

Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta
Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky



Agronomická
fakulta

Mendelova
univerzita
v Brně



Využití řas v bioplynových transformacích
Bakalářská práce

Vedoucí práce:
doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.

Vypracovala:
Petra Paroulková

BRNO 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Využití řas v bioplynových transformacích, vypracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....

podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Vítězovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Děkuji také Ing. Janu Chovancovi, za věcné připomínky, trpělivost a optimistický přístup při konzultacích. Dále bych ráda poděkovala RNDr. Kateřině Sukačové za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce.

ABSTRAKT

Ve své bakalářské práci se zabývám možnostmi využití řas v bioplynových transformacích. Na základě vědeckých studií zabývajících se úpravou bioplynu biologickými metodami, jsem se rozhodla prozkoumat tuto problematiku. Bioplyn je směs plynů skládající se z methanu CH_4 a oxidu uhličitého CO_2 a dalších nežádoucích příměsí jako je například sirovodík H_2S . Ten se spalováním mění na kyselinu sírovou, která působí korozivně na spalovací zařízení. Z tohoto důvodu jsem se zaměřila na schopnost řas snižovat nežádoucí koncentrace sirovodíku. Pro experiment jsem použila kulturu *Chlorella pyrenoidosa* Chick (IPPAS C2). Kulturu jsem nechala po dobu dvou týdnů proudit bioplyn. Z naměřených hodnot rozdílů CO_2 a O_2 je patrné, že vybraná kultura byla za daných podmínek schopna fotosyntézy, a tedy i růstu. Toto tvrzení deklaruje i růstová křivka hodnot optické hustoty. V průběhu měření nebyl zaznamenán úbytek koncentrace sirovodíku po aplikaci dané řasové kultury.

Klíčová slova: bioplyn, řasy, oxid uhličitý, methan, sirovodík, *Chlorella*

ABSTRACT

In my bachelor thesis I deal with the possibilities of use of algae in biogas transformations. I have decided to investigate this topic based on scientific studies dealing with treatment of biogas biological methods. Biogas is a mixture of gases consisting of methane CH_4 and carbon dioxide CO_2 and other undesirable impurities such as hydrogen sulfide H_2S . Hydrogen sulfide is converted by combustion into sulfuric acid which is corrosive to the combustion equipment. For this reason, I have focused on the ability of algae to reduce undesirable concentrations of hydrogen sulfide. For the experiment I used a culture of *Chlorella pyrenoidosa* Chick (IPPAS C2) and left it to aerate with biogas for the duration of two weeks. From the measured values of the differences between CO_2 and O_2 is noticeable, that the selected culture is capable of photosynthesis under certain conditions, and hence growth. This statement declares a growth curