrhu uvažujte extrémní podmínky okolního prostředí místa instalace.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce a vlastní rešerše

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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


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

Datum zadání diplomové práce: 17.04.2023

Termín odevzdání diplomové práce: 04.08.2023

Platnost zadání diplomové práce: 24.09.2023


Ing. Mgr. Vojtěch Bělohlav, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

26. 4. 2023

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

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi poskytli podporu a pomoc při tvorbě této diplomové práce i během studia. Zejména bych chtěl poděkovat panu Ing. Mgr. Vojtěchu Bělohlavovi Ph.D. za jeho odborné rady a příspěvky, které byly velmi cenné a pomohly mi při tvorbě této práce. Také bych chtěl poděkovat rodině za podporu během celého studia.

Anotační list

Jméno autora: Karel

Příjmení autora: Šnokhous

Název práce česky: Fotobioreaktory pro kultivaci mikrořas v extrémních klimatických podmínkách

Název práce anglicky: Photobioreactors for microalgae cultivation under extreme climatic conditions

Rozsah práce: počet stran: 84

počet obrázků: 52

počet tabulek: 1

počet příloh: 9

Akademický rok: 2022/2023

Jazyk práce: Český jazyk

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky – U12118

Studijní program: (NEPI) Energetika a procesní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav, Ph.D.

Konzultant práce:

Zadavatel: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Anotace česky: Diplomová práce se zabývá návrhem kultivačních zařízení vhodných ke kultivaci mikrořas v extrémních klimatických podmínkách Arktidy, Antarktidy a střední Evropy během zimních měsíců. Teoretická část popisuje základní charakteristiku a využití extremofilních řas uzpůsobených k přežití v extrémních podmínkách. Součástí teoretické části je literární rešerše otevřených a uzavřených kultivačních systémů a fotobioreaktorů využitelných ke kultivaci sněžných řas. Patentová rešerše uvádí příklady otočných fotovoltaických systémů sledující slunce, které mohou být vhodné k optimalizaci intenzity slunečního záření při kultivaci mikrořas. Na konci teoretické části se nachází posouzení parametrů kultivace a charakteristik kultivačních systémů včetně výběru otočného mechanismu. Výstupem teoretické části je návrh stacionárního trubkového spirálového fotobioreaktoru a otočného deskového fotobioreaktoru optimalizující intenzitu dopadajícího záření. Návrh basic designu obou zařízení je popsán v praktické části práce včetně technologického schématu, 3D modelů s popisem a výkresové dokumentace, která se nachází v příloze.

Klíčová slova: deskový fotobioreaktor, trubkový spirálový fotobioreaktor, fotobioreaktor sledující slunce, extremofilní kultivace mikrořas

Anotace anglicky: The diploma thesis deals with the design of cultivation devices suitable for cultivating microalgae in extreme climatic conditions in the Arctic, Antarctic, and Central Europe during winter months. The theoretical part describes the basic characteristics and utilization of extremophilic algae adapted to survive in extreme conditions. The theoretical section includes a literature review of open and closed cultivation systems and photobioreactors applicable to the cultivation of snow algae. The patent research presents examples of sun-tracking photovoltaic systems that could be suitable for optimizing solar radiation intensity during microalgae cultivation. At the end of the theoretical part, an assessment of cultivation parameters and characteristics of cultivation systems, including the selection of a sun-tracking mechanism, is provided. The output of the theoretical part is the design of a stationary tubular spiral photobioreactor and a sun-tracking flat-panel photobioreactor, optimizing the intensity of incoming radiation. The design of the basic structure of both devices is described in the practical part of the thesis, including a simplified technological scheme, 3D models with descriptions, and drawing documentation, which can be found in the appendix.

Klíčová slova anglicky: flat panel photobioreactor, tubular spiral photobioreactor, sun-tracker photobioreactor, extremophilic microalgae cultivation

Využití: Fotobioreaktory jsou určeny ke kultivaci extremofilních mikrořas v extrémních klimatických podmínkách.

Seznam symbolů a zkratk

A	Plocha průřezu trubky [m^2]
C^{CO2d}	Objemová koncentrace CO ₂ v aerační směsi deskového fotobioreaktoru [% obj.]
C^{CO2s}	Objemová koncentrace CO ₂ v aerační směsi spirálového fotobioreaktoru [% obj.]
d_{char}	Charakteristický průměr potrubí [m]
D_{in}	Vnitřní průměr trubky [m]
$D_{stř}$	Střední průměr spirály [m]
$e_{\dot{\epsilon}}$	Měrné energie dodávané do systému [$J\ kg^{-1}$]
e_z	Ztráta třením [$J\ kg^{-1}$]
g	Gravitační zrychlení [$m\ s^{-2}$]
h	výška spirály [m]
h_1	Výška na vstupu do spirálového fotobioreaktoru [m]
h_2	Výška na výstupu ze spirálového fotobioreaktoru [m]
k	Drsnost potrubí [m]
k^*	Relativní drsnost potrubí [-]
l	Délka potrubí [m]
λ	Součinitel třecích ztrát [-]
n	Počet spirál [-]
O_{spiral}	Střední obvod jedné spirály [m]
p_1	Tlak na vstupu do spirálového fotobioreaktoru [Pa]
p_2	Tlak na výstupu ze spirálového fotobioreaktoru [Pa]
r	rozteč mezi spirálami [m]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
u	Rychlost kultivačního média uvnitř trubek [$m\ s^{-1}$]
u_1	Rychlost kapaliny v trubce na vstupu do spirálového fotobioreaktoru [$m\ s^{-1}$]
u_2	Rychlost kapaliny v trubce na výstupu ze spirálového fotobioreaktoru [$m\ s^{-1}$]
V	Objem kultivovaného média [m^3]
V^*	Průtok média [$m^3\ s^{-1}$]
V^*_{CO2d}	Průtok CO ₂ do deskového fotobioreaktoru [$l\ min^{-1}$]
$V^*_{CO2maxs}$	Maximální průtok CO ₂ do spirálového fotobioreaktoru [$l\ min^{-1}$]
V^*_{maxd}	Maximální objemový průtok earačního plynu do deskového fotobioreaktoru [$l\ min^{-1}$]
V^*_{maxs}	Maximální objemový průtok earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru [$l\ min^{-1}$]
V^*_{mins}	Minimální objemový průtok earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru [$l\ min^{-1}$]
V^*_{optd}	Optimální objemový průtok earačního plynu do deskového fotobioreaktoru [$l\ min^{-1}$]
V_d	Objem kultivovaného média v deskovém fotobioreaktoru [m^3]
V_d^*	Požadovaný průtok aeračního média deskovým fotobioreaktorem [$l\ min^{-1}$]
V_s	Objem fotosyntetické části spirálového fotobioreaktoru [m^3]
vvm	Objem plynu na objem vsádky za minutu [$l\ l^{-1}\ min^{-1}$]
vvm_{maxd}	Maximální průtok earačního plynu do deskového fotobioreaktoru [$l\ l^{-1}\ min^{-1}$]
vvm_{maxs}	Maximální průtok earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru [$l\ l^{-1}\ min^{-1}$]

vvm_{mind}	Minimální průtok earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru [$l\ l^{-1}\ min^{-1}$]
vvm_{mins}	Minimální průtok earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru [$l\ l^{-1}\ min^{-1}$]
vvm_{optd}	Optimální průtok earačního plynu do deskového fotobioreaktoru [$l\ l^{-1}\ min^{-1}$]
π	Ludolfovo číslo [-]
ρ	Hustota [$kg\ m^{-3}$]
μ	Dynamická viskozita [$Pa\ s$]
ν	Kinematická viskozita [$m^2\ s^{-1}$]
Δpa	Tlaková třecí ztráta [Pa]
\mathcal{K}_x	Součinitel pro turbulentní proudění [-]
AVČR	Akademie věd České republiky
CO ₂	Oxid uhličitý
IP	Stupeň krytí
KČ	Česká koruna
LED	Elektroluminiscenční dioda
N	Dusík
O ₂	Kyslík
P	Fosfor
PFD	Strojně technologické schéma
pH	Vodíkový potenciál
PLC	Programovatelný logický automat

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Mikrořasy a jejich využití	11
1.2	Mezofilní řasy	11
1.3	Extremofilní řasy.....	12
1.3.1	Termofilní řasy.....	12
1.3.2	Psychrofilní řasy.....	13
1.3.3	Sněžné a polární řasy.....	13
1.4	Využití mikrořas	14
2	Motivace a cíle práce	15
3	Kultivace mikrořas v extrémních klimatických podmínkách	17
3.1	Klimatické podmínky	17
3.2	Kultivační systémy	18
3.2.1	Otevřené kultivační systémy	19
3.2.2	Uzavřené systémy	21
4	Návrh zařízení.....	51
4.1	Stacionární varianta	52
4.1.1	Potrubí.....	54
4.1.2	Zadržná nádrž	57
4.1.3	Čerpadlo	59
4.1.4	Přívod vzduchu a CO ₂	62
4.1.5	Měření a regulace	64
4.1.6	Čištění a sterilizace	66
4.2	Otočná varianta	67
4.2.1	Kultivační komora.....	70
4.2.2	Otočný mechanismus	71

4.2.3	Zrcadlo	72
4.2.4	Vzduchování a míchání.....	73
4.2.5	Měření a regulace	75
4.2.6	Čištění a sterilizace	76
5	Závěr	76
6	Seznam literatury	77
7	Seznam obrázků	82
8	Seznam tabulek	84
9	Seznam příloh.....	84

1 Úvod

Mikrořasy jsou jedním z nejvíce rozmanitých druhů jednobuněčných mikroorganismů, které jsou schopné provádět fotosyntézu a vyskytují se téměř všude, kde se nachází slaná či sladká voda. Odhaduje se, že existuje 200 až 800 tisíc druhů mikrořas (řas a sinic), z nichž je zhruba 50 tisíc druhů popsáno. Mohou se vyskytovat samostatně, v řetězcích nebo koloniích. Velikost mikrořas se pohybuje od několika po stovky mikrometrů. Mikrořasy jsou nenahraditelnou součástí celého zemského ekosystému, kde zachycují CO₂, dusík, fosfor či jiné látky a pomocí fotosyntézních procesů produkují O₂ a živiny ve formě bílkovin, tuků a sacharidů sloužících jako potrava pro další organismy.

Mikrořasy také produkují látky pomáhající k přežití a adaptování se na různorodé prostředí i na náhlé změny teploty, vlhkosti, slanosti či intenzity slunečního záření. Tyto látky jsou karotenoidy, antioxidanty, mastné kyseliny, enzymy, polymery, peptidy, toxiny a steroly. Dosud bylo chemicky určeno zhruba 15 tisíc látek a jejich využití v komerčním sektoru je stále atraktivnější i přes náročnou kultivaci.

1.1 Mikrořasy a jejich využití

V současné době se trend kultivace mikrořas zabývá hlavně výrobou biopaliv 3. a 4. generace, která je prosazována politickým směřováním Green Dealu zemí Evropské unie, jenž mají za cíl snížit uhlíkovou stopu způsobenou spalováním fosilních paliv a také zajistit udržitelnost zemědělství. Výhoda výroby biopaliv z řas spočívá v rychlé době sklizně biomasy, která může být kultivována i na půdě nevhodné k pěstování zemědělských plodin při daleko vyšších výnosech na plochu. Další výhodou je, že kultivace řas nevyžaduje intenzivní hnojení ani používání pesticidů a jiných chemických látek.

Řasy také spotřebovávají CO₂ a čistí z odpadní vody dusík a fosfor, to je činí ekologicky atraktivními. Kultivace řas pro energetické účely zatím není zvládnuta v průmyslovém měřítku. Všechny komerční pokusy skončily neúspěchem a uzavřením těchto farem z důvodů, které souvisely jak s inhibicí růstu, tak s náročným zpracováním biomasy a vysokými provozními náklady.

1.2 Mezofilní řasy

Mezofilní mikrořasy se vyznačují optimální teplotou růstu ležící v rozmezí normálních teplot pro člověka, nejčastěji mezi 20 až 30 °C. Avšak literatura se neshoduje na přesném

rozsahu teplot. Tyto řasy jsou jediným průmyslově komerčně kultivovaným druhem mikrořas, protože jejich kultivace probíhá za teplot, kterých lze snadno dosáhnout během letních, jarních a podzimních měsíců v závislosti na zeměpisném pásmu. Nejčastěji kultivovanými mezofilními kmeny pro komerční účely jsou kmeny *Chlorella* a *Spirulina*, které však mohou růst i za velmi nízkých teplot. Kmeny rostoucí za nízkých se označují jako extremofilní druhy řas. Rozsah teplot růstu je dán schopností kmenu se přizpůsobit okolním podmínkám, proto je vhodné rozlišovat kmeny také podle místa odběru, neboť dva stejné kmeny mohou mít velmi odlišné vlastnosti. V současné době je trend zaměřený na bioprospekci kmenů izolovaných z tropických krajů, kde panují ideální podmínky pro kultivaci mezofilních řas. Právě díky celoročně stabilním teplotám mezi 20 a 30 °C, které ve spojení s dlouhou délkou dne zajišťují vysoké tempo růstu biomasy mikrořas a tím umožňují ekonomicky rentabilní kultivaci.

1.3 Extremofilní řasy

Velmi atraktivní skupinou mikrořas, která se vyznačuje tvorbou extremozymů a extremolytů, jsou extremofilní řasy. Tyto řasy žijí v extrémních podmínkách, jako jsou polární a tropické pouště, slaný mořský led, horské ledovce, horké prameny, vrcholy sopek a hor, oblasti s vysokou slaností nebo koncentrací těžkých kovů, hluboké vody či hydrotermální průduchy na dně oceánu. Přístupnost těchto lokalit je většinou jen velmi omezená. Pro jejich dosažení je nutné vynaložit značné logistické úsilí i finanční prostředky.

Hlavní předností těchto řas je potenciál pro venkovní kultivační procesy, neboť pravděpodobnost kontaminace média konkurenčními mikroorganismy je za dodržení extrémních podmínek velmi malá. Pokud vytvoření extrémních podmínek pro kultivaci není příliš náročné, tak náklady na provoz kultivace výrazně klesají. Extremofilní řasy se mohou dále rozdělit dle jejich schopnosti růstu v závislosti na teplotě okolí na termofilní a psychrofilní [1].

1.3.1 Termofilní řasy

Termofilní řasy obvykle rostou při teplotách vyšších než 50 °C. Tyto řasy se nalézají ve vodním prostředí v blízkosti termálních pramenů. Jejich metabolismus tvořený termostabilními enzymy, které jim umožňují přežít za vysokých teplot, se vyznačuje vyšší metabolickou rychlostí, než je tomu u psychrofilních nebo kryofilních řas. Jsou tak schopné zpracovat více CO₂ a svoji biomasu za ideálních podmínek zdvojnásobí za 9 hodin, zároveň produkují lipidy, které jsou vhodné k výrobě biopaliv. V termofilních řasách se také nacházejí antioxidační látky nalézající uplatnění ve farmaceutickém průmyslu.

Uplatnění mají termofilní řasy i v oblasti čištění odpadních vod. Termofilní kmen *Galdieria sulphuraria* odebraný z oblasti horkých pramenů Yellowstonekého národního parku je kultivován v pilotním systému nazývaném POWER. Systém POWER umístěný v areálu čističky odpadních vod Las Cruces v USA ve státě Nové Mexiko se skládá z plastových nádrží připomínající vaky o obsahu 750 litrů. Kultivace na bázi čištění odpadních vod probíhá za vysokých teplot kolem 43 °C. Výsledná biomasa se pak může dále zpracovávat za účelem získání biopaliv pomocí procesu hydrotermálního zkapalňování, nebo se může použít jako hnojivo bohaté na dusík a fosfor. Prozatím je však získaná biomasa opětovně recyklována v procesu kultivace, nebo použita k nákladné experimentální výrobě biopaliv a hnojiv.

Autoři systému POWER Nirmalakhandan a kol. tvrdí, že náklady spojené s čištěním odpadní vody tímto způsobem jsou velmi nízké, to ale nelze ověřit z důvodu nedostupnosti dat o kultivaci [1], [2].

1.3.2 Psychrofilní řasy

Další skupinou mikrořas jsou psychrofilní řasy a sinice, které se přizpůsobily chladným biotopům, jako jsou polární oblasti, horské oblasti a hluboké a chladné oceánské vody. Morita (1975) definoval psychrofilní organismy jako ty, jejichž maximální růst nastává za nízkých teplot mezi 0 až 15 °C a pokud teplota přesáhne 20 °C, tyto organismy umírají. Existuje také řada psychrotrofních kmenů, které jsou schopné přežít za nízkých teplot, ale jejich optimální teplota pro maximální růst přesahuje 15 °C. Klasifikace psychrofilních a psychrotrofních řas je problematická a nejednotná. To je pravděpodobně způsobeno tím, že optimální růst řas není závislý pouze na teplotě, ale i na intenzitě osvětlení, pH a dalších faktorech [3].

1.3.3 Sněžné a polární řasy

Podskupinou extrémofilních mikrořas jsou sněžné a polární řasy. Tyto řasy se vyskytují v tajícím sněhu, ledu, půdě, tekoucích vodách řek a potoků, ale také v jezerech a slaných či brakických vodách oceánů. V těchto biotopech přežívají za extrémních teplotních, vlhkostních a světelných podmínek, které často doprovází nedostatek živin.

Záznamy o sněžných řasách pocházejí již z 16. století, kdy mořeplavec a objevitel John Davis v roce 1585 zaznamenal pozorování zbarveného sněhu u pobřeží Kanady. Avšak až s příchodem mikroskopu a moderní vědy bylo objeveno, že za tímto zbarvením stojí růst řas. Barva sněhu se může lišit – může být zelená, červená, růžová, oranžová nebo šedá v závislosti

na akumulaci příslušných barviv. Tento zbarvený sníh můžeme pozorovat v horských a polárních oblastech po celém světě, například v Alpách, Tatrách, Karpatech nebo ve severských zemích.

V Evropě se vzorky sněžných řas odebíraly zejména v Alpách, Tatrách a Karpatech nebo v severských zemích. Procházková a kol. odebrali vzorek řasy z polských Vysokých Tater způsobující oranžové zbarvení sněhu a identifikovali ji jako *Chloromonas krienitzii*, dříve popsanou z hor Japonska. Mnoho kmenů sněžných řas se vyskytuje současně v horských i polárních biomech napříč kontinenty. Příkladem takového kmenu je *Sanguina* způsobující červené zbarvení sněhu vysokým obsahem astaxanthinu v buňkách [4].

1.4 Využití mikrořas

I když se zatím výroba biopaliv z řas jeví jako neperspektivní, tak kultivace řas pro potravinářské a farmaceutické účely a čištění odpadních vod již v průmyslovém měřítku funguje. V Evropě k roku 2021 existuje nejméně 477 produkčních jednotek, které kultivují ve větší míře jak mořské (makrořasy) tak i sladkovodní řasy [5]. Produkovaná biomasa je určena převážně pro výrobu doplňků stravy s vysokou přidanou hodnotou a pro farmaceutické účely.

V odvětví čištění odpadních vod hrají důležitou roli mikrořasy, které v symbióze s dalšími mikroorganismy, jako jsou houby a bakterie, mohou za vhodných podmínek odstranit zbytková znečištění z komunálních odpadních vod v aeračních nádržích. Existují také aplikace, kdy se použijí speciální kmeny mikrořas pro likvidaci specifických látek nebo i olejů. Použití řas je výhodné zejména díky tvorbě biomasy, která se může dále ekonomicky zpeněžit.

Kuttiyathil a kol. (2021) popisují využití mikrořas k vyčištění ropy. V jejich studii se ukázalo, že *Chlorella vulgaris* je schopná odstranit 80 % znečištění z 1 l vody kontaminované 12 ml ropy ve formě emulze za pouhých 5 dnů [6]. Je však důležité zdůraznit, že tato studie probíhala v laboratorním prostředí. Přenesení podobných biologických procesů do průmyslového měřítká bývá velmi složité. Je však patrné, že použití řas zahrnuje širokou škálu procesů s vysokým ekonomickým i enviromentálním potenciálem.

Uplatnění extremofilních řas spočívá zejména v doplňování kultivačních kampaní mezofilních mikrořas v mírném zeměpisném pásmu, jako je střední Evropa, kde je růst omezen venkovními teplotami a délkou a intenzitou slunečního svitu. Během jarních a podzimních měsíců dosahuje kultivace mezofilních kmenů obvykle nižších výnosů ve srovnání s letními

měsíci. V zimním období není kultivace možná s výjimkou provozování kultivace uvnitř ochranného skleníku s umělým osvětlením a regulací teploty, což je nákladný proces.

Využitím sněžných a polárních mikrořas, které prosperují za nízkých teplot, by bylo možné dosáhnout vyšších výnosů při kultivaci v porovnání s konvenční kultivací mezofilních řas během jarního a podzimního období, kdy teplota klesá pod 20 °C. Zároveň by kultivace těchto řas byla možná i během zimních měsíců s nižšími náklady na osvětlení a regulaci teploty. Vědecké výzkumy také potvrzují výhodnost kultivace polárních kmenů za nízkých teplot [7].

Extremofilní řasy je také vhodné kultivovat v oblastech, jako jsou severské kraje a oblasti Arktidy a Antarktidy, kde panují extrémní světelné a teplotní podmínky, které by jinak neposkytovaly dostatečně vhodné prostředí pro růst konvenčních mezofilních mikrořas. Kultivace v nehostinném prostředí by také rozšířila zdejší možnosti trhu mikrořas.

2 Motivace a cíle práce

Tato práce navazuje na bakalářskou práci na téma "Optimalizace konstrukce deskového fotobioreaktoru pro kultivaci mikrořas v polárních podmínkách". V rámci bakalářské práce byl vyvinut experimentální deskový 20litrový otočný fotobioreaktor, který měl za cíl otestovat možnosti kultivace polárních a sněžných mikrořas v extrémních podmínkách. Zvláštností této kultivace bylo to, že se deskový fotobioreaktor otáčel za sluncem, čímž bylo maximalizováno využití dopadajícího záření na kultivační komoru.

První kultivace v experimentálním fotobioreaktoru probíhala v Třeboni od půlky března až do konce června, kdy byly i vlivem nízkých teplot pozorovány momenty zamrzání zařízení. Podařilo se zjistit, že zařízení je schopné efektivně kultivovat polární mikrořasy za relativně extrémních podmínek, při kterých by mezofilní řasy nepřežily.

Druhá kultivace proběhla během léta na Polární stanici Josefa Svobody na Svalbardu v Longyearbienu. Tato kultivace byla provozována během polárního dne, a fotobioreaktor se otáčel za sluncem nepřetržitě 24 hodin denně. Druhá kultivace mikrořas proběhla také úspěšně.

Pro další výzkumu je důležitý vývoj zařízení, které by umožnilo kultivaci polárních a sněžných řas v poloprovozním měřítku. Předmětem zkoumání je růst řas při maximálním využití slunečního záření.

Pro prozkoumání vlivu otočného mechanismu na průběh kultivace budou navrženy dva typy fotobioreaktorů, jedno stacionární a jedno otočné zařízení. Oba typy fotobioreaktorů by měli být přizpůsobené kultivaci polárních a sněžných řas. Měli by také umožnit studium vlivu provozních podmínek na růst a tvorbu metabolických produktů během kultivace. Data závislosti růstu řas na intenzitě osvětlení a teplotě kultivačního média, získaná z fotobioreaktorů, pak mohou být využita pro posouzení vhodnosti kmenu pro kultivaci a optimalizaci procesu v provozním měřítku. Z dat je také možné vyhodnotit, zda je koncepce fotobioreaktorů s otočným mechanismem maximalizujícího využití slunečního záření pro kultivaci mikrořas perspektivní.

Kultivace bude probíhat ve venkovním prostředí bez použití skleníku a umělého osvětlení kultivačního média. Místo předpokládané instalace je jižní oblast severních polárních krajů v letních měsících a mimoletní kultivace ve střední Evropě za teplot, při kterých nehrozí zamrzání kultivačního média a ani jeho nadměrný ohřev. Kultivace by měla probíhat v přirozeném prostředí za podmínek zhruba odpovídajících místu odběru řas, proto zařízení nebude vybaveno systémem tepelné regulace v podobě výměníku tepla ani systémem umělého osvětlení. Teplota kultivačního média bude záviset pouze na teplotě okolí a intenzitě slunečního záření.

Cílem práce je:

- Návrh otočného deskového fotobioreaktoru pro kultivace polárních řas v poloprovozním měřítku
- Návrh stacionárního fotobioreaktoru pro kultivace polárních řas v poloprovozním měřítku

Postup práce je:

- Vytvoření literární a patentové rešerše
- Zhodnocení a vybrání vhodného řešení otočného a stacionárního fotobioreaktoru na základě rešerše
- Zhotovení základních výpočtů
- PFD a výčet základních aparátů
- Vytvoření 3D modelu a výkresové dokumentace

3 Kultivace mikrořas v extrémních klimatických podmínkách

Existuje jen málo článků a dostupných dat týkajících se kultivace sněžných nebo polárních řas. Většina těchto dat je získávána během kultivace v laboratoři, která je omezena pouze na litry kultivačního média. Také metabolické procesy a produkty v buňkách jsou během kultivace v laboratoři odlišné oproti procesům v přirozeném prostředí. Pro kultivaci je obecně důležité dbát na správný rozsah a udržení kultivačních teplot, vhodnou intenzitu osvětlení, dobu osvětlení, distribuci CO₂ a živin, odvod O₂, míchání média, pH a také zamezit kontaminaci konkurenčními mikroorganismy.

I přes nepříznivé podmínky jsou tyto mikrořasy schopné přizpůsobit se svému okolí a prosperovat v něm. Tento úspěch vychází ze schopnosti produkovat vzácné látky pomocí metabolických adaptačních mechanismů, které ovlivňují jejich životní funkce a připraví je na nepříznivá období. Pro další rozvoj biotechnologií a výroby produktů s vysokou přidanou hodnotou je důležité sbírat nové kmeny řas, provádět jejich taxonomické popsání a zvládnout proces kultivace a následně optimalizovat celý průběh.

V málo probádaných krajích, jako jsou Arktida, Antarktida a oblasti polárních kruhů, se skrývá vysoký potenciál k objevení nových dosud neznámých kmenů polárních řas. Díky nim lze prohloubit znalosti vlivu těchto organismů na místní ekosystémy a využití vzácných látek, které tyto řasy produkují, může nabýt nových dimenzí.

3.1 Klimatické podmínky

Kultivace mikrořas je směřována hlavně do chladných oblastí polárních krajů Arktidy, které se nacházejí na sever od severního polárního kruhu (zhruba na 66° severní zeměpisné šířky). Přesná poloha severního i jižního polárního kruhu se mění s rotací Země. Do severských polárních krajů lze zařadit skandinávské státy Norsko, Finsko, Švédsko, ale i Grónsko, Rusko, Kanadu a sever Aljašky. Tyto oblasti jsou typické režimem polárního dne, kdy je slunce po celý den nízko nad obzorem, a polární noci, kdy je slunce stále pod horizontem.

Doba trvání polárního dne a noci závisí na zeměpisné šířce. Čím více se zeměpisná šířka blíží 90° (což odpovídá zeměpisné šířce severního pólu), tím je období polární noci delší. Délka trvání polární noci na severním pólu je až 179 dní [8]. Během polární noci je nemožné venkovně kultivovat řasy z důvodu nedostatečné intenzity osvětlení a nízkých teplot, které

dosahují hodnot hluboko pod bodu mrazu. Jedinou alternativou během polární noci je kultivace v temperovaných podmínkách s umělým osvětlením ve vnitřních prostorech.

Kultivace v polárních krajích směřuje k využití dlouhého polárního dne během polárního léta, kdy se průměrné teploty v jižních oblastech polárních krajů pohybují od 0 °C do 15 °C. Během polárního léta závisí počet polárních dnů analogicky, jako je tomu u polární noci, tedy čím blíže se daná lokalita nachází k pólu, tím je počet polárních dnů vyšší. Na Svalbardu trvá období polárních dnů od 20. dubna do 22. srpna a v nejsevernější pevninské evropské lokalitě v norském Nordkinu toto období trvá od 14. května do 29. července.

Teplotní podmínky na pevnině jsou velmi silně ovlivněny blízkostí oceánu a mořskými proudy, které přispívají ke stabilizaci teplotních výkyvů jak během dne, tak i během delších meziročních období. Pobřežní oblasti polárních krajů se vyznačují silnou oblačností, která rozptyluje, pohlcuje a odráží sluneční záření využitelné pro proces fotosyntézy řas. Srážky jsou v polárních oblastech nízké a jejich intenzita se zvyšuje směrem k polárnímu kruhu. Na severním pólu se úhrn srážek pohybuje kolem 200 mm za rok ve formě sněhu. Úhrn srážek jižního výběžku Grónska se pohybuje mezi 1000 a 1300 mm za rok. Oblasti Švédka a Finska jsou relativně suché s úhrnem kolem 500 až 1000 mm ročně. Deštivo je hlavně v oblasti norských fjordů, kde srážky běžně dosahují 2000 mm za rok [9].

Přímořské oblasti Kanady se klimaticky velmi podobají podmínkám na severu Skandinávie. Zima v severních oblastech kanadského přímoří i vnitrozemí je velice chladná. Nejnižší naměřená teplota -63 °C byla zaznamenána v roce 1947 ve vesnici Snag v Yukonu. Letní teploty v přímořských oblastech Kanady dosahují obvykle nižších teplot než ve vnitrozemí, kde mohou maximální teploty přesahovat 30 °C [10]. Klimatické charakteristiky Kanady platí i v případě Ruska, kde ve vnitrozemní panují velmi chladné zimy a teplá léta [11].

3.2 Kultivační systémy

Kultivace sněžných a polárních řas nejčastěji probíhá v laboratorním měřítku v kontrolovaném sterilním prostředí ve vsádkách do objemu maximálně několika litrů. Kultivace v laboratorním měřítku je po technické stránce velmi dobře zvládnutá a přírůstek biomasy řas je vysoký a stabilní. Nevýhodou však jsou relativně vysoké náklady vztažené na malé objemy kultivačního média pro udržení teploty a intenzity osvětlení. Kultivace v laboratorním měřítku je vhodná pro získání dat týkajících se optimálních růstových hodnot

a také pro kultivaci inokula monokultury, které se používá k očkování kultivačního média při startu nové kampaně. Pro kultivaci mikrořas v měřítku větším než laboratorním se využívají otevřené kultivační systémy nebo uzavřené kultivátory, které se nazývají fotobioreaktory.

3.2.1 Otevřené kultivační systémy

Ke kultivaci monokultur sněžných a polárních řas se otevřené systémy nehodí, protože jsou velmi náchylné ke kontaminaci konkurenčními mikroorganismy. Výsledkem takové kultivační kampaně, která je typická pro čištění odpadních vod, je směs řas a mikroorganismů. Riziko kontaminace je možné minimalizovat použitím skleníku nebo kultivací za extrémních podmínek zabraňujících růstu konkurenčních mikroorganismů. Podmínky ale musejí být vhodné pro růst daného extremofilního kmenu. Příkladem extremofilního pěstování řas je kultivace řasy *Spirulina* v otevřených traťových systémech v zásaditém prostředí s pH mezi 9,5 a 10,5 [12], kde díky vysoké zásaditosti kultivačního média nehrozí kontaminace konkurenčními mikroorganismy.

Dalším problémem otevřených systémů je obtížná regulace a optimalizace provozních parametrů spojená s vysokým objemem kultivačního média a velmi vysokých nároků na plochu. Teplota kultivačního média je ovlivněna pouze venkovními podmínkami, pokud se regulace požaduje, lze použít skleník s vhodně řešenou vzduchotechnikou, která dovoluje regulovat teplotu. Regulace teploty je možné dosáhnout například využitím tepelného výměníku na odpadní teplo. Tím by se zvýšila výnosnost kultivace, ale i provozní a investiční náklady. V praxi se tato metoda regulace teploty pro otevřené systémy zatím nepoužívá.

Pro snížení intenzity osvětlení se mohou použít stínící sítě nebo opět skleník se stíněním. Naopak pro její zvýšení se používají LED zářivky, sodíkové výbojky, optické kabely nebo obdobné zdroje světla. Důležité je také dostatečné promíchávání kultivačního média, aby řasy byly ve vzestupu a nedocházelo k vytváření mrtvých zón, kde řasy sedimentují, umírají a rozkládají se kvůli nedostatku slunečního záření, živin a CO₂. Správné míchání vede k vytvoření dostatečně intenzivní distribuce CO₂ a živin, které řasy potřebují pro růst, a také k vytváření fotoperiody, kdy je buňka kultivovaného kmene cyklicky vystavena slunečnímu záření. Optimálního míchání lze dosáhnout volbou a uspořádáním vhodných mechanických, hydraulických a pneumatických míchacích zařízení, ale i správně koncipovaným typem, tvarem a rozměrem kultivačního zařízení.

Otevřené systémy stále čelí problémům s vysokým odparem, zejména v suchých a teplých oblastech. Kyselost kultivačního média je obvykle indikátorem množství rozpuštěného CO₂ v médiu. Z měření pH lze hodnotit stav kultivace, protože řasy postupně spotřebovávají CO₂ pro svůj růst. Existují i specializované typy mikrořas, které prosperují v kyselém nebo zásaditém prostředí, a pro jejich růst je potřeba přidat kyselé nebo zásadité látky do kultivačního média.

Optimalizace všech těchto provozních parametrů představuje náročný úkol, zejména pro vysoké objemy, a pokud není k dispozici skleník, je použití otevřených systémů vhodné pouze pro specifické druhy řas, které nejsou náchylné ke kontaminaci. Další nevýhodou otevřených systémů je nízká finální hmotnostní koncentrace mikrořas v kultivačním médiu a pomalý růst, který dosahuje nižších desítek gramů biomasy na metr čtvereční za den. Typicky se dosahuje průměrných hodnot kolem 0,25 g sušiny na litr kultivačního média, nebo v lepších případech hodnot mezi 0,6 až 1 g sušiny na litr kultivačního média.

Tyto nízké koncentrace mikrořas v kultivačním médiu zvyšují náklady na jejich zakoncentrování pomocí odstředivky a následného dosušení. Proces usazování se také používá k zakoncentrování kultivačního média, ale je nezbytné přidat vhodný flokulant do suspenze řas a vody, jinak je doba usazování velmi dlouhá [13].

Otevřený tenkovrstvý fotobioreaktor s objemem 150 l umístěný ve skleníku s kontrolovaným prostředím v Botanickém ústavu AVČR v Třeboni je osvědčeným zařízením pro kultivaci polárních i sněžných řas. Tenkovrstvý kultivační systém dosahuje vysoké intenzity míchání kultivačního média bez vzniku mrtvých zón a využívá krátkou optickou dráhu světla skrz tenkou vrstvu kultivačního média. Díky tomu kultivace v tenkovrstvých systémech dosahuje velmi vysoké hustoty kultivačního média, která může být i 40 až 50 g l⁻¹ v podobě tenké, husté, souvislé vrstvy monokultury.

Největším nedostatkem těchto systémů je náchylnost ke kontaminaci a ztrátě odparem, zejména v situacích, kdy není k dispozici skleník. Kontaminace může nastat i při vysoké hustotě monokultury kvůli otevřené zádržné nádrži, do které se médium přelévá z nakloněné roviny. Po určité době je médium ze zádržné nádrže čerpadlem přepravováno do vrchní nádrže s přelivem, který ústí do nejvyšší části nakloněné plošiny sloužící jako distributor kultivačního média [14].

3.2.2 Uzavřené systémy

Fotobioreaktory jsou uzavřené kultivační systémy, které se vyznačují velkým objemem kultivačního média na jednotku zastavěné a osvětlené plochy, nízkým rizikem kontaminace kultivace, vynikajícími regulačními vlastnostmi, vysokým využitím osvětlené plochy, intenzivní výměnou plynů, dobře fungujícím mícháním a minimálními ztrátami kultivačního média odparem. Díky jejich účinné regulaci je možné pro jednotlivé kmeny mikrořas připravit optimální podmínky pro rychlý a stabilní růst, což umožňuje opakovatelnou a stabilní kultivaci po celý rok. Fotobioreaktory jsou tak zejména vhodné pro kultivaci řas, které jsou náchylné na kontaminaci nebo vyžadují specifické podmínky, které nelze dosáhnout v otevřených systémech.

Doba sklizně mikrořas ve fotobioreaktorech se pohybuje mezi 2 až 4 týdny v závislosti na růstových vlastnostech daného kmene, dosažení optimálních podmínek kultivace a požadované koncentrace biomasy. Tyto hodnoty mohou být až třicetkrát vyšší než u otevřených systémů traťového, nemíchaného a kruhového typu. Během kultivace vzniká O_2 jako vedlejší produkt fotosyntézy a s rostoucí koncentrací O_2 v kultivačním médiu dochází k inhibici růstu řas. Proto jsou fotobioreaktory vybaveny systémy pro odvod kyslíku.

Největší nevýhodou fotobioreaktorů je technologická složitost vůči otevřeným systémům, proto jsou náklady pro pořízení a výstavbu fotobioreaktorů vztažené na m^2 zastavěné plochy mnohonásobně vyšší než pro otevřené systémy. Také provozní náklady fotobioreaktorů jsou vysoké [15].

Fotobioreaktory se rozdělují podle typu kultivační komory. Nejčastěji se používají fotobioreaktory deskového a trubkového typu v různých modifikacích zaměřujících se na optimalizaci provozních parametrů danou konkrétním kmenem řas. Také se hojně kultivuje ve válcových a vakových fotobioreaktorech. Existují koncepce fotobioreaktorů s tenkou vrstvou kultivačního filmu a také hybridní systémy, které spojují charakteristiky otevřených a uzavřených systémů. Pro stavbu fotobioreaktorů se používají ocelové, transparentní skleněné nebo umělohmotné materiály.

Trubkové fotobioreaktory

Trubkové fotobioreaktory jsou charakteristické použitím transparentních trubek o malém průměru od 20 do 150 mm. Omezení průměru trubek je dáno prostupem světelného

záření kultivačním médiem, kdy optická dráha světla není schopna prosvítit kultivační médium v plné intenzitě zejména uprostřed trubek. V případě vertikálně orientovaných trubek viz obrázek 1 proudí kultivační médium skrz potrubní svazek, který může být propojen paralelně pomocí manifoldu nebo sériově (serpentinová smyčka), kdy se délka jedné trubky může pohybovat až kolem stovek metrů. Světelné záření osvětluje skrz průhledné potrubí kultivační médium, ve kterém probíhají fotosyntetické procesy.

Potrubí je uspořádáno do vertikálně orientovaných řad připomínající plot, které tvoří vodorovná nebo lehce nakloněná patra, kde každé patro je tvořeno několika trubkami spojenými přírubami. Celková výška pater se obvykle pohybuje do několika metrů. Jednotlivá potrubní patra jsou spojena pomocí kolen a přírub s těsněním, které připomínají serpenty. Trubky ve vertikálním uspořádání pater zajišťují vysoký poměr osvětlené plochy fotobioreaktoru i objem kultivovaného média vztahený k zastavěné ploše. To vede k vysoké produktivitě a kompaktnosti zařízení. Vlivem vysoké kompaktnosti dochází k vzájemnému stínění, proto je třeba volit vhodné rozteče mezi potrubními patry i mezi jednotlivými řadami a stínění omezit.

V případě horizontálně orientovaných trubkových fotobioreaktorů se jednotlivé trubky nacházejí v několika řadách obvykle v jediné vodorovné rovině, ale existují i víceúrovňové systémy. Potrubí může být spojeno podobně jako u vertikálního typu sériově nebo paralelně, ovšem zvýšená délka trubek může negativně ovlivnit růst řas z důvodu nedostatečného odplynění O_2 a špatné regulace teploty [15], [16]. To platí i pro vertikální systémy. Ukázka horizontálního fotobioreaktoru je na obrázku 2.



Obrázek 1 Vertikální trubkový fotobioreaktor [16]



Obrázek 2 Horizontální trubkový fotobioreaktor [16]

Pro horizontálně i vertikálně orientované trubkové fotobioreaktory je typické použití zádržných nádrží. Uvnitř zadržovací nádrže dochází k přívodu živin ve formě vodných roztoků bohatých na dusík a fosfor, a také k odvodu O_2 odplyněním, který se také odvádí pomocí odvzdušňovacího systému v trubkové části, kde probíhá fotosyntéza. Odvzdušňovací systém je často tvořen probublávaným svislým válcem.

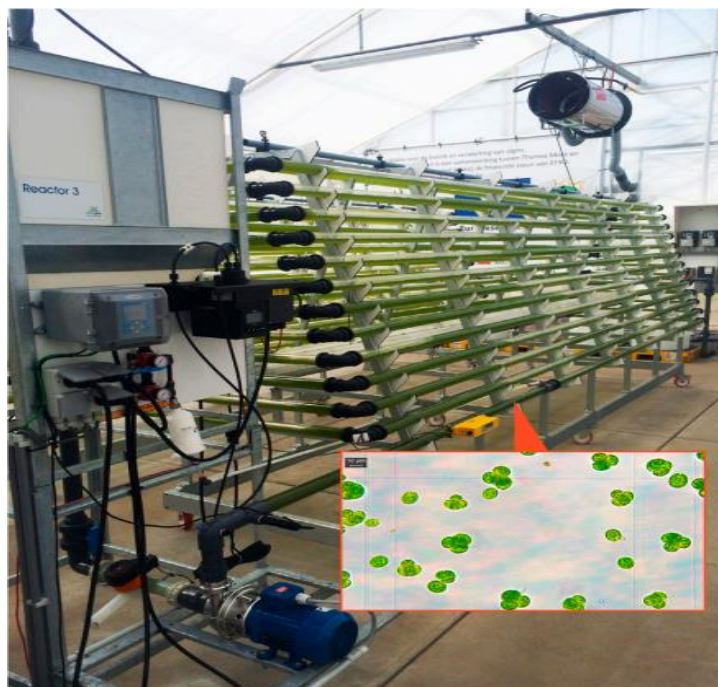
Součástí zádržné nádrže jsou také měřicí sondy, vypouštěcí a napouštěcí ventil. Zadržovací nádrž lze vybavit systémem pro ohřev nebo chlazení kultivačního média. Ze zadržovací nádrže médium proudí do osvětlené trubkové části pomocí čerpadla nebo pneumatickým způsobem typu air-lift. Rychlosti proudění kultivačního média jsou obvykle v rozmezí $0,3$ až $0,6 \text{ m s}^{-1}$. Někdy se volí i vyšší rychlosti k zamezení tvorby biofoulingu. Zvyšující se rychlost proudění má však za následek vyšší provozní náklady. Přívod CO_2 je obvykle umístěn těsně před vstupem do fotosyntetické části fotobioreaktoru.

Úspěšnou kultivaci psychrotropního kmenu sněžné řasy *Chloromonas typhlos* bohaté na antioxidant astaxanthin zvládli v pilotním měřítku Schoeters a kol. (2022). Ve vertikálním trubkovém fotobioreaktoru, který je součástí projektu Evropské unie Sunbuilt o objemu 350 litrů umístěném ve skleníku v belgickém městě Gaal, se v sedmi po sobě jdoucích devítidenních kultivacích zkoumal vliv slunečního osvětlení a venkovních teplot během zimního a jarního období roku na růst řas.

Zjištění Schoeterse a kol. naznačuje, že kmen *Chloromonas typhlos* lze úspěšně kultivovat i za nízkých teplot kolem $10 \text{ }^\circ\text{C}$ bez nutnosti finančně nákladného zahřívání kultivačního média. Tím se tento kmen stává vhodným pro kultivaci v chladném podnebí nebo během chladnějších období roku, kdy je obtížné kultivovat mezofilní a termofilní kmeny.

Zajímavé je, že během kultivace kmen *Chloromonas typhlos* nevykazoval produkci astaxanthinu, který je jinak zodpovědný za červené zbarvení.

Další výzkum Schoeterse a kol. je zaměřen na optimalizaci růstu nalezením optimální doby a intenzity osvětlení denního a nočního režimu [17]. Nadále se výzkum Schoeterse a kol. zaměřuje na optimalizaci růstu řas prostřednictvím nalezení optimální doby a intenzity osvětlení během denního a nočního režimu [17]. Trubkový fotobioreaktor s trojúhelníkovým vertikálním uspořádáním trubek, použitý pro kultivaci, je zobrazen na obrázku 3.



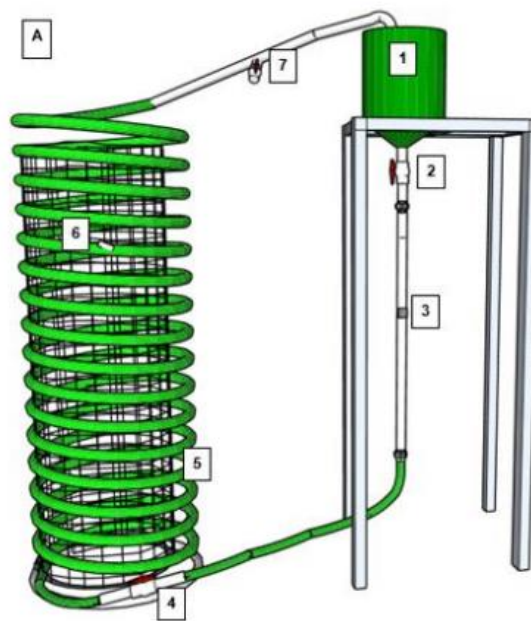
Obrázek 3 Trubkový vertikální fotobioreaktor s trojúhelníkovým uspořádáním [17]

Většina konvenčních trubkových fotobioreaktorů je typická použitím rovných trubek, existují však zařízení, které pracují s flexibilními transparentními trubkami či hadicemi z umělohmotného materiálu. Prostup světla těmito materiály je menší než u borosilikátového skla, ale výhodou je možnost tvarování potrubních celků do komplexních tvarů. Jedním z takovýchto zařízení jsou spirálové fotobioreaktory běžně označované v anglické literatuře jako systémy bio-coil, které svým tvarem připomínají svisle vinutou cívku.

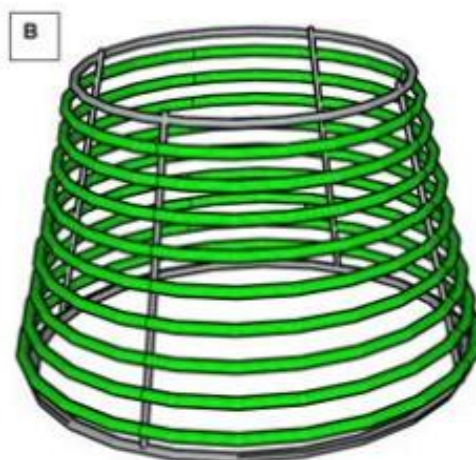
Výška i průměr pilotních zařízení se pohybuje v rozmezí několika metrů. Objem kultivačního média v pilotních spirálových fotobioreaktorech je od 100 do 1000 litrů. Spirálově vinuté trubice mají průměr mezi 3 až 6 cm. Trubice jsou navinuté na jednoduchou obvykle válcovou centrální nosnou konstrukci z kovového materiálu [18]. Stoupání trubice je pevně

dané. V případě, kdy má potrubí tvar spirály vinuté na kužel a průměr šroubovice se mění, se jedná o kónické spirálové fotobioreaktory [19].

Typický příklad spirálově vinutého fotobioreaktor nachází na obrázku 4. Tento fotobioreaktor se skládá ze zadržné nádrže (1), uzavíracího kohoutu (2), průtokoměru (3), uzavíracího ventilu s přívodem dávkování CO₂ (4), spirálově vinutého potrubí (5), pneumatického dopravního prvku typu air-lift (6) a vzorkovacího kohoutu (7). Kónický vinutý spirálový fotobioreaktor se skládá ze stejných prvků, pouze část (5) je nahrazena kónickou spirálou zobrazenou na obrázku 5.



Obrázek 4 Spirálově vinutý fotobioreaktor [19]



Obrázek 5 Fotobioreaktor s kónicky vinutou spirálou [19]

Válcové fotobioreaktory

Válcové kultivační systémy jsou specifické mícháním výhradně pomocí stlačeného vzduchu. Kultivační komora je tvořena svisle orientovanou transparentní trubkou, jejíž průměr závisí na objemu kultivačního média a na délce použité trubky. Pro efektivní kultivaci s velmi dobrým využitím přirozeného světla se preferují trubky o délce do několika metrů a malém vnitřním průměru do zhruba 10 cm, existují ale i varianty s průměry do 50 cm. Při vyšších průměrech zhruba nad 15 cm již dochází k neúplnému prosvícení média zejména uprostřed válce. Tento problém lze odstranit vložením vnitřního vodotěsného válce do středu vnějšího, tímto ale zároveň klesne objem kultivačního média a také mohou nastat problémy s promícháváním média nebo netěsnostmi. Použití vnitřního válce umožňuje použití umělého osvětlení nebo systému regulace tepla, a tak se může dodatečně zvýšit výtěžek kultivace [15].

Problém těchto zařízení tkví především v usazování mikrořas v dolní části válce, kde se nachází i přívod stlačeného vzduchu. Pro zamezení usazování jsou válce ve spodní části zúženy nebo lze využít promíchávání typu air-lift, kdy je do válcového fotobioreaktoru o vyšším průměru umístěna trubka, ve které intenzivně cirkuluje kultivační médium prouděním stlačeného vzduchu, který unáší kultivační médium z vnějšku trubky vzhůru. Problémy s usazování řas nastávají zejména na stěně válce, kde řasy tvoří biofilm, který lze jen velmi špatně omezit málo intenzivním prouděním kultivačního média. Další nevýhodou je špatné využití světla v oblastech, kde je slunce vysoko nad obzorem a svítí na válec pod vysokým úhlem.

Otočné deskové fotobioreaktory

Aby se maximalizovala výtěžnost kultivace během kampaně, je vhodné kultivovat za optimálních podmínek. Pro maximální růst jednotlivých kmenů řas existuje optimální intenzita slunečního záření. Se zvyšujícím se množstvím dopadajících fotonů se proces fotosyntézy řas zrychluje, ale při nadměrné intenzitě slunečního záření dochází k dosažení saturačního bodu (bod světelného nasycení), a tím nastává nasycení systému. Pokud se dále zvyšuje intenzita záření, který systém pohlcuje, dochází k poklesu rychlosti fotosyntézy. Tento nežádoucí děj omezující maximální výtěžnost kultivace se nazývá fotoinhibice.

Pokud je intenzita záření příliš vysoká, může dojít i k permanentnímu poškození kultivovaných řas. Řasy se před slunečním zářením chrání obranným mechanismem

fotoprotekcí, která pomáhá zamezit poškození fotosyntetického aparátu produkcí barviv a proteinů. Proces fotoprotekce disipuje nahromaděnou energii ze záření v buňkách v teplo, tím se zamezí vzniku volných radikálů, které poškozují buněčnou strukturu. Fotoinhibice je jedním z nejméně limitujících faktorů kultivace, a proto je vhodné jí předcházet regulací v podobě odklonění ozařované plochy od slunce nebo jejím zastíněním [20].

Otočné deskové fotobioreaktory sledující slunce jsou novou experimentální technologií kultivace řas, která vychází z ověřených konceptů maximalizace výkonu fotovoltaických elektráren. Tyto technologie se v anglické literatuře označují jako solar-tracker nebo sun-tracker. Účel těchto technologií spočívá v maximálním využití sluneční energie, kterou řasy potřebují k fotosyntéze nebo v případě fotovoltaiky k výrobě elektřiny.

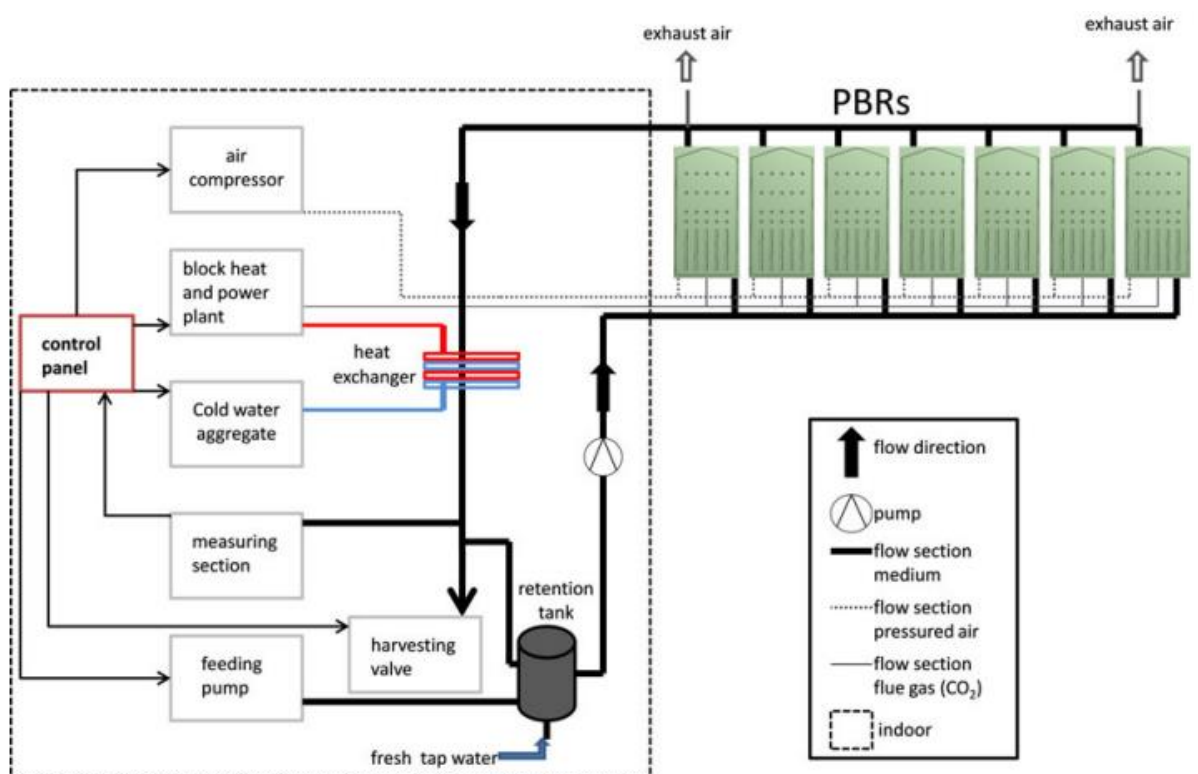
Pro kultivaci řas je však nutné brát v úvahu, že příliš vysoká intenzita slunečního záření dopadajícího na kultivační médium bude mít efekt fotoinhibice, také může dojít k příliš vysokému nárůstu teploty kultivačního média. V obou případech je kultivace neefektivní [20].

Otočné systémy sledující horizontální pohyb slunce s pevným vertikálním natočením jsou efektivní v oblastech vysoké zeměpisné šířky, kde se slunce pohybuje nízko nad obzorem. Pro oblasti nízké zeměpisné šířky se používá pouze vertikální natáčení deskových fotobioreaktorů. Literatura ani průmyslové patenty neuvádí žádný příklad vertikálního nebo horizontálního otočného systému určeného pro nízké zeměpisné šířky, ale pouze zařízení s fixním natočením. To je nejspíše dáno tím, že v těchto oblastech je příliš vysoká intenzita slunečního záření a jeho dalším zvyšováním hrozí usmrcení mikrořas. Proto je naopak nutné kultivační médium před slunečním zářením i vysokou chránit.

Deskový fotobioreaktor typu solar-tracker

Otočný venkovní deskový fotobioreaktor sledující slunce navrhl Hindersin a kol. (2013). Fotobioreaktor je umístěn v severním Německu a pro provoz využívá CO₂ ze spalin elektrárny. Zařízení se skládá ze dvou věží s nosnou konstrukcí. Na každou věž lze umístit až 7 deskových fotobioreaktorů o objemu 30 až 45 litrů s optickou dráhou od 15 do 22 mm, která je úměrná tloušťce deskové nádoby fotobioreaktoru. Plocha jednoho deskového fotobioreaktoru je 2 m² a celkový maximální objem kultivačního média na jedné věži je 240 litrů.

Provoz fotobioreaktoru, jehož blokové schéma se nachází na obrázku 6, probíhá v kontinuálním režimu, takže je možné pomocí externího oběhu se vzorkovacím kohoutem odebírat kultivační médium. Součástí externího oběhu je systém měření nutrientů, teploty, rozpuštěného O₂ a turbidity proměřující intenzitu světla procházejícího zakaleným vzorkem. Dále se externí fotobioreaktorový systém skládá ze zádržné nádrže, čerpadla, tepelného výměníku a kompresoru periodicky dopravujícího vzduch do fotobioreaktorů přes ventily s frekvencí 4 Hz, tak aby řasy byly vystaveny intenzivnímu světlu jen po krátkou dobu a také aby nesedimentovaly. Řídící systém fotobioreaktoru dokáže pomocí vstupu z měřících sond automaticky upravovat přísun živin, které se přivádí do zádržné nádrže. Teplotu kultivačního média lze regulovat pomocí tepelného výměníku, který může teplotu zvýšit i snížit. Přes kontrolní panel se ovládá vzduchový kompresor a vypouštěcí kohout. Přívod CO₂ je realizován porézni hadicí s rozměry póru 0,5 μm nacházející se na dně deskového fotobioreaktoru [21].



Obrázek 6 Blokové schéma deskového fotobioreaktoru sledující slunce [21]

Design tohoto zařízení, které je k vidění na obrázku 7, umožňuje sledování slunce. Fotobioreaktor je založený na použití dvojosého rotačního natáčení věže s nosnou konstrukcí. K natáčení desek fotobioreaktoru ve vertikálním směru slouží elektrický lineární aktuátor a horizontální rotaci desek zajišťuje elektromotor, který pomocí šnekové převodovky otáčí svislou hřídelí s nosnou konstrukcí, na které jsou desky s kultivačním médiem umístěny.

Otáčení fotobioreaktoru je nastaveno buď do režimu maximalizace intenzity slunečního záření nebo do režimu „Offset“ odchylný povrch desky fotobioreaktoru s kultivačním médiem z kolmému směru dopadajícího záření, který je použit v případě, že se kultivační médium přehřívá, a také pokud hrozí fotoinhibice mikrořas.

Otočný systém neumožňuje kompletní otočení věže v rozmezí 360°. Toto technické omezení není pro sledování slunce v oblastech centrální a severní Evropy limitující, ale při provozu za polárním kruhem by docházelo jen k omezenému sledování slunce. Tím se sníží intenzita dopadajícího slunečního záření [21].



Obrázek 7 Deskový fotobioreaktor sledující slunce [21]

Dalším příkladem kultivace polární sněžné řasy ve 20litrovém pilotním měřítku je kultivace polární půdní řasy *Bracteacoccus polaris* BSC 18-11b a sněžné řasy *Micractinium simplicissimum* A2-1 vyizolovaných z oblasti Svalbardu. Cílem této kultivace bylo otestovat fotobioreaktor za extrémních podmínek a zjistit, zda je možné kultivovat polární kmen *Bracteacoccus polaris* BSC 18-11b a sněžnou polární řasu *Micractinium simplicissimum* A2-1 v pilotním měřítku. Během kultivace se sledovaly růstové křivky, teplota média a okolí a také intenzita osvětlení.

Tento experimentální otočný deskový fotobioreaktor, který je na obrázku 8, je zvláštní tím, že je designován do extrémních klimatických podmínek přímořských severovýchodních a

polárních oblastí a maximalizuje intenzitu dopadajícího slunečního záření systémem sledující polohu slunce během 24hodinového polárního dne. Tímto způsobem se dosahuje maximální rychlosti fotosyntetických procesů mikrořas. Fotobioreaktor je vybavený teplotní a fluorescenční sondou pro měření kultivačních dat, ze kterých se vyhodnocuje úspěšnost kultivace. Systém sledující slunce se skládá z pohonného mechanismu a řídicího softwaru s PLC a nezbytnou elektronikou.

Pohonný mechanismus obsahuje krokový elektromotor ESS 59-3 s vysokým stupněm krytí IP 67 spolehlivě chránící před prachem a vlhkostí, hřídelovou spojku spojující hřídel motoru s hřídelí otočné desky a krycí pouzdro, které zároveň upevňuje motor k základnímu rámu. Míchání kultivačního média je dosaženo použitím perforované hadice umístěné na dně nádoby, skrz kterou proudí do kultivační komory směs CO_2 a vzduchu. CO_2 je do vzduchovací trasy dodáváno z tlakové lahve s redukčním ventilem a vzduch je do systému dopravován kompresorem [22].



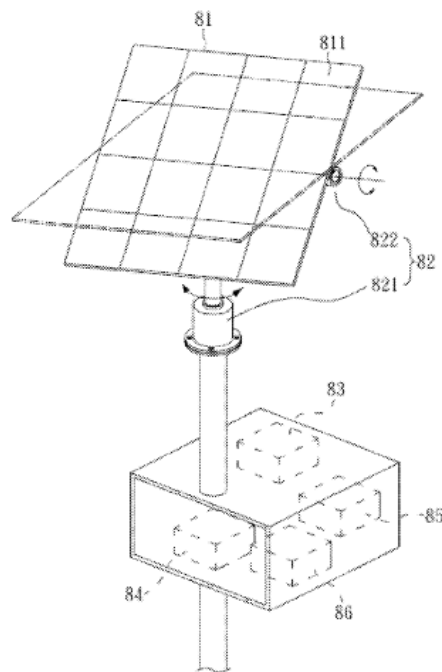
Obrázek 8 Experimentální deskový otočný fotobioreaktor [22]

Další koncepce otočných mechanismů vhodných pro konstrukci fotobioreaktorů pocházejí hlavně z oblasti intenzifikace výroby elektřiny pomocí fotovoltaických panelů, které lze jednoduše nahradit za deskové fotobioreaktory, jak to ukázal Hindersin a kol. (2013). Je

tedy vhodné se dále zaměřit na obdobné konstrukce a zjistit, zda by některý ze systémů mohl být použit pro intenzifikaci kultivace mikrořas za severním polárním kruhem.

Otočné věžové systémy sledující slunce

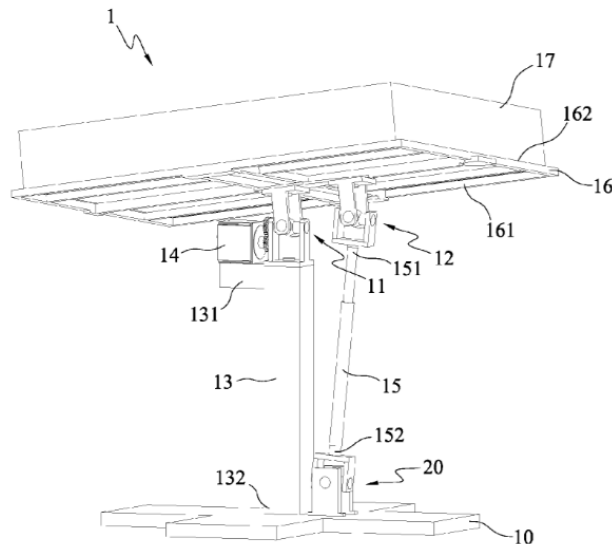
Věžový systém sledující slunce pocházející z Tchaj-wanu pod patentovým označením US2012193512A1 se vyznačuje podobnou konstrukcí jako věžový systém od Hindersina a kol. (2013). Otočný systém dokáže sledovat pohyb slunce jak ve vertikálním, tak v horizontálním směru pomocí matematické funkce určené k predikci polohy slunce bez nutnosti optických senzorů. Zařízení nacházející se na obrázku 9 se skládá z vertikálního otočného pohonu s označením 822, horizontálního pohonu 821, z fotovoltaického panelu 81 a systému řízení pohonu 83 až 86. Patent popisuje zejména proces řízení pohonu a nalezení polohy slunce. Výběrem konkrétního typu otočného pohonu se patent nezabývá[23].



Obrázek 9 Věžový systém sledující slunce US2012193512A1 [23]

Tchaj-wanský věžový systém pod patentovým označením US2015128930A1 je specifický použitím lineárního aktuátoru, konvenčního elektromotoru a třech křížových kloubů. Toto zařízení, které je na obrázku 9, sleduje vertikální pohyb slunce pomocí elektrického lineárního aktuátoru (15) spojeného se dvěma křížovými klouby (20,12). Elektrický motor (14) pomocí dvou ozubených kol otáčí křížovým kloubem (11). Křížový kloub zajišťuje pohyb v horizontálním směru. Klouby (11,20) jsou připevněné k základně. Hlavní

výhodou tohoto systému je využití dvou stabilních vzpěr, které stabilizují konstrukci vůči poryvům větru a zároveň umožňují sledování slunce v širokém rozmezí úhlů natočení. Zařízení je navíc prezentováno jako cenově dostupné a spolehlivé ve srovnání s podobnými technologiemi [24].



Obrázek 10 Zařízení sledující slunce US2015128930A1 [24]

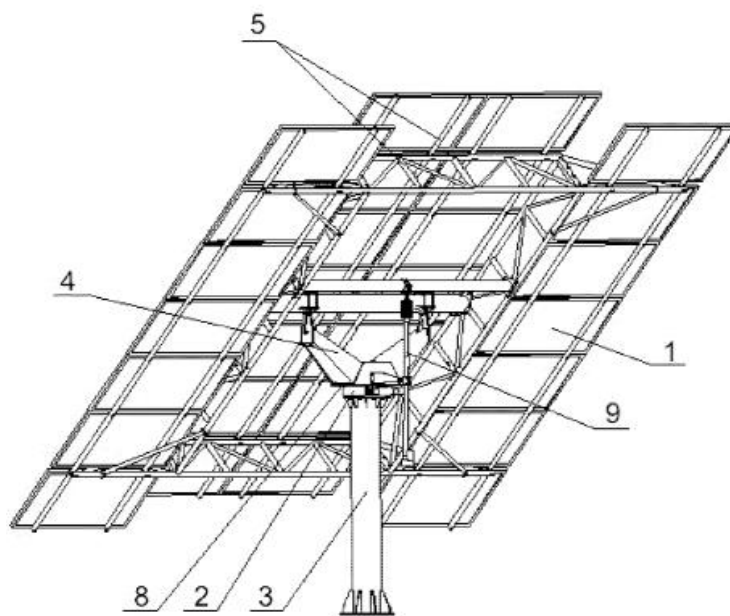
Čínský patent od firmy Chengdu Zsun Science and Technology Developing CO. dostupný pod patentovým označením US2013133719A1 je podobný věžovému systému od Hindersin a kol (2013). Zařízení, které je na obrázku 11, jehož pohonný systém se nachází na obrázku 12, sleduje vertikální pohyb slunce pomocí elektrického lineárního aktuátoru (9). Vertikální rotaci zajišťuje elektromotor s konstantním točivým momentem (2-4) použitím pohybového šroubu (2-5) otáčející vačkovou hřídelí (2-3) s pomocí šnekového převodu (2-6). Vačková hřídel může být na výstupu z převodové skříně (2) osazena například mechanismem dvou ozubených kol v rovinách na sebe kolmých, ale konkrétní řešení patent neuvádí.

Zvláštnost tohoto patentu spočívá v převodové skříně, která je speciálně navržena pro tlumení silových nárazů přicházejících do pohonu z vrchní konstrukce nesoucí solární panely. Pro tlumení se využívá třecí plát (2-13) a třecí těleso (2-12), které se o sebe třou. To platí v případě, že na hřídel působí vnější síla a zároveň je zapnut kontrolní pohonný mechanismus (2-7, 2-8) otáčející kontrolním šnekovým převodem (2-9), který uvádí do rotace třecí plát.

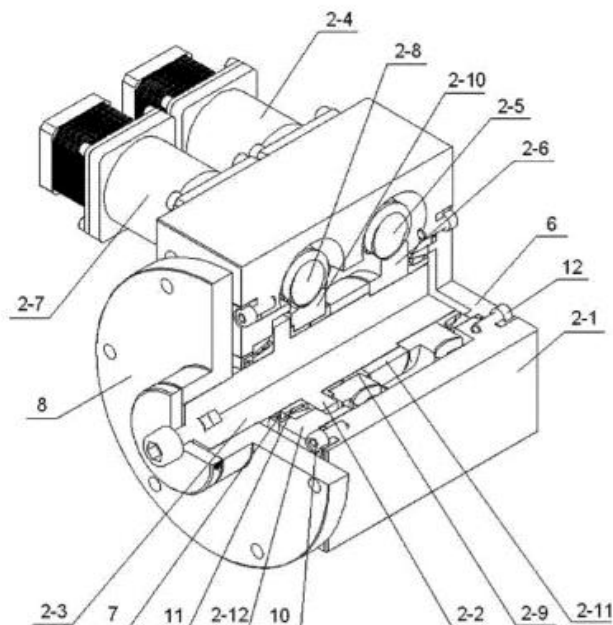
Tlumením vnějších silových rázů je dosaženo delší životnosti pohonného systému, ale jeho technické uspořádání není konvenční a v patentu není dostatečně popsána jeho funkce.

Použitím třecího mechanismu uvnitř převodové skříně se snižuje účinnost pohonného systému, který bude muset překonat další třecí ztráty. Nevýhodou je také nutnost použití dvou pohonných systémů, kdy hnací systém (2-4, 2-5, 2-6) uvádí hřídel do pohybu a po zapnutí kontrolního pohybového systému, který pracuje s 10 % otáčkami hnacího systému, se hnací systém vypne. Otázkou také zůstává přesnost a spolehlivost délky kroku kontrolního systému. Zároveň vyvstává otázka, jak kontrolní pohonný systém může otáčet hřídelí, když je uložen na kluzném pouzdru (2-9) [25].

Celkově se převodová skříň patentu US2013133719A1 jeví složitě, avšak jinak se konstrukce jeví jako velice stabilní a spolehlivé řešení.

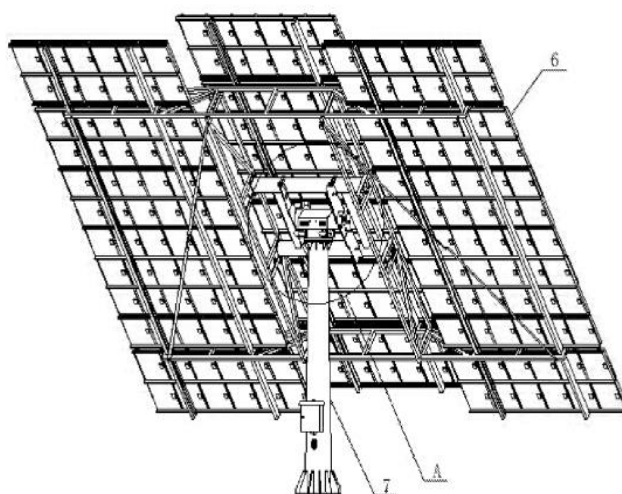


Obrázek 11 Věžový systém sledující slunce US2013133719A1 [25]



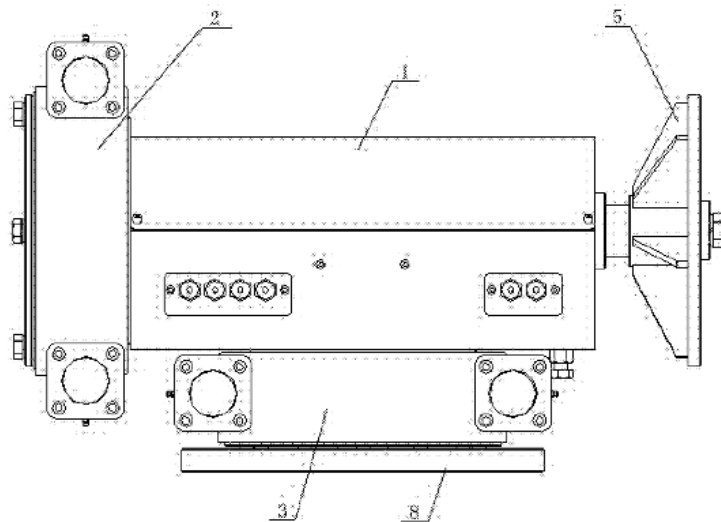
Obrázek 12 Pohonný systém patentu US2013133719A1 [25]

Čínský patent CN204965199U se vyznačuje podobnou věžovou konstrukcí jako předchozí patent. Nákres zařízení je znázorněn na obrázku 13. Nákres zařízení je znázorněn na obrázku 13. Od ostatních věžových konstrukcí podobného typu se odlišuje použitím dvou otočných ložisek s vnějším ozubením, přičemž každé je osazeno pomaloběžným a rychloběžným šnekovým pohonem. Horizontálně orientované otočné ložisko (3) umožňuje rotaci vrchní montážní konstrukce fotovoltaických panelů (6) s instalačním domkem (1) v horizontálním směru. Druhé vertikálně orientované otočné ložisko (2) umožňuje sledování slunce nakláněním montážní konstrukce (6) ve vertikálním směru [26].



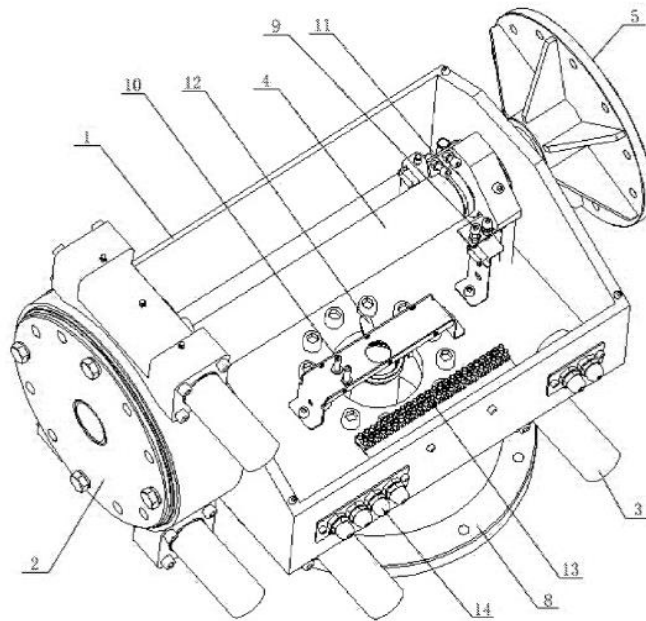
Obrázek 13 Věžový systém sledující slunce CN204965199U [26]

Detailní pohled na systém pohonu pomocí dvou otočných ložisek s vnějším ozubením je znázorněn na obrázku 14, zatímco řez systémem je vidět na obrázku 15. Horizontálně orientované otočné ložisko (3) je pevně připevněno ke kotvící přírubě (8), která je součástí nosné věže (7). Vertikálně orientované otočné ložisko (2) je pevně ukotveno k instalačnímu domku (1).



Obrázek 14 Otočný mechanismus [26]

Vertikálně orientovaná pohonná jednotka rotuje hřídelí (4), která je spojena s montážní konstrukcí pomocí příruby (5). Pro sledování nulové polohy vertikálního natočení se používá senzor určující nulovou polohu vertikálního natočení (9), který detekuje pozici hřídele (4) odpovídající nulovému natočení montážní konstrukce (6). Stejně tak senzor (10) snímá horizontální úhel natočení montážní konstrukce (6). Sensory (11) a (12) snímají aktuální polohu natočení hřídele odpovídající horizontálnímu a vertikálnímu natočení montážní konstrukce (6). Zbytek zařízení tvoří průchodková svorkovnice (13) s vodotěsnou kabelovou spojkou (14).

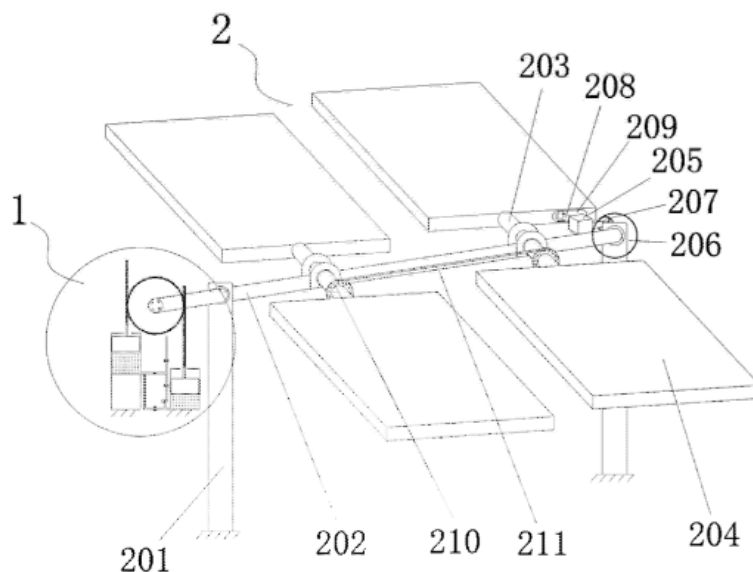


Obrázek 15 Otočný mechanismus v řezu [26]

Zařízení je charakterizováno vysokou stabilitou a přesností natočení díky použití otočných ložisek s vnějším ozubením a dvěma šnekovými pohony. Pohonná jednotka je spolehlivá, kompaktní a odolná a vyniká vysokými točivými momenty na hřídeli a flexibilní možností řízení. Navíc umožňuje neomezené horizontální otáčení montážní konstrukce.

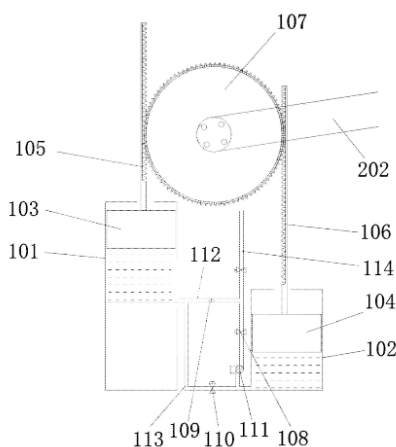
Hydraulicky ovládané systémy sledující slunce

Čínský patent CN103888047A určený pro maximalizaci zisku elektrické energie ze solárních panelů je charakteristický hydraulickým pohonem, který zajišťuje sledování slunce ve dvou osách. Schéma celého zařízení je na obrázku 16. Patent se skládá z Hydraulického pohonu (1) a ze systému sledování slunce (2) [27].



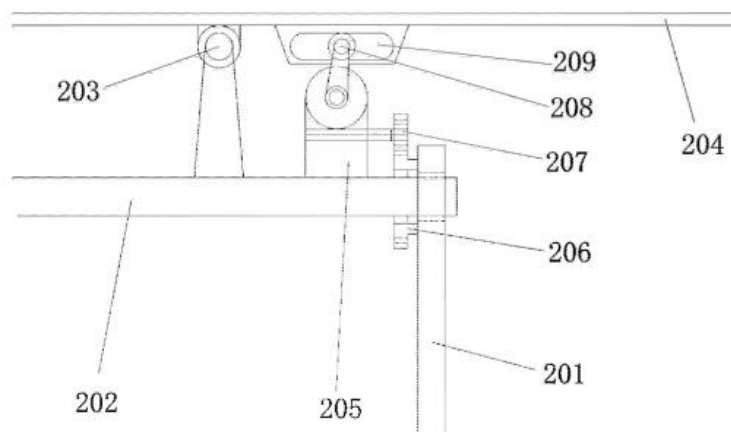
Obrázek 16 Otočné hydraulické zařízení [27]

Hydraulický mechanismu (1), jehož schéma je na obrázku 17, se skládá z vrchní (101) a dolní komory (102) osazené hydraulickými písty (103, 104) s ozubeným hřebenem (105, 106). Zdvih pístů je řízen pomocí čerpadla (111) a několika ventilů, které regulují tok hydraulického média mezi písty skrz potrubí (114, 113). Systém ventilů se skládá ze solenoidového ventilu (110), regulačního ventilu (108) a ventilu se zpětnou klapkou (109). Podrobný popis postupného otevírání a uzavírání ventilů způsobující synchronizovaný pohyb pístů je popsán v patentu. Aby zařízení mohlo sledovat slunce je nutné orientovat hřídel sledující horizontální pohyb slunce (202) ve směru sever-jih. Rotace hřídele sledující horizontální pohyb slunce je způsobena lineárním svislým pohybem dvou ozubených hřebenů otáčejících hnaným ozubeným kolem, kterým je hřídel osazena.



Obrázek 17 Hydraulický mechanismus [27]

Na opačné straně hřídele se nachází systém vertikálního natáčení solárních panelů, jenž je zobrazen na obrázku 18. Tento systém je složen z neúplného ozubeného kola (206), které zabrání přebytečnému vertikálnímu otáčení, tím chrání zařízení před možným poškozením. Neúplné ozubené kolo je v záběru s ozubeným kolem (207) pohánějící šnekové soukolí (205), které pomocí lana otáčí kladku (208) rotující uvnitř drážky (209), tím dochází k vertikálnímu natáčení fotovoltaických panelů. Fotovoltaické panely jsou připojené pomocí hřídele pro vertikální pohyb panelů (203) a ložiskových domků k centrální hřídeli zajišťující horizontální pohyb. Samotná hřídel pro vertikální pohyb panelů dokáže pohybovat dvěma panely najednou a v případě osazení hřídele řemenicí (210) s řemenem (211) nebo obdobným systémem přenášejícím pohyb může být současně v pohybu několik hřídelí pro vertikální pohyb fotovoltaických panelů. Autoři patentu také tvrdí, že zařízení vykazuje dobrou odolnost vůči poryvům větru a silovým impulzům, které se z panelů přenášejí na konstrukci.



Obrázek 18 Systém vertikálního otáčení [27]

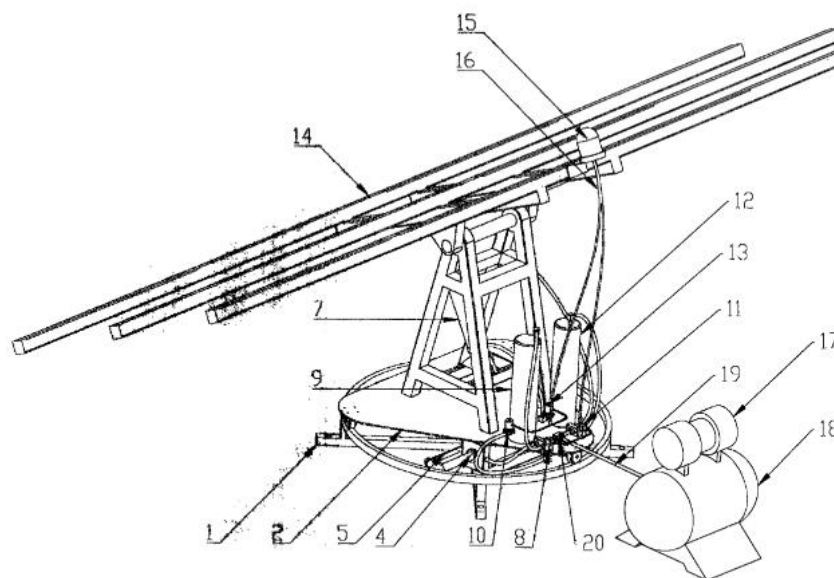
Patent se prezentuje jako cenově výhodné a provozně spolehlivé zařízení, protože potřebuje pouze jeden pohon pro sledování slunce ve dvou osách, který je díky použití hydraulických pístů odolný. Řízení pohybu pístů je řešeno pouze pomocí přednastaveného časovače, který nepotřebuje senzor dodávající aktuální data polohy slunce a po západu slunce se zařízení vrací zpět do původní polohy.

Konstrukce zařízení však neumožňuje sledovat slunce v rozmezí 360° a také vyžaduje značné nároky na plochu z důvodu vzájemného stínění panelů ve stavu, kdy je slunce nízko nad horizontem. Vzhledem k designu zařízení vyvstává otázka, jak spolehlivě dokáže zařízení sledovat slunce v průběhu roku, kdy se mění doba dne i výška slunce nad horizontem. Pokud

by se zařízení regulovalo pouze časovačem a vertikální i horizontální pohyb by byl synchronizován tak by nejspíše docházelo k nepřesnému sledování slunce. Tato situace by se pravděpodobně mohla vyřešit přidáním pohonu přímo ke šnekovému soukolí, ale tím by systém ztratil na unikátnosti využití pouze jednoho pohonného zařízení.

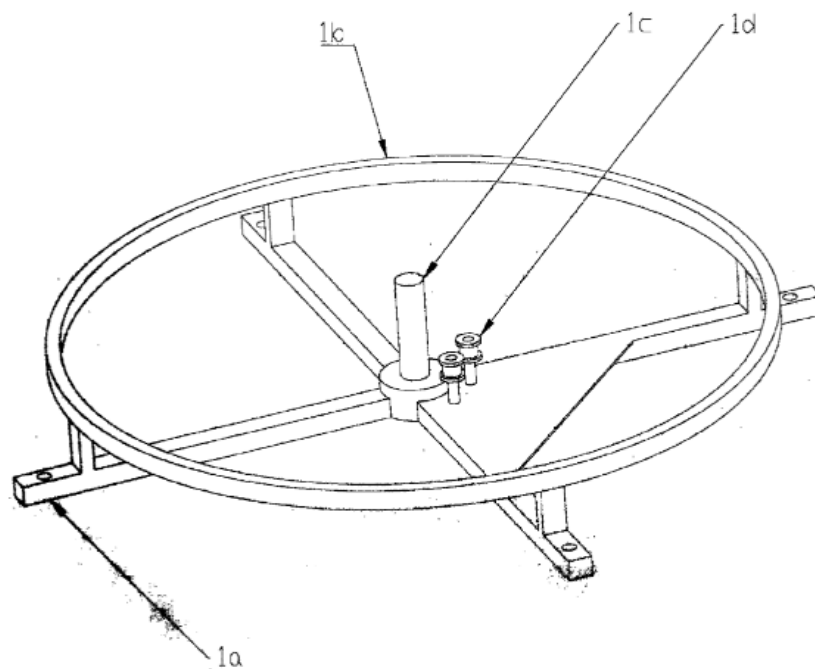
Plošinné systémy sledující slunce

Lehce odlišné řešení dvojosého pneumaticko-hydraulického natáčení se nachází na obrázku 19. Toto plošinné zařízení čínského původu sledující slunce lze nalézt pod patentovým označením CN106873633A. Zařízení se skládá z pevné základny (1), otočné základny (2), lineárního aktuátoru pro horizontální otáčení (4) s teleskopickou hřídelí osazenou řemenem (5), lineárního aktuátoru (7), solenoidového ventilu řídícího horizontální pohyb (8), zásobníku tlakové nádoby horizontálního pohybu (9), elektromagnetického ventilu (10) řídícího horizontální pohyb, elektromagnetického ventilu (11) řídící přísun pneumaticko-hydraulické směsi do zásobníku tlakové nádoby vertikálního pohybu (12), elektromagnetického ventilu (13) řídící pohyb aktuátoru (7) pomocí senzoru sledující slunce (15), montážního rámu (14), kabeláže mezi senzorem a ventily (16), kompresoru (17), vzdušníku s hybridní pneumaticko-hydraulickou náplní (18), trubičky s hybridním médiem (19) a roztržkou hybridního média (20) [28].



Obrázek 19 Hydraulicko-pneumatický otočný systém [28]

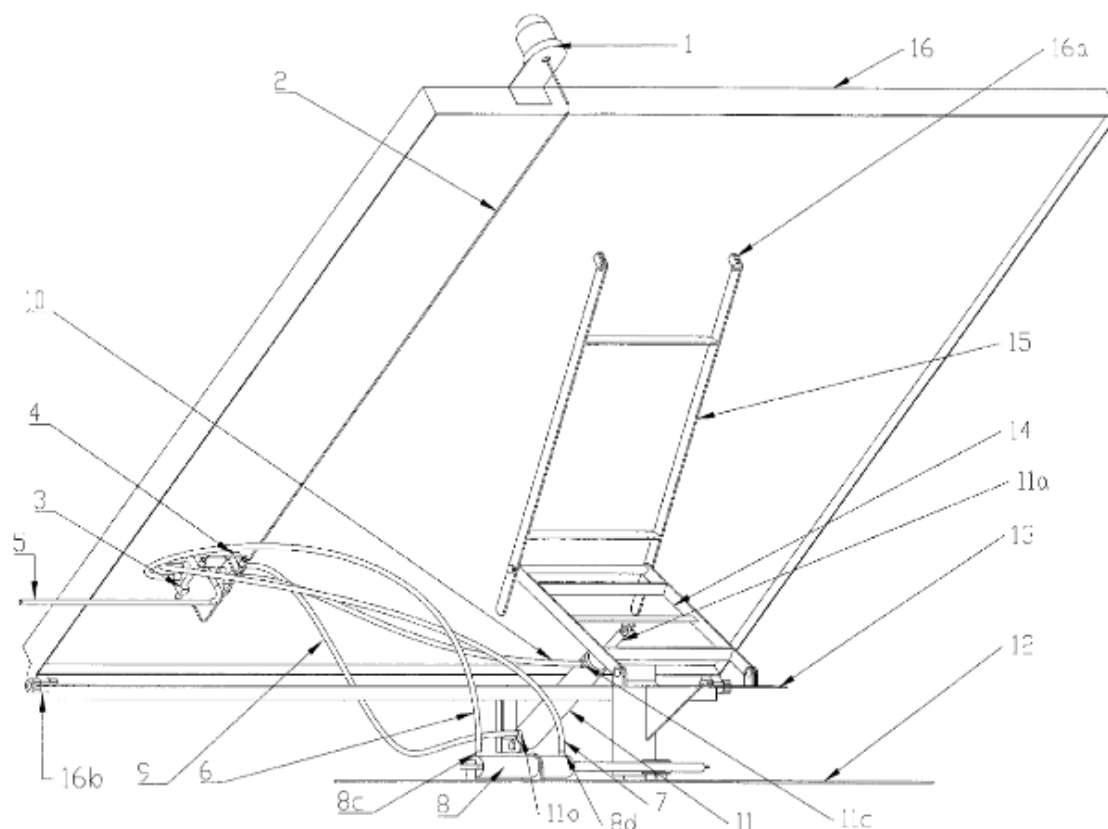
Zařízení je schopno pohybu ve dvou osách. Pro rotační pohyb v horizontálním směru využívá stlačené hybridní médium ze zásobníku (9), které po otevření ventilu (10) lineárně pohybuje hřídelí s řemenem (5) zařízení (4). Řemen je natažený mezi dvěma konci hřídele, hřídelovým pouzdem a dvěma napínacími kladkami (1d), které jsou připevněné k pevné základně. Lineární pohyb řemene otáčí hřídelové pouzdro pevně připevněné k rotačně pohyblivé plošině (2). Hřídelové pouzdro je volně nasazeno na hřídel pevné základny (1c). Schéma pevné základny (1) bez řemenu se nachází na obrázku 20.



Obrázek 20 Pevná základna hydraulicko-pneumatického systému [28]

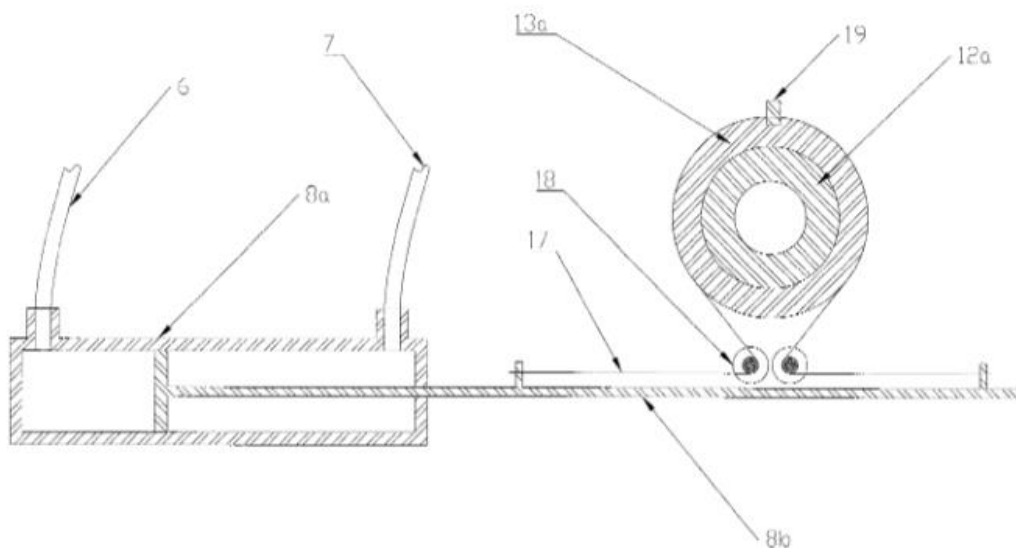
Snadný a silově efektivní pohyb rotační plošiny (2) je umožněný použitím koleček jezdících po kruhové kolejnici pevné plošiny (1). Autoři patentu také tvrdí, že použitím hybridního média se zbaví negativních efektů spojených s použitím pneumatického systému, jako je nízká stabilita polohy zařízení nebo nízká přesnost sledování slunce. Výhodou tohoto řešení je skutečnost, že pro chod zařízení není nutné použít krokový motor a převodový systém, který se jednoduše nahradí kompresorem se zásobníky stlačeného média s ventily. Jedním ze zjevných problémů tohoto patentu je doprava hybridní tekutiny na plošinu, která se otáčí. Tento problém by se mohl řešit vhodně dlouhou přívodní hadicí a omezením úhlu otočení plošiny (2), umístěním čerpadla se vzdušníkem na otočnou konstrukci nebo provlečením hadičky v okolí osy rotace. Výhodou také je, že jeden kompresor se vzdušníkem dokáže pohánět několik zařízení současně.

Čínský patent CN106200687A zobrazený na obrázku 21 je velmi podobný předchozímu patentu CN106873633A. Zařízení pracuje na principu dvou pneumatických lineárních aktuátorů zajišťujících horizontální rotaci plošiny i vertikální naklápění montážní konstrukce [29].



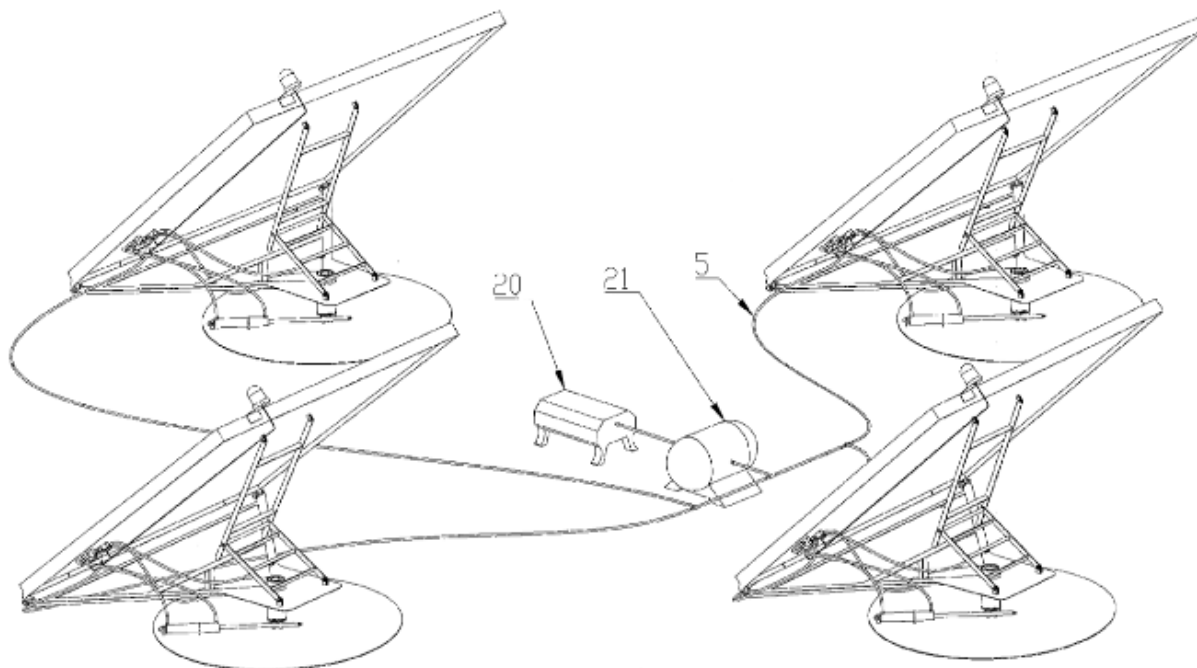
Obrázek 21 Systém se dvěma pneumatickými aktuátory [29]

Vertikální sledování slunce umožňuje pneumatický lineární aktuátor (11) naklápějí montážní plošinu (16). Montážní plošina je pomocí čepů (16a, 16b) připojena k podpůrné konstrukci (15) a otočné základně (13). Lineární pohybový pneumatický mechanismus je zachycen na obrázku 22. Lineární aktuátor (11) je čepy připojený k otočné základně (13) i k pohyblivé podpůrné konstrukci (14,15). Rotace otočné základny (13) v horizontálním směru je realizována lineárním aktuátorem (8) s výsuvnou hřídelí (8b) a řemenem (17). Lineární pohyb řemene (17) uvádí do rotačního pohybu hřídelové pouzdro (18) volně usazené na hřídeli pevné základny (12a) a pevně spojené s otočnou základnou (13). Identický způsob pohonu výsuvnou hřídelí a řemenem využívá i předchozí zařízení CN106873633A.



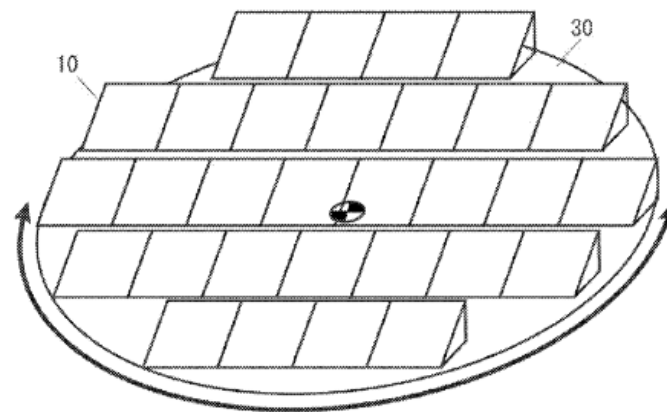
Obrázek 22 Aktuátorový mechanismus [29]

Zařízení je také vybaveno systémem tlakové vzduchotechniky, který se skládá z hadičkových rozvodů tlakového vzduchu (5,6,7,9,10) a solenoidových ventilů pro horizontální (3) a vertikální pohyb (4). Koncepce patentu je zaměřena na připojení více zařízení na jeden zdroj tlakového vzduchu, který obsahuje kompresor (20) se vzdušníkem (21) a rozvody (5). Koncepce rozvodu tlakového vzduchu do několika otočných zařízení je zobrazena na obrázku 23.



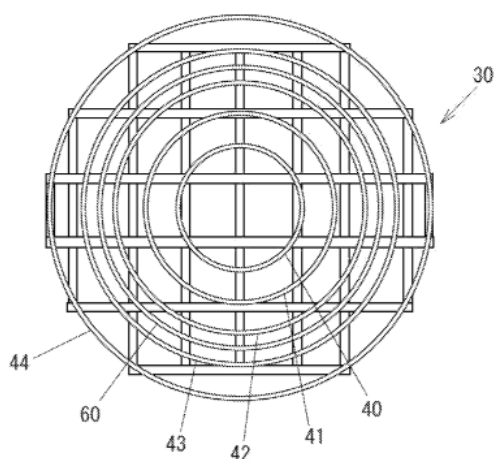
Obrázek 23 Soustava otočných plošin [29]

Japonský patent US2016020725A1 zobrazený na obrázku 24 popisuje zařízení, které se skládá z kruhové plošiny (30) o průměru až 30 metrů s velkým množstvím relativně blízko od sebe vzdálených fotovoltaických panelů (10). Zařízení je schopné rotace v horizontálním směru pomocí pojezdové plošiny s několika kruhovými kolejnicemi, které se pohybují po výškově nastavitelných kolečkách upevněných k podstavě [30].

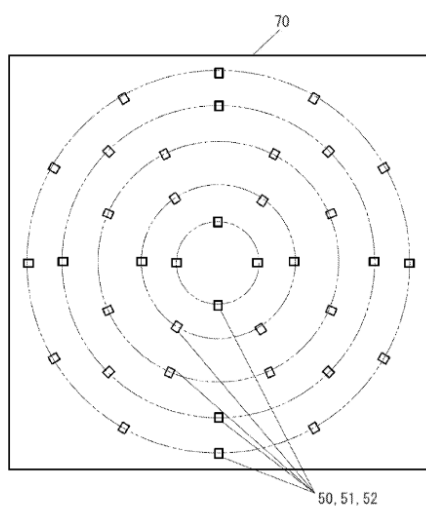


Obrázek 24 Otočná kruhová plošina [30]

Rozteče kolejnic a umístění koleček je uspořádané tak, aby se dosáhlo rovnoměrného rozdělení sil vzniklých zatížením kruhové plošiny do podstavu. Nadměrnému průhybu plošiny je zamezeno její konstrukcí, která je vyrobena z několika desítek ocelových profilů tvořící nosnou konstrukci, na které jsou upevněny plechy kruhové plošiny. Součástí podpůrné konstrukce je také kolejnice. Ukázka vhodného rozložení kolejnic plošiny (40-44, 60) je znázorněna na obrázku zachycující půdorys plošiny při pohledu zdola 25 a rozložení pro kolečka je zobrazeno na obrázku 26. Na obrázku 26 je naznačena poloha kolejnic kruhovou čarou a také čtvercová podstava (70), která tvoří základnu pro umístění pojezdových nosných koleček (50, 51, 52) s nastavitelnou výškou.

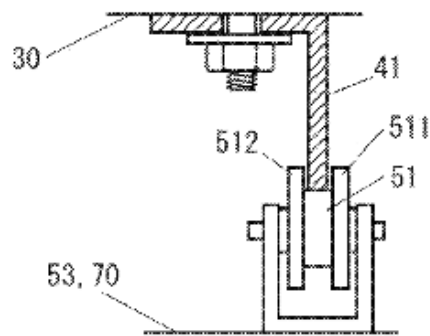


Obrázek 25 Půdorys kolejnice [30]



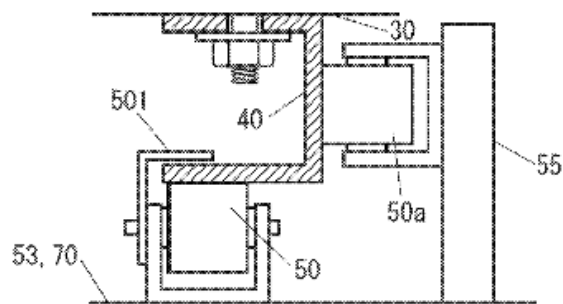
Obrázek 26 Půdorys nosných koleček [30]

Pro správnou funkčnost pojezdu a přenosu zatížení do podstavy je nutné, aby na sebe kolečka a kolejnice těsně doléhaly a nehrozilo případné oddělení kolejnice od kolečka ve svislém i vodorovném směru. Autoři patentu přišli s jednoduchým způsobem těsného upevnění, které je zachyceno na obrázku 27. Kolejnice z L-profilu (41) je upevněná ke kruhové plošině (30) šroubovým spojem. Kolejnice dosedá na nosné pojezdové kolečko (51) do drážky vzniklé osazením čepu kolečka dvěma přírubami (511, 512). Kolečko je pak pevně připojeno k podstavě (70). Toto řešení dokáže přenášet zatížení a zároveň bránit v oddělení kolečka a kolejnice.

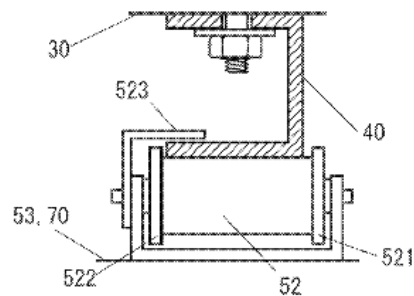


Obrázek 27 Kolejnicové usazení varianty číslo 1 [30]

Autoři patentu uvádějí, že vytvořili několik řešení s profily kolejnice ve tvaru U, které jsou robustnější a mohou být kombinovány pro jedno zařízení. Na obrázcích 28 a 29 jsou příklady těchto řešení, které přenášejí zatížení a zabraňují oddělení kolečka od kolejnice.



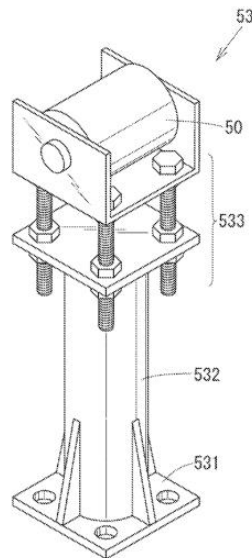
Obrázek 28 Kolejnicové usazení varianty číslo 2 [30]



Obrázek 29 Kolejnicové usazení varianty číslo 3 [30]

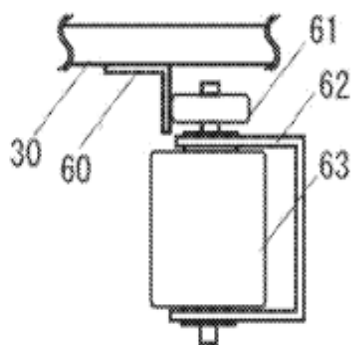
Samotné ukotvení pojzdového kolečka k podstavě může vypadat jako na obrázku 30. Kolečko (50) je pomocí výškově nastavitelného mezikusy (533) zahrnujícího uchycení kolečka,

šrouby, matky a přírubu pro uchycení matek upevněno ke stojně (532), která je přírubou (531) přimontována k podstavě.

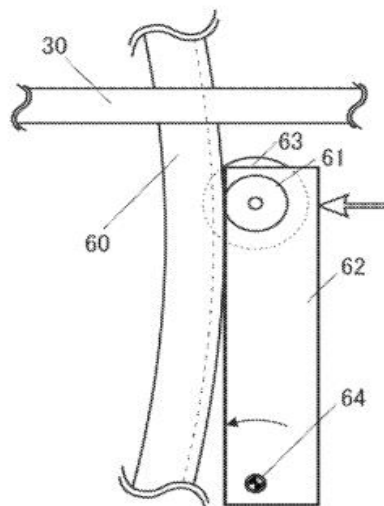


Obrázek 30 Ukotvení pojezdového kolečka k podstavě [30]

Otáčení plošiny (30) je realizováno pomocí elektromotoru (63) pohánějící hnací kolo s pryžovým běhounem (62), které otáčí kolejnicí (60). Hnací kolo (61) musí být v záběru s kolejnicí, proto je nutné vytvořit přídržnou sílu, která bude přitlačovat kolo ke kolejnici, a tím bránit v protáčení hnacího kola. K tomuto účelu je použita přídržné rameno (62) otočné kolem osy rotace (64). Schéma pohonu se nachází na obrázku 31 a schéma přídržného systému je na obrázku 32.



Obrázek 31 Pohon plošiny [30]



Obrázek 32 Přidržený mechanismus [30]

Klíčové parametry pro konstrukci zařízení pro kultivaci polárních řas

Kultivace polárních řas je komplexní proces probíhající několik týdnů. V případě dodržení vhodných podmínek se postupně zvyšuje koncentrace mikrořas v kultivovaném médiu. Tím se také mění i ideální hodnoty procesních parametrů. Obecně je velice složité určit jaký parametr má největší vliv na proces kultivace, protože jednotlivé druhy mikrořas vyžadují rozdílné parametry kultivace. Obecně však platí, že nejdůležitější procesní parametry pro úspěšnou kultivaci jsou následující.

- Intenzita slunečního záření
- Teplota kultivačního média
- Promíchávání média
- Přívod CO₂
- Odvod O₂
- Přívod živin
- pH

Růst řas je přímo závislý na využití slunečního záření, jak je to popsáno v kapitole 4.4.2. Je velmi důležité, aby mikrořasy byly rovnoměrně vystaveny slunečnímu záření o vhodné intenzitě. Toho lze dosáhnout použitím deskového fotobioreaktoru s otočným mechanismem otáčející kultivační komorou tak, aby sluneční záření dopadalo na desku a skrze ni do kultivačního média pod úhlem, který bude korespondovat s optimální intenzitou záření pro

kultivaci daného kmene. Díky tomu mohou řasy intenzifikovat proces fotosyntézy, a tím tak rychle zvýšit svoji biomasu v kultivačním médiu.

Pokud zařízení nemá mechanismus pro regulaci intenzity osvětlení, lze ovlivnit dobu, po kterou jsou buňky vystaveny intenzivnímu světlu, pomocí míchání. Řasy ve vrchní vrstvě, orientované ke slunci, jsou vystaveny světlu jen krátkou dobu, zatímco řasy ve spodních vrstvách jsou chráněny stíněním. Aby vrchní vrstva řas nedošla k poškození, je nutné omezené vystavení slunečnímu záření. Díky vhodně dimenzovanému míchání a geometrii fotobioreaktoru lze účinně střídat vrstvy a zabránit tak inhibici růstu.

Otočný mechanismus je rovněž výhodný při nízké intenzitě osvětlení, protože umožňuje natočit deskovou komoru fotobioreaktoru kolmo na směr dopadajícího slunečního záření. Při použití stacionárních fotobioreaktorů je důležité zvolit vhodný design fotosyntetické části zařízení, aby bylo dosaženo maximálního využití světla a minimalizovalo se stínění.

Promíchávání média má klíčový vliv na využití světla a udržení rovnoměrné teploty během kultivace. Intenzivní míchání je zejména prospěšné při vysokých koncentracích kultivačního média, kdy dochází k nadměrnému stínění, zejména na místech nejvzdálenějších od ploch, na které dopadá sluneční záření. Vysoká koncentrace biomasy může vést k biofoulingu, což je usazování mikroorganismů na vnitřních plochách kultivačních komor nebo trubek. Tato tvorba biofilmu zastiňuje spodní vrstvy řas a snižuje jejich přístup k světlu pro fotosyntézu. Díky správně navrženému míchání lze předcházet zmíněným nežádoucím vlivům a zvýšit výnos kultivace.

Nedostatečné a nerovnoměrné míchání kultivačního média ve spojení s nedostatečným osvětlením může vést ke vzniku mrtvých zón, což negativně ovlivňuje průběh kultivace. Správná volba intenzity míchání je klíčová, aby nedocházelo k poškození buněčných stěn mikrořas. S rostoucí intenzitou míchání se zvyšují energetické a zároveň provozní náklady na čerpadla a kompresory. Při nadměrné intenzitě míchání také může docházet k poškození buněčných stěn mikrořas, proto je důležité dbát na výběr vhodného typu čerpadla, které bude k řasám šetrné.

V případě pneumatického probublávání a míchání je možné postupovat podle empiricky naměřených dat, které udávají optimální hodnoty průtoku aeračního plynu i velikost bublinek určených k promíchávání jednotlivých kmenů.

Teplota kultivačního média je důležitým parametrem podobně jako osvětlení. Podle rozsahu teplot kultivace se volí vhodné kmeny ke kultivaci. Teplotní regulace může spočívat v tepelném výměníku s topnou nebo chladicí spirálou, vodní rozprašovací sprchou, stíněním pomocí otočného mechanismu či plachtou nebo chladícími bazény. Rozsah kultivačních teplot je nejvíce ovlivněn podnebím, ve kterém kultivace probíhá. Konkrétně teplotou okolí a slunečním zářením. Regulace teploty je možná u všech zařízení, ale pro otevřené systémy o vysokém objemu se kromě stínění příliš nepoužívá z důvodu vysokých provozních i investičních nákladů. Pro fotobioreaktory je možné využít tepelnou regulaci, avšak v podobě vodního chlazení nebo ohřevu je nákladná.

Přívod CO_2 je naprosto nezbytný pro kultivaci řas o vysoké koncentraci, protože se stoupající koncentrací řas se zvyšuje i jejich spotřeba CO_2 . Vyčištěné plynné CO_2 je do fotobioreaktorů přiváděno nejčastěji v podobě obohacené směsi vzduchu o objemové koncentraci do několika procent objemových CO_2 . Dávkování CO_2 do fotobioreaktorů není problematické a realizuje se snadno pomocí perforovaných hadiček a bublinkových sloupců, je ale dobré dbát na ekonomiku provozu šetřením stlačeného CO_2 . Dávkováním CO_2 lze také upravit hodnotu pH kultivačního média.

Přísun živin je realizován vsádkově dávkováním do zádržné nádrže, nebo přímo do kultivační komory. Živiny se dodávají v podobě vodného roztoku, který se skládá z minerálních látek, a také dusíkatých a fosforečných sloučenin. Pro stabilní růst řas je důležité, aby živiny v kultivačním médiu byly rovnoměrně rozpuštěné, i proto je nutné mít spolehlivý a výkonný systém míchání. Dávkování živin je pro všechny kultivační zařízení téměř bezproblémový až na riziko kontaminace kultivačního média, kterému lze zabránit vhodným konstrukčním řešením systému dávkování živin, nebo v případě dávkování lidskou obsluhou vhodnými hygienickými opatřeními. Základní dávkování živin se uvádí dle Redfieldova poměru 106C:16N:1P, který udává, že na 106 molů uhlíku připadá 16 molů dusíku a 1 mol fosforu. Určení konkrétního optimálního dávkovacího rozsahu, však bývá složité vzhledem k individuálním vlastnostem a požadavkům kultivovaných kmenů [31].

Odplynění je klíčové pro vysoké objemy kultivačního média zejména v dlouhých vodorovných trubkách nebo v případě špatně projektovaných částí fotobioreaktoru, kde dochází k nahromadění O₂.

Zhodnocení konstrukčních variant

Při výběru nejvhodnějšího typu statického kultivačního zařízení je nutné brát v úvahu jeho schopnost dosahovat a udržovat optimální hodnoty provozních parametrů a zároveň zabránit kontaminaci média. Z důvodu vysokého sklonu kultivace ke kontaminaci a velmi nízkého využití slunečního záření, které má za následek pomalý růst řas, nejsou otevřené kultivační systémy vhodné ke kultivaci sněžných polárních řas. Pro kultivaci polárních kmenů připadají pouze fotobioreaktory.

Ke zvolení vhodného fotobioreaktoru pro kultivaci polárních a sněžných řas v polárních krajích je důležitým parametrem schopnost rovnoměrného využití světla během polárního dne. Pro stacionární variantu se nehodí deskové fotobioreaktory, protože pevně daná orientace desky je efektivní pouze v případě, kdy kolmo na desku dopadá sluneční záření. To samé platí i pro trubkové vertikálně orientované fotobioreaktory, které se navíc mohou i vzájemně stínit, pokud existuje více potrubních řad. Použití horizontálních trubkových fotobioreaktorů je výhodné zejména v rovníkových oblastech, kde se slunce pohybuje vysoko nad horizontem a médium je tak intenzivně prosvětlováno, avšak v polárních oblastech, kde se slunce pohybuje nízko nad obzorem by docházelo k velice neefektivnímu využití světla.

Lepší využití světla by měli mít válcové fotobioreaktory, které svojí geometrií kultivační komory dosahují lepšího využití světla během celého polárního dne, nevýhodou však je nedostatečné prosvětlení média zejména uprostřed válce a také sklon systému k usazování řas na transparentních plochách. Pro kultivaci vyššího objemu média při zachování dostatečného prosvětlení je nutné použití několika dlouhých a štíhlých válců zabírajících značnou zastavěnou plochu z důvodu eliminace vzájemného stínění

Velmi dobrého využití světla během polárního dne dosahuje spirálově vinutý trubkový fotobioreaktor, který na malé zastavěné ploše nabývá vysokých objemů kultivačního média. Kultivační médium je také dobře prosvětleno použitím trubek o malém průměru. Nevýhodou tohoto řešení je částečné stínění zadních trubek při určitých úhlech dopadu slunečního záření. Vznik biofoulingu usazováním řas je srovnatelný s ostatními variantami.

Pro výběr otočné varianty je důležité, aby zařízení využívalo co nejvíce dopadajícího slunečního záření, proto je nejlepší variantou deska. Deskový fotobioreaktor se může natáčet v horizontálním i vertikálním směru. Otáčení ve vertikální směru není tak výhodné pro maximalizaci využití dopadajícího záření, jelikož i během poledne, kdy se slunce nachází v maximální výšce, je slunce nízko nad obzorem a vertikální úhel mezi povrchem země a sluncem činí zhruba 30° až 40° v závislosti na zeměpisné šířce.

Pro otáčení v horizontálním směru je možné použít několik variant řešení, které jsou popsány v patentové rešerši této práce. Z těchto zařízení se jeví jako nejspolehlivější použití věžového systému s otočným pohonem na principu patentu CN204965199U. Tyto otočné pohony se šnekovým převodem se vyznačují zachycením vysokých axiálních a radiálních zatížení a slouží k natáčení a rotačnímu pohybu těžkých a rozměrných komponentů. Konstrukčně jsou otočné pohony řešeny jako axiální ložisko, které může mít svůj vnější nebo vnitřní kroužek osazený přírubou pro snadnou montáž otočného mechanismu s pohonem. Vnější kroužek tohoto ložiska většinou obsahuje šnekové ozubení. Pomocí šneku, poháněného externím motorem, je pak vyvolána rotace otočného ložiska. Otočné pohony se vyrábějí i ve variantách do extrémních podmínek a jejich aplikace se vyznačuje vysokou spolehlivostí i při vysokém zatížení.

4 Návrh zařízení

Obě vybrané varianty zařízení, které byly zvoleny na základě požadavků z kapitoly 3, vynikají vysokou mírou využití slunečního záření. Nicméně je důležité ověřit, zda vyšší účinnost využití slunečního záření u otočné varianty přinese dostatečné výhody, které by odůvodnily její složitější konstrukci a vyšší náklady na údržbu. Design obou fotobioreaktorů je vybrán na základě zhodnocení literární i průmyslové rešerše.

V prvním případě je volena varianta stacionárního fotobioreaktoru typu spirálově vinutého trubkového fotobioreaktoru a ve druhém případě došlo k volbě otočného deskového fotobioreaktoru. Obě zařízení jsou dimenzována na objem 100 litrů v kultivační části, kde probíhá proces fotosyntézy. Pro stacionární variantu je to trubková spirálově vinutá část a pro otočnou variantu je to desková komora.

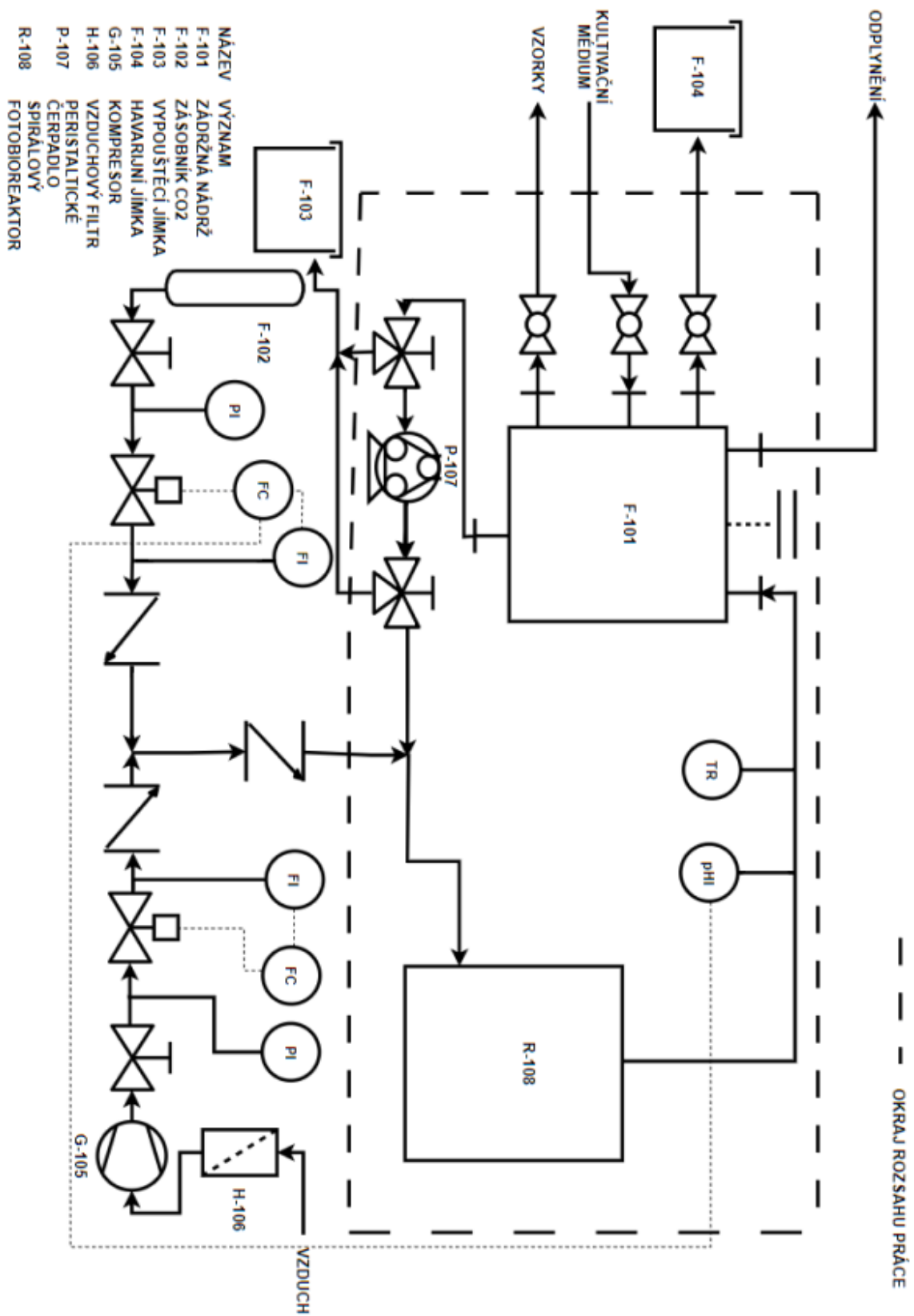
Obě varianty by měly splňovat zásady spolehlivě navrženého kultivačního zařízení, které bude spolehlivě fungovat v polárních krajích. Důležitým faktorem je volba vhodných

konstrukčních materiálů odolných vůči náročným venkovním podmínkám. Dále je nutné zajistit, aby jednotlivé části fotobioreaktoru, jako jsou čerpadlo, zádržná nádrž, vzduchovací a měřicí prvky, disponovaly vlastnostmi odpovídající prostředí kultivace. Zde je uveden výčet důležitých vlastností a parametrů, které je třeba dodržet

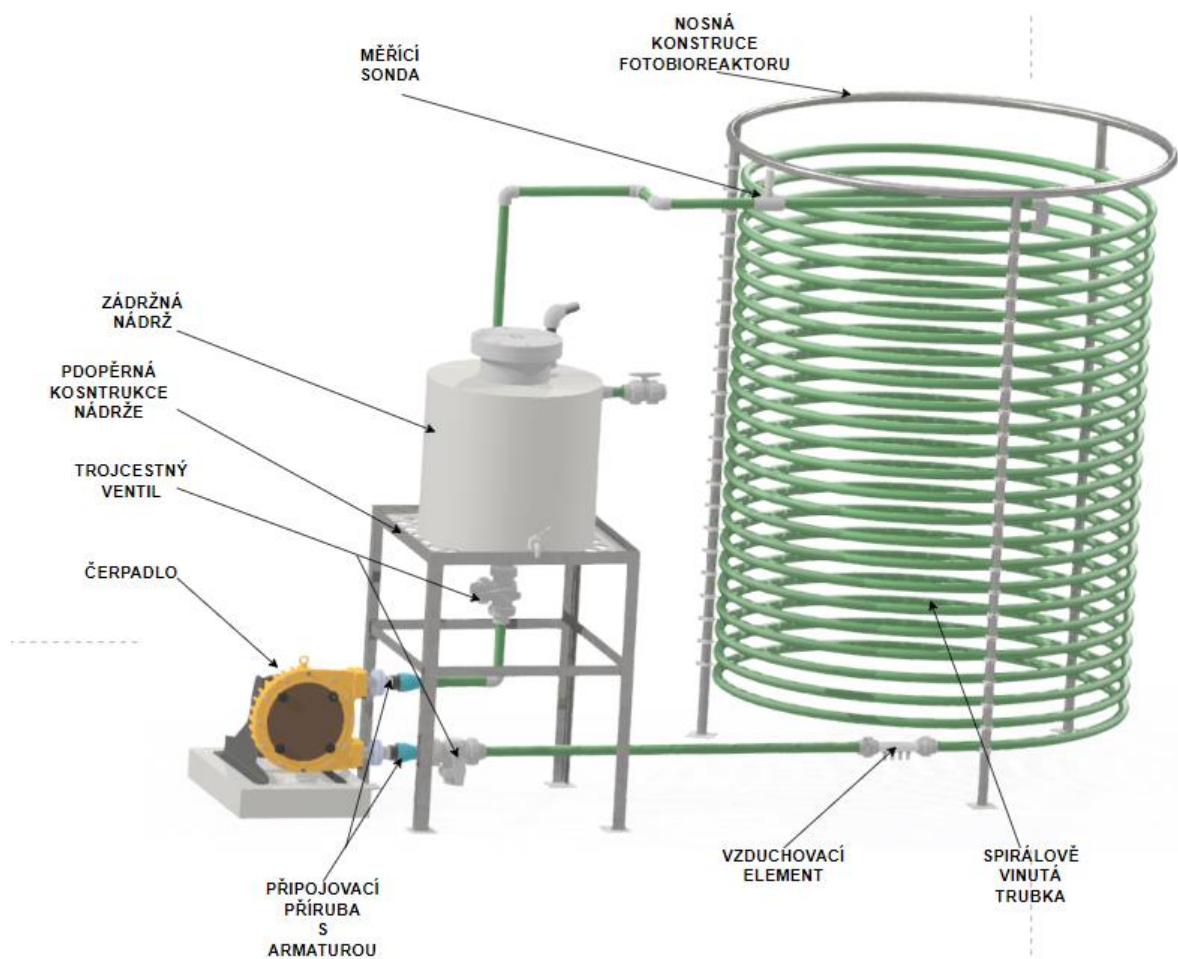
- Odolnost vůči podnebním vlivům (teplota, prach, vlhkost)
- Chemická stálost materiálů a odolnost vůči korozi
- Odolnost vůči kyselému nebo zásaditému prostředí
- Omezení tvorby biofoulingu volbou vhodného materiálu
- Spolehlivý a výkonný přívod směsi vzduchu a CO₂
- Intenzivní míchání a spolehlivá doprava kultivačního média do spirálově vinutého potrubí
- Minimální usazování mikrořas
- Snadná čistitelnost a sterilizace
- Jednoduchá instalace a údržba
- Minimální riziko kontaminace
- Těsnost spojů a zamezení úniku kultivačního média

4.1 Stacionární varianta

Pro kultivaci je zvolen fotobioreaktor se spirálově vinutou trubkovou kultivační komorou o objemu 100 litrů. Fotobioreaktor popsáný ve 3D modelu na obrázku 34 se skládá z kultivační komory, zádržné nádrže s nosnou konstrukcí, peristaltického čerpadla, vzduchovacího elementu, armatur, šroubení, tvarovek a trubkového úseku se sondou měřící pH a teplotu. Technologické schéma s popsánými proudy a jednotlivými aparáty zařízení se nachází na obrázku 33. V příloze 001-001 a 001-001-S se nachází výkresová dokumentace spirálového fotobioreaktoru.



Obrázek 33 Technologické schéma spirálového fotobioreaktoru



Obrázek 34 3D model spirálového fotobioreaktoru

4.1.1 Potrubí

Materiál musí být flexibilní, propustný pro světlo a také odolný. Takové vlastnosti splňují trubky a hadice z polyvinylchloridu (PVC). Trubky z PVC jsou chemicky stábe a také se vyznačují velmi hladkým povrchem, který je ideální k předcházení biofoulingu. Potravinářské PVC také splňuje vysoké nároky na nezávadnost, není toxické a má dostatečnou odolnost vůči abrazi, ale disponuje horší odolností vůči promáčknutí. Teploty použití se pohybují zhruba od -10 do 60 °C. Spojení tohoto druhu potrubí se šroubením se realizuje lepeným spojem, nebo pomocí svěrného spoje. V tomto případě je vzhledem k použití flexibilního druhu PVC vhodné volit pouze variantu lepených spojů, které jsou vodotěsné a velice odolné vůči tlaku. Životnost PVC materiálu je výrazně ovlivněna vystavením slunečnímu záření, je však možné použít hybridní PVC vinyl materiály, které jsou vůči ultrafialovému světlu odolné. Z PVC materiálů se vyrábí i šroubení včetně trojcestných ventilů, redukci, průchodek a tvarovek. Spojení potrubí fotosyntetické části není ve 3D modelu znázorněno, protože se předpokládá využití jedné flexibilní trubky nebo hadice.

Délka potrubí se stanoví dle rovnice (1). Kde $V=0,1 \text{ m}^3$ je objem kultivovaného média ve fotosyntetické části, $A [\text{m}^2]$ je plocha průřezu trubky, ve které proudí kapalina a $D_{in} = 0,034 \text{ m}$ je vnitřní průměr trubky.

$$l = \frac{V}{A} = \frac{0,1}{\frac{\pi * D_{in}^2}{4}} = \frac{0,1}{\frac{\pi * 0,034^2}{4}} = 110,1 \text{ m} \quad (1)$$

Střední průměr spirály je $D_{stř} = 1,5 \text{ m}$. Střední obvod jedné spirály je zhruba $O_{spiral} = 4,71 \text{ m}$. Prostým dělením délky trubky obvodem jedné otáčky spirály se získá počet spirál $n [-]$ nutných ke kultivaci 100 l média. Výpočet počtu spirál je v rovnici (2).

$$O_{spiral} = \pi * D_{stř} = \pi * 1,5 = 4,71 \text{ m} \quad (2)$$

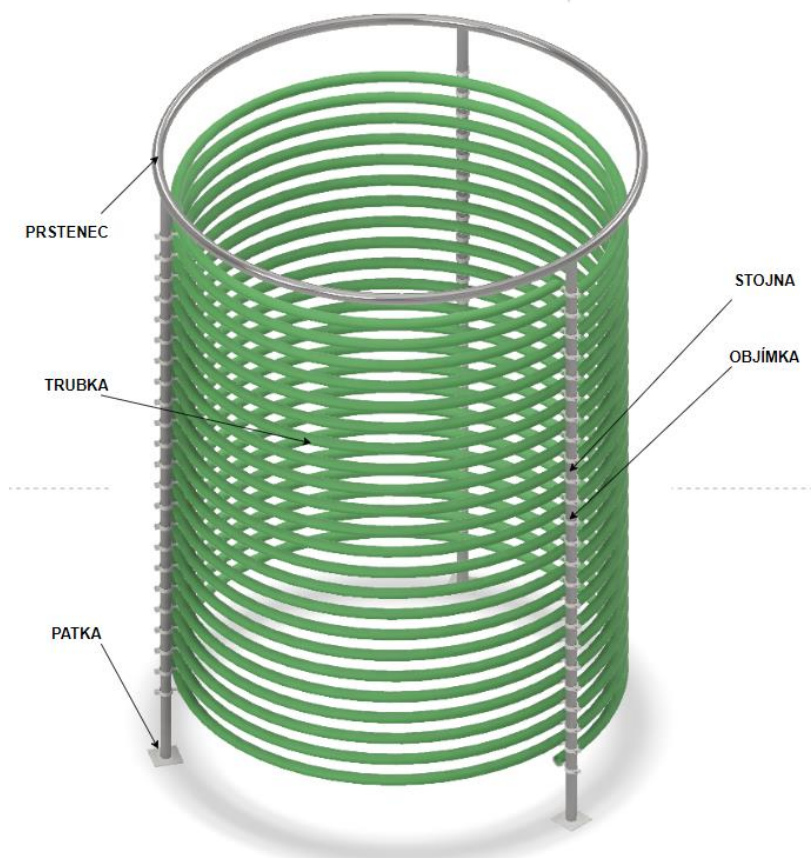
$$n = \frac{l}{D_{stř}} = \frac{110,1}{4,71} \cong 23$$

Pro získání rozteče mezi jednotlivými otáčkami spirály je nutné zvolení výšky zařízení. Pro toto zařízení se volí výška spirály jako $h = 2 \text{ m}$. Pak se z rovnice (3) získá rozteč spirál $r = 0,085 \text{ m}$.

$$r = \frac{h}{n} = \frac{2}{23} \cong 0,085 \text{ m} \quad (3)$$

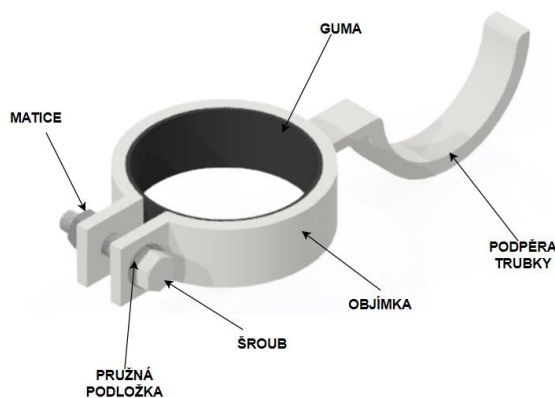
Potrubní celek je doplněn podpěrnou konstrukcí z nerezových trubek s vrchním prstencem, který zajišťují pevné ukotvení trubek v rámci vypočtené geometrie fotobioreaktoru. Schéma spirálové trubky s podpěrnou konstrukcí se nachází na obrázku 35. Ukotvení trubek fotobioreaktoru je v této variantě spirálového fotobioreaktoru zajištěno použitím svěrných objímek, které se přichytí šroubem a maticí ke třem stojnám s patkami. Existují i levnější řešení používající nerezové řetězy se stahovacími plastovými pásky, které celkem účinně zafixují polohu trubky ve fotobioreaktoru. Tato řešení jsou však použita pouze ve vnitřních laboratorních podmínkách, kde nehrozí poškození řetězů a plastových pásků zvěří

nebo působením podnebních vlivů, jako je sluneční záření, déšť, koroze, námraza či změny teplot.



Obrázek 35 Spirálový fotobioreaktor

Svěrná spojka je na obrázku 36. objímka je stažena pomocí matice a šroubu s pružnou podložkou ke stojně. Efekt utahení je umocněn pomocí gumového prstence, který také brání v deformaci trubky nebo objímky během stahování.



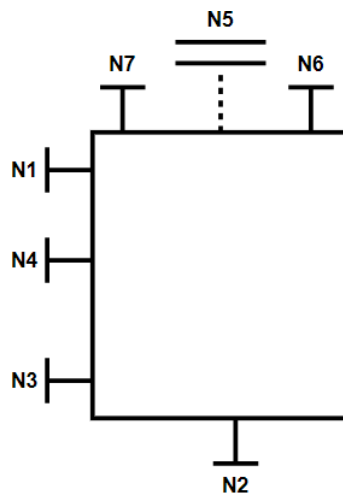
Obrázek 36 Svěrná spojka

4.1.2 Zadržná nádrž

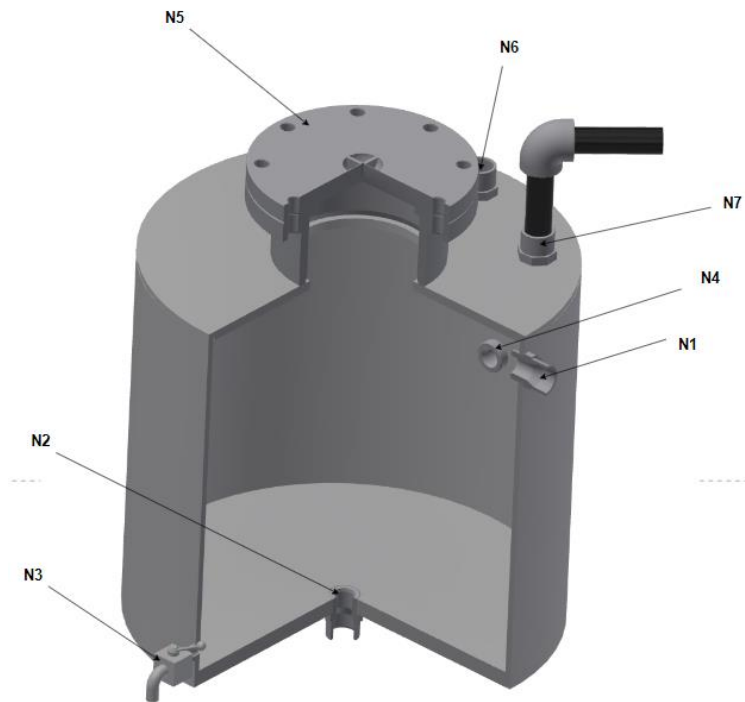
Součástí spirálově vinutého fotobioreaktoru je zadržná nádrž z PVC o objemu 150 litrů, která se využívá k odplynění kultivačního média. Předpokládá se, že zhruba 100 litrů cirkuluje skrz fotosyntetickou část fotobioreaktoru a několik litrů skrz ostatní potrubní celky. Zhruba 30 litrů kultivačního média se tak stále nachází v nádrži.

Nádrž je v horní části vybavena přelivem s odtokovým přeliv (N1), který je využit v případě přeplnění nádoby. Nádrž je ve spodní části vybavena dvěma přechodkami. Přechodka ve středu dna (N2) slouží k odvodu média ze zadržné nádoby do čerpadla nebo k úplnému vypuštění. Druhá průchodka ve stěně nádoby je osazena vzorkovacím kohoutem (N3). Ve střední části nádoby se nachází přechodka primárně určená pro napuštění nádrže (N4). Tato průchodka může být také využita k přívodu sanitačního média. V odnímatelném víku nádoby se nacházejí tři otvory. Centrální otvor se zaslepovací přírubou (N5) je určen k dávkování živin a k čistění nádrže. Zbylé dva otvor osazené přechodkami jsou použity k přívodu kultivačního média (N6) z fotosyntetické části a také k odplynění nádrže (N7).

Schéma nádrže korespondující s technologickým schématem se nachází na obrázku 37 a model v řezu s vyznačenými hrdly se nachází na obrázku 38.

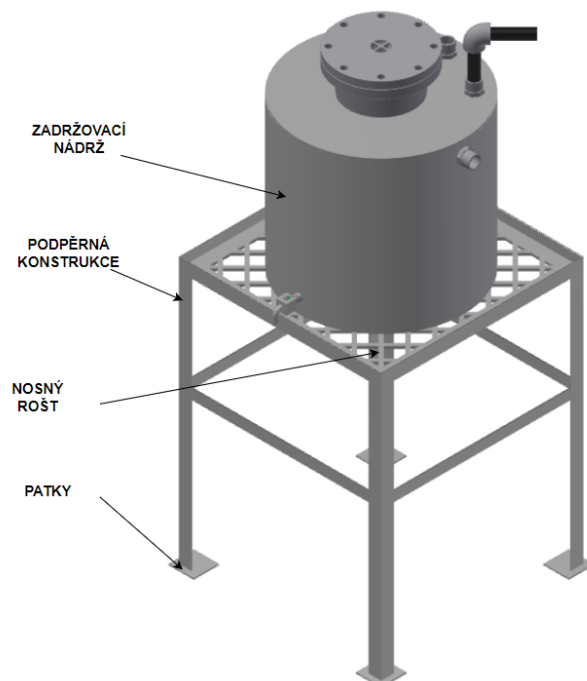


Obrázek 37 Zadržná nádrž



Obrázek 38 3D model zádržné nádrže

Součástí zádržné nádrže je i jednoduchá nosná konstrukce, kterou lze dovybavit žebříkem a zábradlím. Model nádrže s nosnou konstrukcí je zobrazen a popsán na obrázku 39.



Obrázek 39 3D model nosné konstrukce zádržné nádrže

4.1.3 Čerpadlo

Při dopravě kultivačního média je nutné dbát na pevnost buněčné stěny mikrořas, která při vysokých smykových napětí může být poškozena. To má za následek úhyn řas. K dopravě média se může použít odstředivé čerpadlo, ale jen v případě kultivace řas necitlivých k působení mechanického napětí na buněčnou stěnu. Pro kultivace co nejvyššího množství druhů mikrořas je však nutné volit čerpadla šetrná k mikrořasám. Těmi jsou vřetenová nebo hadicová (peristaltická) čerpadla. Obě čerpadla pracují na principu vytlačení tekutiny gumovým kanálem rotací vytlačovacího tělesa (vřeteno, nastavovací kladky). Obě čerpadla se vyznačují vysokou odolností při dopravě viskózních látek i tekutin s abrazivními částicemi a také relativně vysokou výtlačnou výškou a nízkými průtoky média. V tomto případě je voleno hadicového čerpadlo kvůli jeho častějšímu aplikaci při kultivaci mikrořas, ale i díky snadné regulaci tlaku nastavením přitlačení kladek k hadici a regulaci průtoku frekvenčním měničem.

Požadovaný průtok V^* média vypočtený podle rovnice 1 je stanoven z rychlosti kultivačního média uvnitř trubek, která je $u = 0,4 \text{ m s}^{-1}$, kdy doporučená hodnota pro trubkové fotobioreaktory je v rozmezí $0,2 - 0,6 \text{ m s}^{-1}$. Spodní rychlost proudění je limitovaná nutností odvodu O_2 z kultivačního média vzniklého fotorespiračními procesy. Horní rychlost proudění je limitována energetickou náročností provozu čerpadla [32]. Vnitřní průměr potrubí je $D_{in} = 0,034 \text{ m}$.

$$V^* = \frac{\pi * D_{in}^2}{4} * u = \frac{\pi * 0,034^2}{4} * 0,4 = 1307,4 \text{ l h}^{-1} \quad (4)$$

Výtlač čerpadla je dán maximální výškou, do které čerpadlo dopravuje médium a také součtem tlakových ztrát prouděním média v trubce a tlakových ztrát vlivem změny směru proudění. V rámci basic designu se předpokládá zjednodušení v podobě náhrady spirálově vinutého potrubí za rovné potrubí. Vliv tvarovek, přechodů a jiných armatur se uvažuje jako 30 % tlakových ztrát v potrubí. Drsnost potrubí je $k = 0,0025 \text{ mm}$.

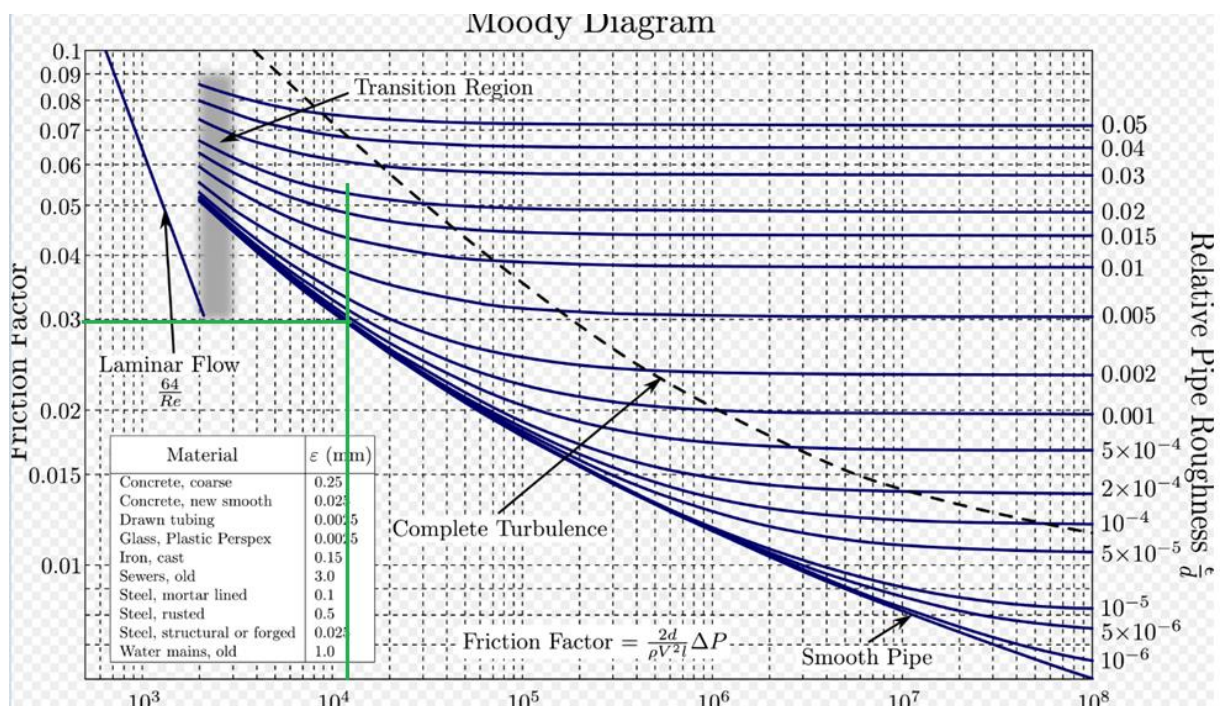
Pro výpočet tlakových ztrát je důležité stanovit hodnotu Reynoldsova čísla Re [-]. Předpokládá se, že vlastnosti kultivačního média jsou podobné vodě, volí se tedy hustota $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ a dynamická viskozita $\mu = 0,001 \text{ Pa s}$. Charakteristický rozměr je stanoven pro

kruhové potrubí jako vnitřní průměr. Platí $d_{char} = D_{in}$. Reynoldsovo číslo se vypočte podle rovnice (2).

$$Re = \frac{u \cdot d_{char}}{\nu} = \frac{u \cdot D_{in} \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,4 \cdot 0,036 \cdot 1000}{0,001} = 13600 \quad (5)$$

Hodnota Re z rovnice (5) udává, že se proudění nachází v turbulentní oblasti, kdy přechod mezi laminární a turbulentní oblastí je kolem $Re = 2300$. Pro stanovení tlakových třecích ztrát se používá Darcy-Waisbachova rovnice (3), která předpokládá proudění nestlačitelné kapaliny. Rovnice (7) udává ztrátu třením e_z [J kg⁻¹] souvislostí mezi součinitelem třecích ztrát $\lambda = f(Re, k^*)$ [-], délkou potrubí l , charakteristickým průměrem d_{char} , rychlostí proudění kapaliny u a relativní drsnost potrubí k^* stanovené z rovnice (6). Součinitel třecích ztrát se odečte z Moodyho diagramu, který se nachází na obrázku 40. Kde na ose X leží hodnoty Re a modré křivky značí relativní drsnost potrubí. Vynesením vodorovné čáry na osu Y z průsečíku hodnot Re a křivky relativní drsnosti se získá hodnota součinitele třecích ztrát $\lambda = 0,03$.

$$k^* = \frac{k}{D_{in}} \quad (6)$$



Obrázek 40 Moodyho diagram [33]

$$e_z = \lambda \frac{l}{d_{char}} \cdot \frac{u^2}{2} = 0,03 \cdot \frac{110,1}{0,034} \cdot \frac{0,4^2}{2} = 7,71 \quad (7)$$

Pro získání tlakových třecích ztrát je nutné vynásobit ztrátu třením e_z hustotou kapaliny podle rovnice (8).

$$\Delta P = e_z * \rho = 7,71 * 1000 = 7771 \text{ Pa} \quad (8)$$

Dále se pomocí upravené Bernoulliho inženýrské rovnice (9) může získat celkový výtlač pomocí měrné energie dodávané do systému e_ζ [J kg⁻¹], který se požaduje po čerpadle. Malé indexy veličin 1 v upravené Bernoulliho inženýrské rovnici značí hodnoty na vstupu do fotosyntetické části za aeračním elementem a malé indexy 2 odkazují na hodnoty veličin na výstupu z fotosyntetické části fotobioreaktoru před měřicí sondou. V upravené Bernoulliho rovnici (9) je $\kappa_x = 1$ součinitel pro turbulentní proudění, tlaky p_x [Pa] i rychlosti u_x jsou konstantní a navzájem se odečtou. Redukcí rovnice (9) se získá měrná energie dodávaná do systému čerpadlem e_ζ z rovnice (10). Rozdíl výšek na vstupu a výstupu z fotosyntetické části odpovídá zhruba 2 m. Gravitační zrychlení se uvažuje $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$.

$$\kappa_1^2 \cdot \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g * h_1 + e_\zeta = \kappa_2^2 \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g * h_2 + e_z \quad (9)$$

$$e_\zeta = g * (h_2 - h_1) + e_z = 9,81 * (2 - 0) + 7,71 = 27,73 \text{ J kg}^{-1} \quad (10)$$

Měrná energie dodávaná do systému čerpadlem e_ζ odpovídá hodnotám v rovnici (12) vyjádřených v Pa a v metrech vodního sloupce, kterým výrobci velmi často uvádějí hodnoty výtlačku čerpadla. Převodní vztahy mezi jednotkami e_ζ jsou uvedeny v rovnici (11)

$$\begin{aligned} e_\zeta [\text{J kg}^{-1}] * \rho &= e_\zeta [\text{Pa}] \\ \frac{e_\zeta [\text{J kg}^{-1}]}{g} &= e_\zeta [\text{m}] \\ \frac{e_\zeta [\text{Pa}]}{g * \rho} &= e_\zeta [\text{m}] \end{aligned} \quad (11)$$

$$e_\zeta = 27,73 \text{ J kg}^{-1} \cong 27\,730 \text{ Pa} \cong 2,79 \text{ m} \quad (12)$$

Výpočet je kompletní po přidání vlivu skutečného spirálového tvaru, tvarovek a redukci a zbylých armatur. Koeficient opravy se odhadl na 30 %. Celkové tlakové ztráty zařízení e_{ζ} navýšené o opravný koeficient jsou zobrazené v tabulce 1.

e_{ζ}	[J kg ⁻¹]	[Pa]	[m]
	36,049	36 049	3,62

Tabulka 1 Tlakové ztráty

Dle předchozích hodnot výtlačku z tabulky 1 a hodnot průtoku z rovnice 4 je vybráno hadicové čerpadlo FMP-30 od firmy Boyser nacházející se na obrázku 41, které je vybavené frekvenčním měničem pro regulaci průtoku i regulací tlaku v podobě nastavitelného přitlaku hadice kladkou. Čerpadlo je schopné pokrýt výtlačk od 0,5 do 8 barů a kontinuální průtok je až 1500 l min⁻¹ při tlaku 1 bar [34]. Datasheet čerpadla se nachází v příloze.



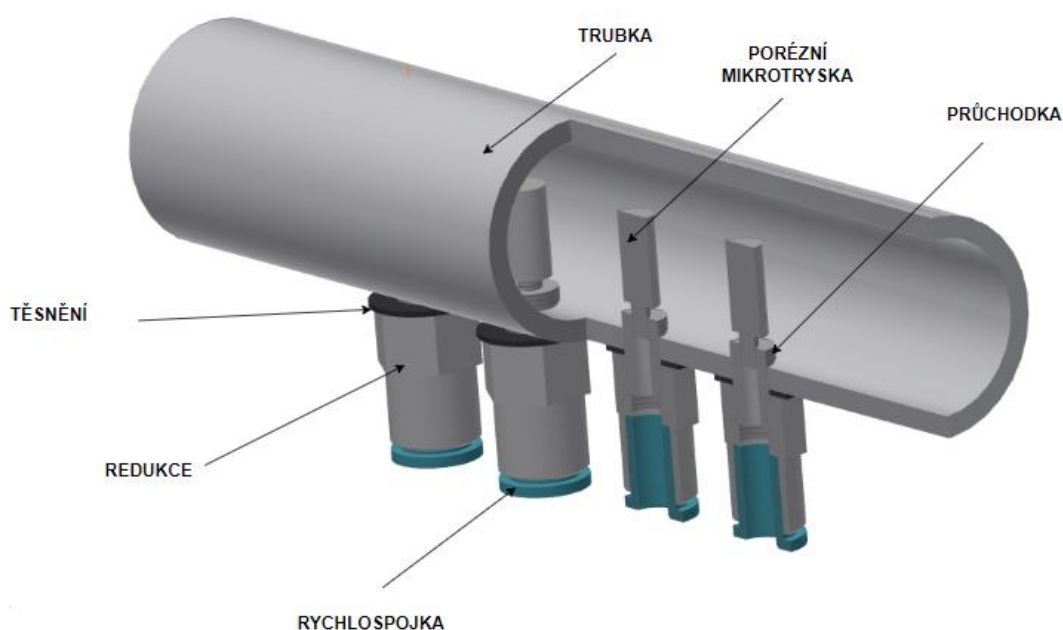
Obrázek 41 Peristaltické čerpadlo [34]

4.1.4 Příklad přívodu vzduchu a CO₂

Dostatečný přívod CO₂ je nutný k růstu řas zejména při vysokých koncentracích, které se ve fotobioreaktorech dosahují relativně rychle. CO₂ se nejčastěji přivádí z tlakového zásobníku do proudu stlačeného vzduchu z atmosféry, který je vhodné zavést buď před odstředivé čerpadlo, nebo před vstup do fotosyntetické části. Lze také zavést vzduchování přímo do zádržné nádrže, ale pak je účinnost přestupu plynů do média nižší a je potřeba

bublanky vzduchu intenzivně dispergovat. To je dáno krátkými dobami zdržení bublinek v mezifázovém prostředí i malou mezifázovou plochou.

Přívod vzduchu obohaceného o CO₂ je pro spirálový fotobioreaktor realizován pomocí nerezových mikroporézních trysek, vhodných do fermentačních bioreaktorů. Tyto mikrotrysky mají vnější závit a jsou vhodné k instalaci do průchodek skrz PVC trubku. Pro vzduchování se navrhl trubkový vzduchovací element, který je na 4 místech provrtán dírou se závitem do kterého je našroubována průchodka s vnitřním závitem pro připojení trysky. Vnější závit průchodky slouží k upevnění do trubky i pro instalaci redukce s rychlospojkou určenou k připojení vzduchovací hadice. Vzduchovací element je zobrazen na obrázku [42] a katalog s mikroporézní tryskou se nachází v příloze.



Obrázek 42 3D model vzduchovacího elementu

Stanovení přesného průtoku vzduchovací směsi je závislé na konkrétním kultivovaném kmenu i na geometrii kultivační komory. Doporučené aerační průtoky pro fotobioreaktory se udávají v jednotce průtoku litrů aerační směsi na litr kultivačního média za minutu zkráceně *vvm* [$\text{l l}^{-1} \text{min}^{-1}$]. V případě spirálového trubkového fotobioreaktoru je přívod aeračního plynu určený k dodání CO₂ řasám a k částečnému odvodu O₂, který je primárně odplyněn dopravením z kultivační komory do zádržné nádrže, kde se uvolní do ovzduší.

Xuyang Cui a kol. (2021) uvádí ve své práci rozsah *vvm* od 0,3 do 0,9 $\text{l l}^{-1} \text{min}^{-1}$, který platí pro aeraci porézní trubcí v trubkových fotobioreaktorech. Spodní hodnota *vvm* podle

Xuyang Cui a kol. (2021) je omezená zpětným tokem kultivačního média skrz porézní trubici a horní hodnota je dána objemem vzduchovacího média ve fotobioreaktoru, který se při zvyšování vvm nad $0,9 \text{ l}^{-1} \text{ min}^{-1}$ déle nemění. Práce C.U. Ugwu a H. Aoyagi (2011) uvádí rozsah vvm pro trubkový fotobioreaktor se statickým směšovačem mezi $0,05$ až $0,35 \text{ l}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Výše zmíněné orientační hodnoty vvm se alespoň přibližně blíží geometrickým specifikacím kultivace ve spirálovém trubkovém fotobioreaktoru, avšak neuvažují míchání čerpadlem. Literatura se neshoduje na konkrétním rozsahu hodnot vvm . Hodnoty vvm navíc závisí i na kultivovaném kmenu. V tomto případě se jedná o kultivaci polárních řas, pro které tyto hodnoty neexistují [35], [36].

Z důvodu problematiky stanovení optimální hodnoty vvm se uvažuje, že objemový průtok vzduchovacího média je v rozsahu vvm od $0,05$ do $0,9 \text{ l}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Z rovnice 15 je možné získat hodnotu minimálního průtoku earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru $V_{mins}^* = 5 \text{ l min}^{-1}$. $V_S = 100 \text{ l}$ je objem fotosyntetické části fotobioreaktoru a $vvm_{mins} = 0,05 \text{ l}^{-1} \text{ min}^{-1}$ je minimální průtok earačního plynu za minutu vztažený na kultivační objem ve fotosyntetické části. Z rovnice 16, kde $vvm_{maxs} = 0,9 \text{ l}^{-1} \text{ min}^{-1}$, se vypočte hodnota maximálního průtoku earačního plynu do spirálového fotobioreaktoru $V_{maxs}^* = 100 \text{ l min}^{-1}$.

$$V_{mins}^* = V_S * vvm_{mins} = 100 * 0,05 = 5 \text{ l min}^{-1} \quad (15)$$

$$V_{maxs}^* = V_S * vvm_{maxs} = 100 * 1 = 100 \text{ l min}^{-1} \quad (16)$$

Maximální průtok CO_2 do systému $V_{CO2maxs}^* = 5 \text{ l min}^{-1}$ se vypočte podle rovnice 17. Objemová koncentrace CO_2 v aerační směsi je pro výpočet zvolena pro demonstrativní účely jako $C_{CO2s}^v = 5 \%$ objemových. Konkrétní hodnota optimální koncentrace CO_2 se stanovuje empiricky během provozu fotobioreaktoru nebo v laboratoři.

$$V_{CO2maxs}^* = V_{maxs}^* * C_{CO2s}^v = 100 * 0,05 = 5 \text{ l min}^{-1} \quad (17)$$

4.1.5 Měření a regulace

Průběh kultivace lze sledovat použitím sond měřících pH, koncentraci CO_2 , teploty, turbidity nebo měření fluorescenční aktivity chlorofylu. Z komplexního měření lze odvodit stav

kultivace a následně upravit kultivační podmínky, jako je přívod CO₂, živin, teplota média, intenzita míchání a podobně.

Pro fotobioreaktory je důležitým prvkem hladina rozpuštěného CO₂ v kultivačním médiu, která může být měřena přímo pomocí drahé (statisíce Kč) sondy detekující koncentraci CO₂ v médiu, nebo nepřímo použitím cenově dostupné (tisíce Kč) pH sondy. Při nedostatku CO₂ se v kultivačním médiu zvyšuje pH, to signalizuje, že je za potřebí zvýšit průtok CO₂ do systému. Teplotní sonda se používá k řízení systém regulace teploty nebo jako datalogger, který informativně zaznamenává data z kultivace pro vědecké účely.

Měření turbidity neboli zákalu probíhá obvykle ve dvou optických vlnových délkách, kterými jsou 680 a 720 nm. Měření zákalu ve vlnové délce 680 nm je spojeno s absorpcí chlorofylu a určením koncentrace chlorofylu. Měření na vlnové délce 720 nm je možné využít ke stanovení růstu biomasy mikrořas sledováním rozptylu světla způsobeného průchodem částic skrz světlo. Fluorescenční sonda pomáhá stanovit fyziologický stav mikrořas.

Ve stacionárním zařízení je umístěna sonda sledující najednou pH i teplotu. Sonda je umístěná za fotosyntetickou částí v PVC T-trubce se šroubením, která slouží jako jímka pro připojení sondy. Ukázka provedení jímky se nachází na obrázku 44. Konkrétní typ sondy může být například pH Sensor InPro3100/120/PT100 od firmy Mettler Toledo, který je zobrazený na obrázku 43. Datasheet sondy se nachází v příloze. Je také nutné dbát na podmínky měření, které mohou být narušeny například vzduchovými bublinami atd. a dbát tak na pokyny výrobce pro správnou instalaci a měření.



Obrázek 43 Sonda měřící teplotu a pH [37]



Obrázek 44 Ukázka provedení jímky z T-trubice [38]

Měření turbidity a fluorescence je vhodné situovat například do laboratoře poblíž fotobioreaktoru, do které budou vzorky dopravovány ze vzorkovacího kohoutu, protože provedení těchto sond pro kontinuální měření v provozu je velice nákladné.

4.1.6 Čištění a sterilizace

Z důvodu kontaminace i poklesu účinnosti prostupu světla skrz potrubí vlivem biofoulingu je nutné zařízení pravidelně čistit. Problémy nastávají zejména v místech potrubních spojů a hrdel, ve kterých se mohou usazovat řasy. Usazené řasy postupně hnijí a umožňují množení nežádoucích mikrobů negativně ovlivňujících kultivaci.

Čistící prostředek se do fotobioreaktoru přivede hrdlem N4 nebo hrdlem N5 a odvede se pomocí trojcestných ventilů do vypouštěcí jímky. Použití peristaltického čerpadla umožňuje pročistit nánosy biofoulingu sanitační kuličkou z molitanu zobrazenou na obrázku 45, která se vloží do zádržné nádrže nebo přímo do potrubí. Kulička je pak nasána čerpadlem a výtlačnou silou je dopravena skrz čištěné potrubí zpět do nádrže. Při čištění sanitačními kuličkami je důležité dbát na bezpečnost vzduchovacího a měřícího systému, který se může poškodit čištěním. Tomu lze zabránit vyjmutím vzduchovací trysky a měřících sond z potrubí.

Je také nutné dbát na nereaktivnost čistícího média s materiály trubek, armatur, nádrže i hadic čerpadla. To samé platí i pro teplotu čistícího média, která je omezena rozsahem procesních teplot komponent fotobioreaktoru.

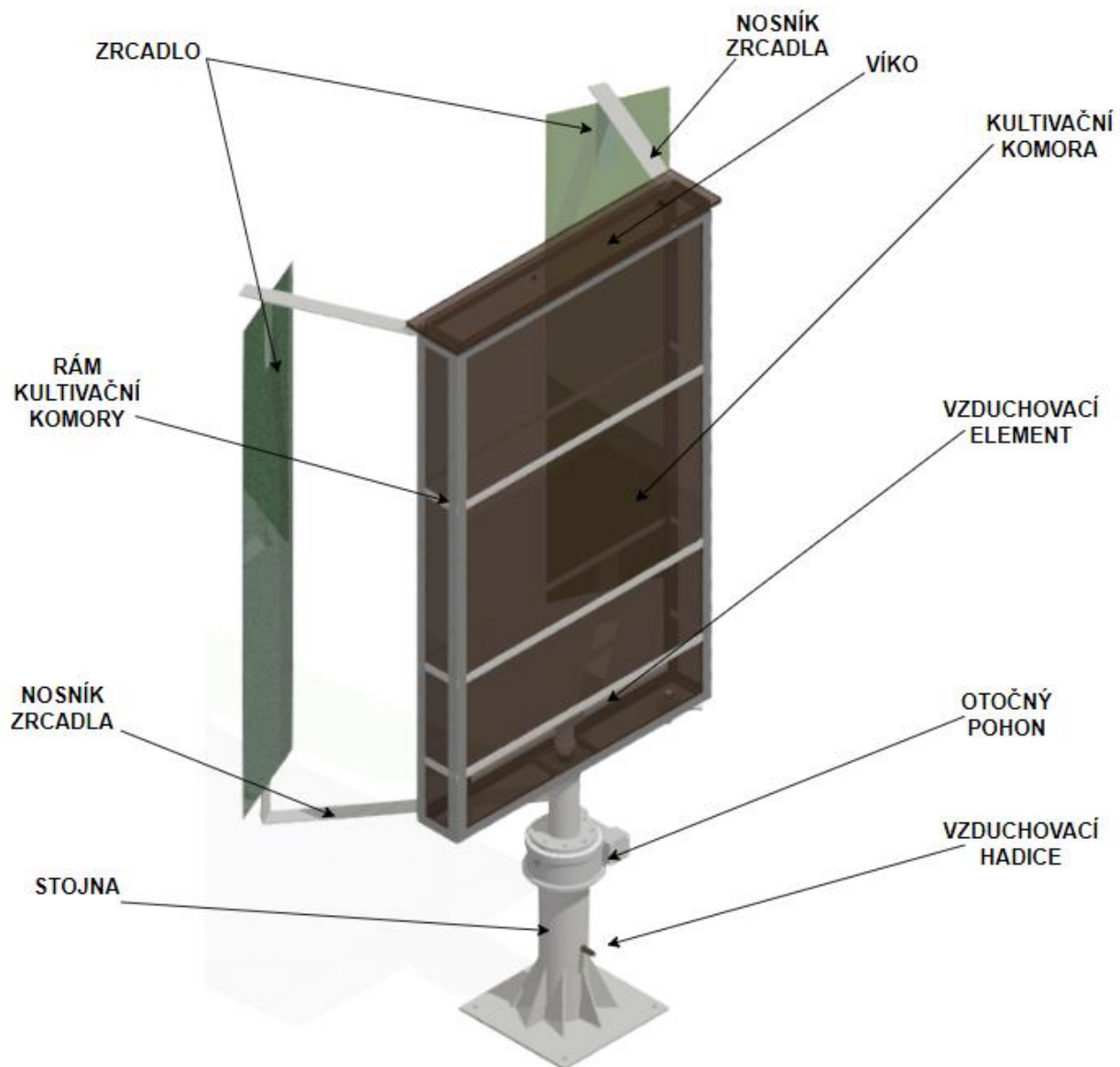


Obrázek 45 Sanitační kuličky [39]

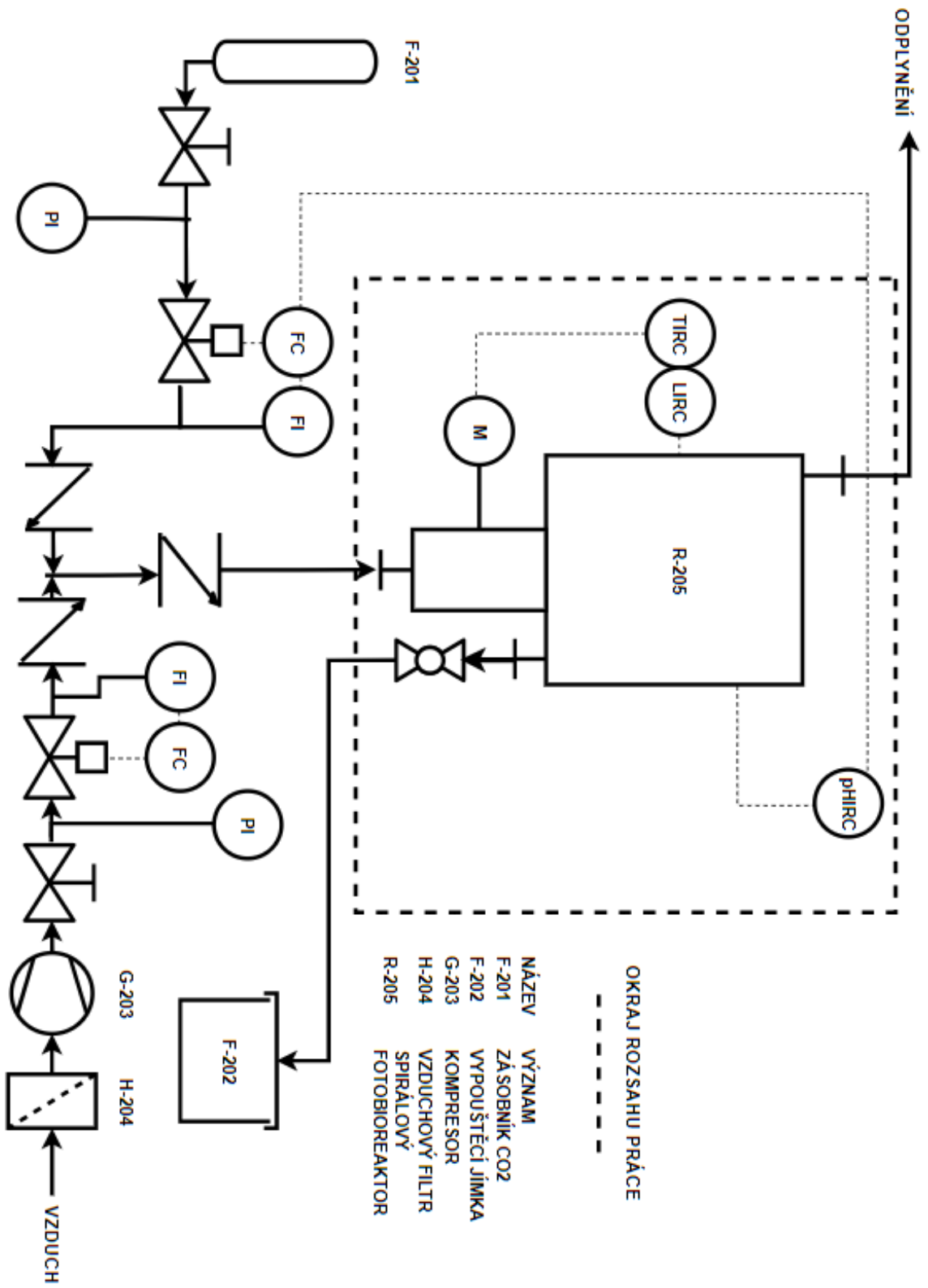
4.2 Otočná varianta

Navržený vsádkový otočný deskový fotobioreaktor, nacházející se na obrázku 46, má kultivační kapacitu 100 litrů. Je unikátní použitím otočného mechanismu, který umožňuje maximalizovat záření dopadající na povrch kultivační nádoby sledováním slunce a také instalací zrcadel umožňující osvětlení zadní strany nádoby. To dovoluje navýšení tloušťky kultivační komory a zároveň snížení zastavěné plochy zařízení i zmenšení výšky kultivační komory bez rizika vzniku tmavých zón. Navýšená tloušťka nádoby i částečná koncepce navrženého zařízení vychází z již úspěšně otestovaného řešení experimentálního otočného fotobioreaktoru popsaného v kapitole 4.4.2.

Další významné vylepšení oproti experimentálnímu fotobioreaktoru je přívod vzduchovací směsi skrz nosnou konstrukci a pohon zařízení přímo do spodní části komory fotobioreaktoru. Součástí fotobioreaktoru je také systém měření pH a teploty, který reguluje vzduchování média i případné odklonění desky fotobioreaktoru od slunce při přehřátí média nebo vysoké intenzitě slunečního osvětlení. Technologické schéma s popsanými proudy a jednotlivými aparáty zařízení se nachází na obrázku 47 a výkres zařízení je v příloze 002-001-S, 002-001 a 002-002.



Obrázek 46 3D model deskového fotobioreaktoru sledující slunce

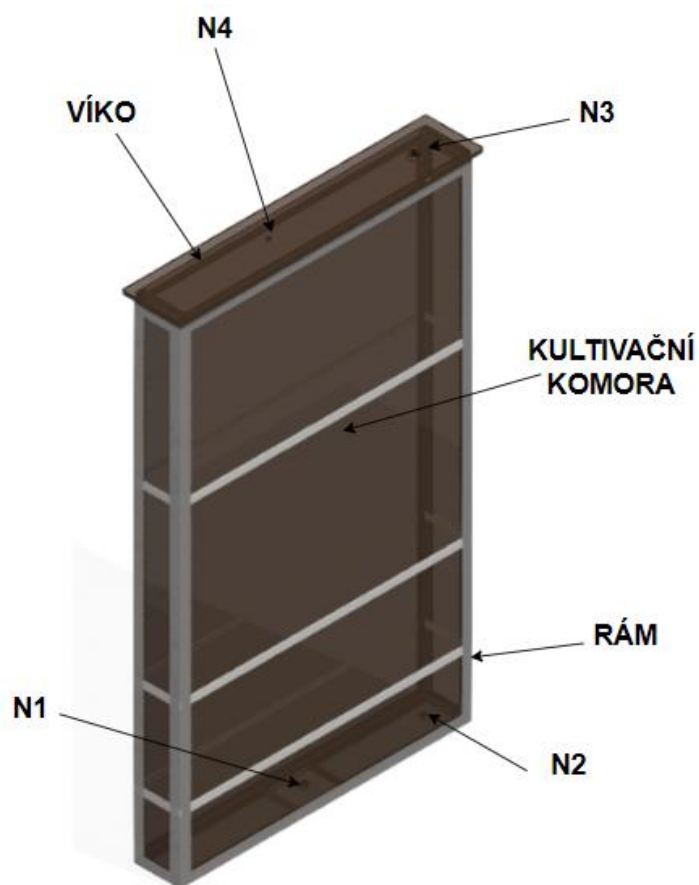


Obrázek 47 Technologické schéma deskového fotobioreaktoru

4.2.1 Kultivační komora

Celkový objem kultivační nádoby je zhruba 135 litrů, z toho 100 litrů připadá na objem kultivačního média. Kultivační nádoba zobrazená na obrázku 48 je vyrobena ze slepeného plexiskla, které je odolné vůči nárazům, korozi a degradaci způsobené ultrafialovým zářením. Komora je ve vrchní části vybavena odnímatelným víkem z plexiskla pro plnění komory kultivačním médiem a živinami. Ve víku jsou dvě díry pro připojení hadice či trubky odplyňující komoru a pro instalaci sond.

Schéma hrdel komory se nachází na obrázku 48, kde hrdlo N1 je určené k přívodu vzduchovací směsi, hrdlo N2 k vypuštění nádoby pomocí uzavíratelného kohoutu. Hrdlo N3 je určeno k odplynění a hrdlo N4 je určené k instalaci sondy. Součástí kultivační komory je i rám, do kterého se kultivační nádoba vsune z vrchu. Rám také zabraňuje průhybu kultivační komory. Rám je svařen z normalizovaných profilů typu L a normalizovaných tyčí obdélníkového průřezu.

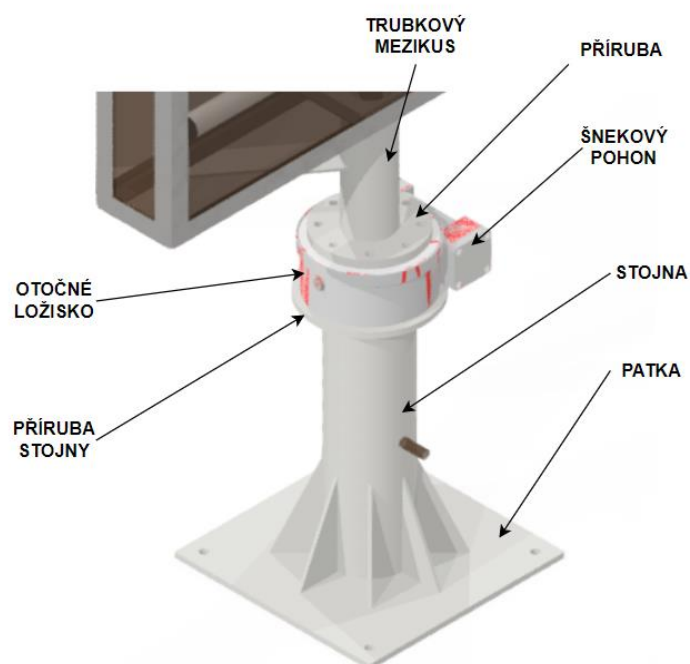


Obrázek 48 Kultivační komora

4.2.2 Otočný mechanismus

K otáčení kultivační komory a zrcadel je určeno otočné ložisko se šnekovým převodem TE160-Z1-RM od firmy TGB s elektrickým pohonem. Použití tohoto typu otočného mechanismu zaručuje spolehlivost a vysokou přesnost i při vysokých radiálních a axiálních zatížení. Mechanismus je zároveň odolný vůči vlivu okolí, kdy výrobce uvádí třídu krytí IP 65. Instalace pohonu k zařízení se realizuje pomocí přírub a šroubů. Nevýhodou tohoto mechanismu je pomalá rychlost otáčení, která je omezena na 1 otáčku za minutu pro malá zatížení. Pro vysoké zatížení dané diagramem limitního zatížení je rychlost otáček 0,02 otáčky za minutu. V případě limitního zatížení je doba jedné otáčky 50 minut. Rychlost rotace otočného mechanismu je se značnou rezervou dostačující i v případě limitního zatížení, protože pro sledování slunce v polárních oblastech je limitní rychlost jedné otáčky zhruba 24 hodin. Parametry otočného mechanismu včetně diagramu limitního zatížení a technického výkresu jsou umístěny v příloze.

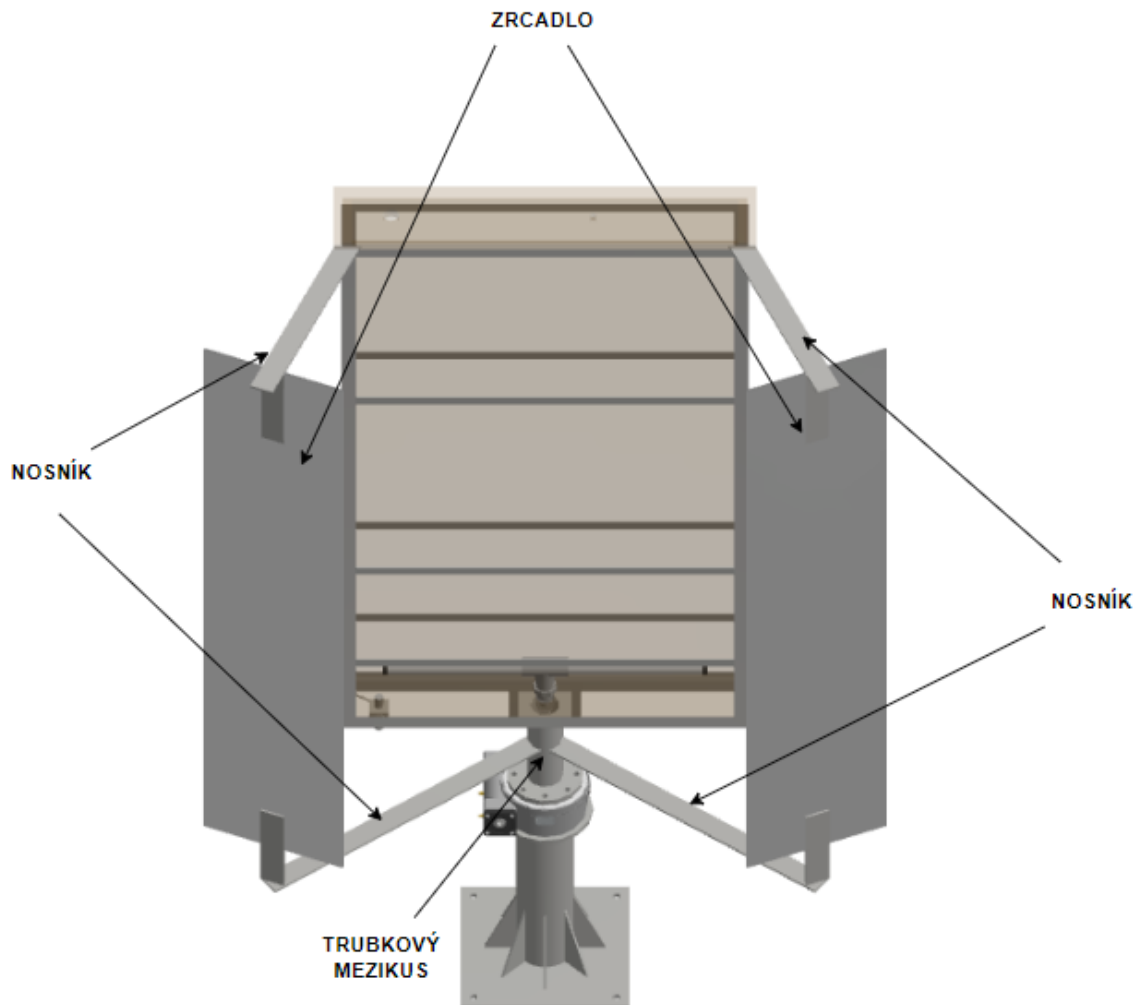
Instalace otočného mechanismu deskového fotobioreaktoru k podpěrné stojně a rámové konstrukci je znázorněna na obrázku 49. Otočné ložisko je zespoda připevněno šrouby k přírubě stojny, která je přivařena ke stojně ze silnostěnné trubky. Celá konstrukce je pak ukotvena patkou. Shora je otočné ložisko spojeno šrouby k přírubě, která je přivařena k trubkovému mezikusu. Trubkový mezikus je pevně spojen s rámem kultivační komory.



Obrázek 49 Podpěrná stojna a otočný mechanismus

4.2.3 Zrcadlo

Pomocí zrcadel, které se nacházejí na obrázku 50, je možné osvětlit i zadní plochu kultivační komory, a tím zvýšit její původní vnitřní tloušťku. Se zvětšením tloušťky se výrazně zvýší objem kultivovaného média, nebo je možné dosáhnout menší výšky a šířky zařízení při zachování původního objemu. Vyšší tloušťka komory umožňuje snadné mechanické čištění, které je pro malé tloušťky kultivační komory problematické a vyžaduje speciální nástroje.

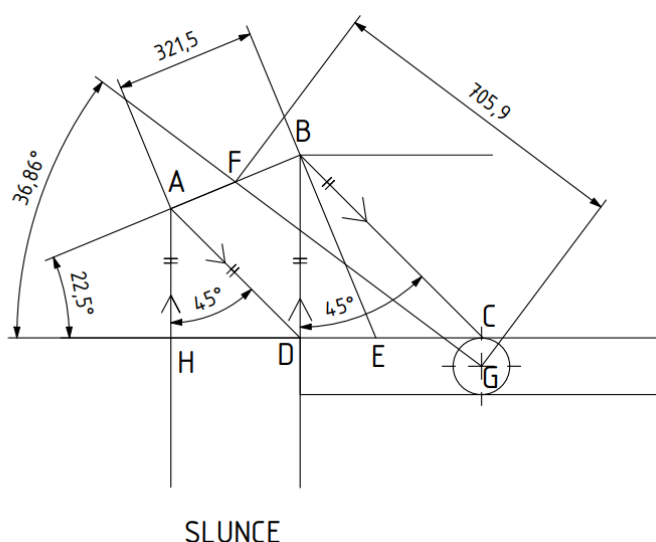


Obrázek 50 Konstrukce nesoucí zrcadla

Dvě zrcadla jsou umístěna na podpěrách, které jsou připevněné k trubkovému mezikusu a k rámu kultivační komory. To dovoluje zrcadlům rotovat současně s kultivační komorou. Zrcadla svírají konstantní úhel natočení mezi sluncem a zadní stěnou kultivační komory takovým způsobem, že každé zrcadlo ozařuje přesně jednu polovinu zadní stěny. Vhodně zvoleným umístěním zrcadel je možné předejít jejich stínění kultivační komorou. Vzdálenost zrcadel od vertikální osy rotace zařízení by neměla být příliš vysoká kvůli riziku

vibrací nebo problémům se stabilitou, která by způsobila nepřesný odraz světla od zrcadla nebo dokonce jeho poškození.

Popis geometrie usazení zrcadla fotobioreaktoru se nachází na obrázku 51. Úhel odrazu mezi rovinou zrcadla A-B a rovinou zadní desky komory C-D je zvolen jako 45° . Světelný paprsek dopadající na rovinu zrcadla putuje z bodu D do bodu B a z bodu B se odráží do bodu C. Z optické geometrie lze předpokládat, že rovina zrcadla leží kolmo na přímkou B-E označované jako kolmice odrazu. Se stejnou logikou se postupuje i v případě paprsku H-A-D. Rovina zrcadla leží mezi body A-B, kde bod F je střed zrcadla. Celková teoretická délka zrcadla činí 321,5 mm a střed zrcadla je od vertikální osy rotace, označené jako bod G, vzdálen o 705,9 mm. Úhel mezi rovinou desky C-D a středem zrcadla F činí $36,86^\circ$. Geometrie uspořádání zrcadel je možné optimalizovat změnou úhlu dopadu, vzdáleností středu zrcadla od osy otáčení nebo délkou zrcadla.



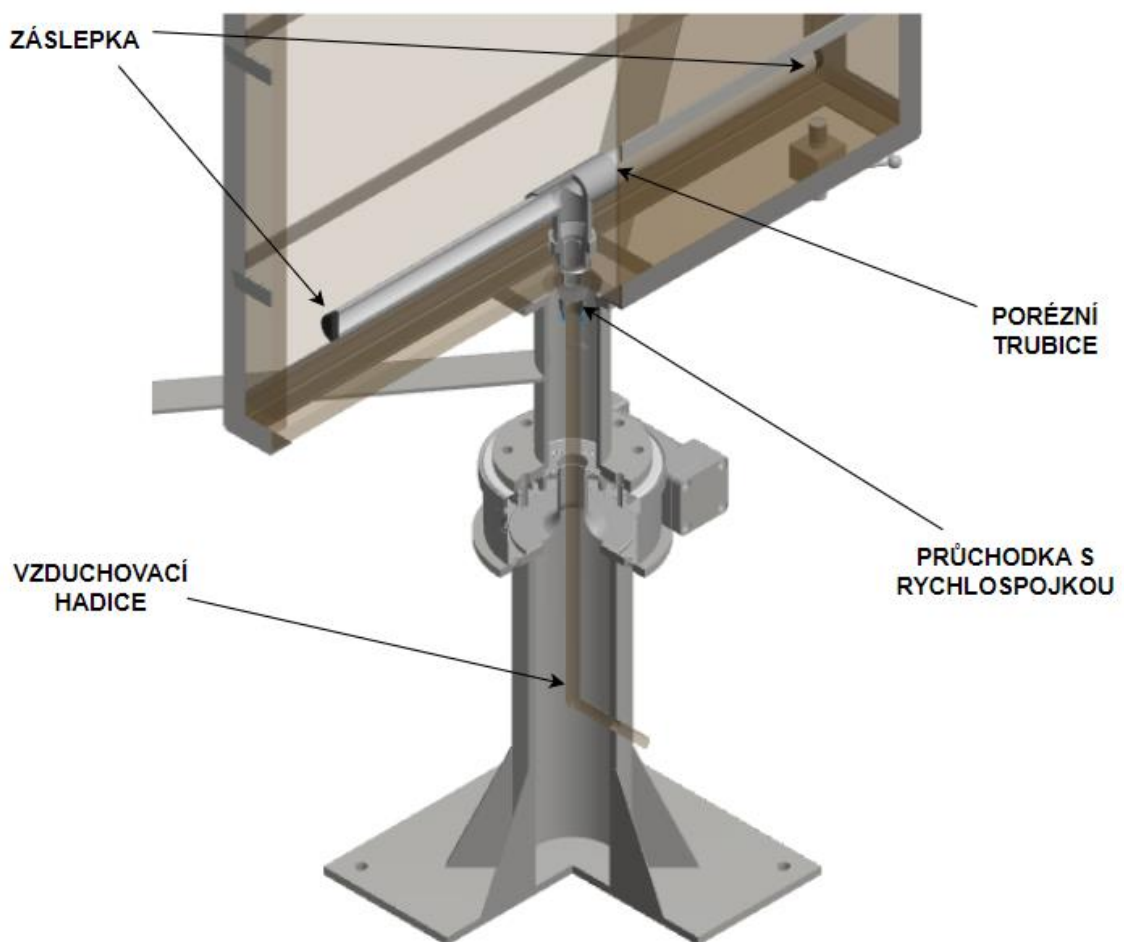
Obrázek 51 Trajektorie slunečních paprsků a natočení zrcadel

4.2.4 Vzduchování a míchání

K míchání vsádky je zvoleno míchání pomocí směsi vzduchu a CO_2 , která se přivádí do porézní trubice dnem komory. Proud bublin promíchává médium, dodává CO_2 a odvádí O_2 . Malý průměr vzduchových bublin je výhodný z hlediska delší doby zdržení i vyššího přestupu hmoty z důvodu většího mezifázového povrchu než v případě bublin o větším průměru. Nevýhodou je vysoké tečné namáhání buněk mikrořas od pohybu bublinek o rozměru blízcím se průměru buňky. To samé platí i v případě praskání bublinek vzduchovací směsi o velmi malých rozměrech blízcím se rozměru buněk v kultivačním médiu. To pak může mít za

následek inhibici růstu biomasy. Ideální průměry bublinek se pohybují v rozmezí několika milimetrů.

Instalace vzduchovacího elementu se skládá ze zaslepené porézní trubice, umístěné v kultivační komoře, která je pomocí průchodky skrz dno kultivační nádoby propojena rychlospojkou s hadicí vedoucí směs vzduchu obohacenou o CO₂. Spojení rychlospojky s hadicí dovoluje její otáčení v rozmezí 360°. Hadice prochází trubkovým mezikusem skrz centrální otvor uvnitř otočného ložiska, a poté je vyvedena skrz díru ve stojně ven. Vzduchovací element se nachází na obrázku 52.



Obrázek 52 Vzduchovací systém

Optimální ekonomicko-provozní hodnota uvažující energetickou náročnost provozu kompresoru vůči vyššímu nárůstu biomasy s vyššími průtoky je dle Zhang a kol. (2002) pro deskové fotobioreaktory $vvm_{optd} = 0,05 \text{ l l}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Zhang a kol. (2002) uvádí, že produktivita řas roste až do $vvm_{maxd} = 1 \text{ l l}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Z toho lze usoudit, že průtok aerační směsi deskovým

fotobioreaktorem je možné určit dle rovnice (15) a (16), kde $V_d = 100$ l je objem kultivačního média deskového fotobioreaktoru.

Průtok směsi vzduchu a CO_2 deskovým fotobioreaktorem je mezi $V_{optd}^* = 5$ l min^{-1} až $V_{maxd}^* = 100$ l min^{-1} . Z objemu aeračního plynu potřebného pro míchání směsi je možné zjistit průtok CO_2 do systému, který závisí na vlastnostech kultivovaného kmene a koncentraci biomasy a doby zdržení. Pokud se uvažuje, že požadovaná objemová koncentrace CO_2 v aerační směsi je $C_{\text{CO}_2d}^v = 5$ % objemových a požadovaný průtok je $V_d^* = 100$ l min^{-1} , tak je nutné přivádět do systému 95 litrů vzduchu za minutu. Objemový průtok CO_2 , který je nutný přivádět do systému, se získá z rovnice (17). Jeho hodnota činí $V_{\text{CO}_2d}^* = 5$ l min^{-1} při předpokladu zanedbání koncentrace CO_2 ve vzduchu.

$$V_{optd}^* = V_d * vvm_{optd} = 100 * 0,05 = 5 \text{ l min}^{-1} \quad (15)$$

$$V_{maxd}^* = V * vvm_{maxd} = 100 * 1 = 100 \text{ l min}^{-1} \quad (16)$$

$$V_{\text{CO}_2d}^* = V^* * C_{\text{CO}_2d}^v = 100 * 0,05 = 5 \text{ l min}^{-1} \quad (17)$$

4.2.5 Měření a regulace

Průběh kultivace je možné sledovat pomocí sond popsaných v kapitole 5.1.5. Deskový fotobioreaktor je vybavený sondou pro měření pH, která lze použít k řízení průtoku CO_2 . Sonda také zaznamenává teplotu, podle které se v případě přehřátí média řídí motor natáčející kultivační komoru. Ta se díky odklonění od slunce může ochladit. Pro prevenci fotoinhibice je součástí zařízení sonda měřící intenzitu slunečního záření dopadající na komoru fotobioreaktoru. V případě vysoké intenzity sonda vyšle signál, který komoru fotobioreaktoru odkloní od slunce. Řízení motoru sledující slunce a příjem dat ze sond je realizován pomocí programovatelného logického automatu (PLC), který řídí i probublávání kultivační komory regulací průtoku aeračních plynů. Výběr PLC a jeho umístění v sestavě deskového fotobioreaktoru není součástí této práce.

4.2.6 Čištění a sterilizace

Čištění a sanitace zařízení může probíhat použitím chemických a mechanických čisticích prostředků, které se do komory zavedou shora po odejmutí víka kultivační nádoby. Tloušťka kultivační nádoby umožňuje dosažení hlubokého dna, které je obtížně čistitelné pro malé tloušťky nádoby. K čištění nánosů biofoulingu na vnitřních stěnách kultivační komory je možné použít mechanického i hydraulického čištění tlakovým proudem vody. Stále je třeba dbát na rozsah odolnosti lepeného profilu z plexiskla zvolením vhodné metody čištění, která sterilizuje komoru, ale neporuší její celistvost a nepoškodí povrch kultivační komory. Zároveň je také nutné čistit vnější stěny deskové komory a zrcadla od prachu a jiných nečistot.

5 Závěr

Cílem diplomové práce je navrhnout poloproduční kultivační zařízení umožňující efektivní kultivaci mikrořas v extrémních klimatických podmínkách polárních oblastí a zimních měsíců ve střední Evropě. V rešeršní části práce je uvedena základní charakteristika a využití extremofilních mikrořas, které mohou rozšířit kultivační potenciál v klimatických podmínkách nevhodných ke kultivaci běžných kmenů. Z patentové a literární rešerše se na základě kritického vyhodnocení vybrala nejvhodnější stacionární a otočná varianta kultivačního zařízení.

První kultivační systém je stacionární spirálový trubkový fotobioreaktor. Druhý kultivační systém je deskový fotobioreaktor disponující otočným mechanismem, který otáčí kultivační komoru do optimální polohy. Oba kultivační systémy jsou koncipovány pro zpracování 100 l kultivačního média. Při návrhu je kladen důraz na robustnost konstrukce, která má odolávat extrémním klimatickým podmínkám a nepříznivým vnějším vlivům, jako je např. vlhkost, prašnost, větrné poryvy, sníh, déšť, nízké teploty, namrzání, koroze. Teplotní rozsahy konstrukčních prvků se pohybují mezi -10 °C až zhruba 60 °C, ale vlivem tuhnutí kultivačního média, které z většiny tvoří voda, je rozsah pracovních teplot omezen spodní teplotní hranicí na více než 0 °C. Při dlouhodobém trvání nižších teplot je doporučeno zařízení zakonzervovat.

Deskový fotobioreaktor je unikátní instalací zrcadel ozařující zadní stěnu kultivační komory. To zdvojnásobuje ozářenou plochu fotobioreaktoru, tím lze volit vyšší tloušťky kultivační komory, které vedou ke sníženým nárokům na zastavěnou plochu. Inovativní je také

přívod vzduchovacího média skrz pohonný systém do kultivační komory umožňující neomezené otáčení nádoby bez rizika poškození vzduchovací hadice.

Spirálový trubkový fotobioreaktor se skládá ze zádržné nádrže, hadicového čerpadla a kultivační trubkové části ve tvaru spirály. Ze zádržné nádrže, která je určena hlavně pro odplynění média, je kultivační médium nasáváno hadicovým čerpadlem. Čerpadlo pak šetrně dopraví kultivační médium do spirálové kultivační části, ze které médium vtéká zpět do zádržné nádoby. Spirálový design umožňuje ozáření potrubí během celého polárního dne. Dávkování CO₂ do kultivačního média probíhá mezi čerpadlem a kultivační částí v aeračním elementu z trubice a mikroporézních trysek.

V rámci basic designu se v práci nachází strojně technologické schéma, 3D model s popisem jednotlivých částí fotobioreaktoru a základní výpočty včetně návrhu míchání a vzduchování obou systémů. Součástí jsou také nároky na čištění a na měření a regulaci. Výkresová dokumentace obou variant je umístěna příloze.

Součástí další práce navazující na výsledky diplomové práce by mělo být vytvoření detail designu obou zařízení, jejich výroba a testování v extrémních podmínkách. V případě úspěšného testování je dalším krokem optimalizace výrobních a provozních nákladů. Zároveň je stále nutná izolace nových kmenů řas a stanovení optimálních růstových kultivačních parametrů, které umožňují vytvoření ekonomicky rentabilních kultivačních systémů designovaných přímo na míru dané řase.

6 Seznam literatury

- [1] V. Malavasi, S. Soru, G. Cao, Extremophile Microalgae: the potential for biotechnological application, *J. Phycol.* 56 (2020) 559–573. <https://doi.org/10.1111/jpy.12965>.
- [2] S. Michaels, The exciting future of wastewater. In: *lcsun-news.com* [online]. Las Cruces: Las Cruces Sun News. 2017-04-15 [accessed June 14, 2023]. Dostupné z: <https://eu.lcsun-news.com/story/news/2017/04/15/exciting-future-wastewater/100443872/>.
- [3] R.Y. Morita, *Psychrophilic Bacteria*, 39 (1975) 144–167.
- [4] E. Maréchal, L. Nedbalová, Editorial: Ice and Snow Algae, *Front. Plant Sci.* 13 (2022) 1–2. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.868467>.

- [5] R. Araújo, F. Vázquez Calderón, J. Sánchez López, I.C. Azevedo, A. Bruhn, S. Fluch, M. Garcia Tasende, F. Ghaderiardakani, T. Ilmjärv, M. Laurans, M. Mac Monagail, S. Mangini, C. Peteiro, C. Rebours, T. Stefansson, J. Ullmann, Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy, *Front. Mar. Sci.* 7 (2021) 1–24. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>.
- [6] M.S. Kuttiyathil, M.M. Mohamed, S. Al-Zuhair, Using microalgae for remediation of crude petroleum oil–water emulsions, *Biotechnol. Prog.* 37 (2021) 1–11. <https://doi.org/10.1002/btpr.3098>.
- [7] C.J. Hulatt, O. Berecz, E.S. Egeland, R.H. Wijffels, V. Kiron, Polar snow algae as a valuable source of lipids?, *Bioresour. Technol.* 235 (2017) 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.130>.
- [8] Polární den, (2022). https://cs.wikipedia.org/wiki/Polární_den (accessed June 14, 2023).
- [9] Scandinavia Weather and Precipitation Map, 2023. Travel-weather.net [online]. European Travel Weather [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.travel-weather.net/scandinavia/scandinavia-weather-map.html>
- [10] Climate of Canada, 2023. Britannica.com [online]. ©2023 Encyclopædia Britannica, 2023 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/place/Canada/Climate>
- [11] Arktida, 2022. Wikipedia.org [online]. Praha: Creative Commons, 2022 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Arktida>
- [12] M. Haines, A. Vadlamani, W. Daniel Loty Richardson, M. Strous, Pilot-scale outdoor trial of a cyanobacterial consortium at pH 11 in a photobioreactor at high latitude, *Bioresour. Technol.* 354 (2022) 127173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127173>.
- [13] 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>.
- [14] J. Doucha, K. Lívanský, Outdoor open thin-layer microalgal photobioreactor: Potential productivity, *J. Appl. Phycol.* 21 (2009) 111–117. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9336-2>.

- [15] 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>.
- [16] J.H. De Vree, *Outdoor microalgae production*, Wageningen University, 2016. <https://doi.org/10.18174/387236>.
- [17] F. Schoeters, J. Spit, R.N. Azizah, S. Van Miert, Pilot-Scale Cultivation of the Snow Alga *Chloromonas typhlos* in a Photobioreactor, *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10 (2022) 1–13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.896261>.
- [18] J. Masojídek, G. Torzillo, Mass Cultivation of Freshwater Microalgae, *Encycl. Ecol. Five-Volume Set.* (2008) 2226–2235. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00830-2>.
- [19] Y.D.S. Matabanchoy-Mesias, Y.A. Rodríguez-Caicedo, M.A. Imués-Figueroa, Population growth of *Chlorella* sp. in three types of tubular photobioreactors, under laboratory conditions, *AACL Bioflux.* 13 (2020) 2094–2106.
- [20] G. Vonshak, Avigad; Torzillo, *Environmental Stress Physiology*, in: *Handb. Microalgal Cult.*, Blackwell Publishing Ltd, 2007: pp. 57–82. <https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch4>.
- [21] 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>.
- [22] K. Šnokhous, *Optimalizace konstrukce deskového fotobioreaktoru pro kultivaci mikrořas v polárních klimatických podmínkách* [online]. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/96964>
- [23] WU JIUNN-CHI, LIN CHIH-KUANG, TUNG PI-CHENG, YAO WEI-HANN, NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY. SUN TRACKING METHOD AND SUN TRACKING SYSTEM [online]. Inventor: WU JIUNN-CHI, LIN CHIH-KUANG, TUNG PI-CHENG, YAO WEI-HANN. *Thaj-Wan.* US2012193512A1. 2012-08-02. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045557866/publication/US2012193512A1?q=US2012193512A1>.

[24] NATIONAL CHIAO TUNG UNIVERSITY, SUN TRACKING MECHANISM [online]. Inventor: CHANG EDWARD-YI, CHIENG WEI-HUA, JENG SHYR-LONG, CHENG STONE, LUE BINHAN, HSU YUANG MING, WU CHIH-CHIANG, SHIH CHING-WEI. Thaj-Wan. US2015128930A1. 2015-05-14. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/053042595/publication/US2015128930A1?q=US2015128930A1>.

[25] HUANG ZHONG, CHENGDU ZSUN SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPING CO., LTD.. CAM TURNTABLE, SUN-TRACKING DEVICE EQUIPPED WITH SAME AND CONTROL METHOD FOR THE DEVICE [online]. Inventor: WANG ZHONGQIANG. China. US2013133719A1. 2013-05-30. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/043104338/publication/US2013133719A1?q=US2013133719A1>.

[26] SICHUAN ZSUN SOLAR DEVELOPMENT CO., LTD.. Sun tracking device [online]. Inventor: HUANG ZHONG. China. CN204965199U. 2016-01-13. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/055060253/publication/CN204965199U?q=CN204965199U>.

[27] DONGGUAN INSTITUTE OF OPTOELECTRONICS PEKING UNIVERSITY. Automatic sun tracking photovoltaic power generation device and control method thereof [online]. Inventor: WANG ZHONGQIANG. China. CN103888047A. 2014-06-25. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/050956794/publication/CN103888047A?q=CN103888047A>.

[28] WANG CHAOXIA. Full-automatic sun tracking system [online]. Inventor: WANG ZHONGQIANG, WANG CHAOXIA. China. CN106873633A. 2017-06-20. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/059236352/publication/CN106873633A?q=CN106873633A>.

[29] ZHANG HONGWEI, Full-automatic sun-tracking systém [online]. Inventor: WANG ZHANG HONGWEI, CAO HUAJIE. China. CN106200687A. 2016-12-07. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z:

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057459918/publication/CN106200687A?q=CN106200687A>.

[30] ELM INC.. SUN-TRACKING PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEM [online]. Inventor: MIYAHARA TAKAKAZU, MIYAHARA TERUMASA. Japan. CN105075108A, JPWO2014163180A1, US2016020725A1, WO2014163180A1. 2016-01-21. [vid. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/051658467/publication/US2016020725A1?q=US2016020725A1>.

[31] J.U. Grobbelaar, Algal Nutrition – Mineral Nutrition, in: Handb. Microalgal Cult., Blackwell Publishing Ltd, 2007: pp. 95–115. <https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch6>.

[32] H. Norsker, M.J. Barbosa, M.H. Vermuë, R.H. Wijffels, On Energy Balance and Production Costs in Tubular and Flat Panel Photobioreactors, TATuP - Zeitschrift Für Tech. Theor. Und Prax. 21 (2012) 54–62. <https://doi.org/10.14512/tatup.21.1.54>.

[33] Součinitel ztráty třením, 2021. Wikipedia.org [online]. Creative Commons, 2021 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Součinitel_ztráty_třením

[34] Boyser FMP30 Peristaltic Pump, 2023. Northridgepumps.com [online]. West Bridgford: © North Ridge Pumps 2023, 2023 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: https://www.northridgepumps.com/p_231_boyser-fmp30-peristaltic-pump

[35] X. Cui, J. Yang, M. Cui, W. Zhang, J. Zhao, Comparative experiments of two novel tubular photobioreactors with an inner aerated tube for microalgal cultivation: Enhanced mass transfer and improved biomass yield, Algal Res. 58 (2021) 102364. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102364>.

[36] A. C.U., Ugwu ; H., Evaluation of the Mass Transfer Capacity of a Long Tubular Photobioreactor with Static Mixer and its Outdoor Performance with Microalgal Cultures, Trends Appl. Sci. Res. 6 (2011). <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.036>.

[37] In-line pH sonda/In-line pH senzor, 2023. Mt.com [online]. © METTLER TOLEDO, 2023 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: [https://www.mt.com/cz/cs/home/products/Process-Analytics/pH-probe/in-line-pH-probe.html?filter\[primární-](https://www.mt.com/cz/cs/home/products/Process-Analytics/pH-probe/in-line-pH-probe.html?filter[primární-)

média%2Faplikace]=Produkce%20ve%20farmacii%2Fpřirodních%20věděch&filter[primární-
médiá%2Faplikace]=Výroba%20potravin%20a%20nápojů

[38] PVC Jímka v T-Kuse 50mm, 2023. Macekasyn.cz [online]. ©MACEK A SYN s.r.o, 2023
[cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://eshop.macekasyn.cz/produkt-pvc-jimka-v-t-kuse-50mm-10628/4338>

[39] Sanitační kulička průměr 40 mm, 2023. Vinarskepotreby.cz [online]. © BS vinařské
potřeby, 2023 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.vinarskepotreby.cz/sanitacni-kulicka-prumer-40-mm.html>

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 Vertikální trubkový fotobioreaktor [16]	22
Obrázek 2 Horizontální trubkový fotobioreaktor [16]	23
Obrázek 3 Trubkový vertikální fotobioreaktor s trojúhelníkovým uspořádáním [17]	24
Obrázek 4 Spirálově vinutý fotobioreaktor [19]	25
Obrázek 5 Fotobioreaktor s kónicky vinutou spirálou [19]	25
Obrázek 6 Blokové schéma deskového fotobioreaktoru sledující slunce [21]	28
Obrázek 7 Deskový fotobioreaktor sledující slunce [21]	29
Obrázek 8 Experimentální deskový otočný fotobioreaktor [22]	30
Obrázek 9 Věžový systém sledující slunce US2012193512A1 [23]	31
Obrázek 10 Zařízení sledující slunce US2015128930A1 [24]	32
Obrázek 11 Věžový systém sledující slunce US2013133719A1 [25]	33
Obrázek 12 Pohonný systém patentu US2013133719A1 [25]	34
Obrázek 13 Věžový systém sledující slunce CN204965199U [26]	34
Obrázek 14 Otočný mechanismus [26]	35
Obrázek 15 Otočný mechanismus v řezu [26]	36
Obrázek 16 Otočné hydraulické zařízení [27]	37
Obrázek 17 Hydraulický mechanismus [27]	37
Obrázek 18 Systém vertikálního otáčení [27]	38
Obrázek 19 Hydraulicko-pneumatický otočný systém [28]	39
Obrázek 20 Pevná základna hydraulicko-pneumatického systému [28]	40

Obrázek 21 Systém se dvěma pneumatickými aktuátory [29]	41
Obrázek 22 Aktuátorový mechanismus [29]	42
Obrázek 23 Soustava otočných plošin [29]	42
Obrázek 24 Otočná kruhová plošina [30]	43
Obrázek 25 Půdorys kolejnice [30]	44
Obrázek 26 Půdorys nosných koleček [30]	44
Obrázek 27 Kolejnicové usazení varianty číslo 1 [30]	45
Obrázek 28 Kolejnicové usazení varianty číslo 2 [30]	45
Obrázek 29 Kolejnicové usazení varianty číslo 3 [30]	45
Obrázek 30 Ukotvení pojezdového kolečka k podstavě [30]	46
Obrázek 31 Pohon plošiny [30]	46
Obrázek 32 Příkladný mechanismus [30]	47
Obrázek 33 Technologické schéma spirálového fotobioreaktoru	53
Obrázek 34 3D model spirálového fotobioreaktoru	54
Obrázek 35 Spirálový fotobioreaktor	56
Obrázek 36 Svěrná spojka	56
Obrázek 37 Zádržná nádrž	57
Obrázek 38 3D model zádržné nádrže	58
Obrázek 39 3D model nosné konstrukce zádržné nádrže	58
Obrázek 40 Moodyho diagram [33]	60
Obrázek 41 Peristaltické čerpadlo [34]	62
Obrázek 42 3D model vzduchovacího elementu	63
Obrázek 43 Sonda měřící teplotu a pH [37]	65
Obrázek 44 Ukázka provedení jímky z T-trubice [38]	66
Obrázek 45 Sanitační kuličky [37]	67
Obrázek 46 3D model deskového fotobioreaktoru sledující slunce	68
Obrázek 47 Technologické schéma deskového fotobioreaktoru	69
Obrázek 48 Kultivační komora	70
Obrázek 49 Podpěrná stojna a otočný mechanismus	71
Obrázek 50 Konstrukce nesoucí zrcadla	72
Obrázek 51 Trajektorie slunečních paprsků a natočení zrcadel	73
Obrázek 52 Vzduchovací systém	74

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 Tlakové ztráty.....	62
-------------------------------	----

9 Seznam příloh

Příloha 1 Spirálový fotobioreaktor 001-001.....	
Příloha 2 Spirálový fotobioreaktor sestava 001-001-S.....	
Příloha 3 Zádržná nádrž 001-002	
Příloha 4 Kultivační komora 002-001	
Příloha 5 Deskový fotobioreaktor sestava 002-001-S.....	
Příloha 6 Boyser FMP-30 Datasheet.....	
Příloha 7 Katalog mikroporézniých trysek	
Příloha 8 Otočný mechanismus.....	
Příloha 9 Sonda.....	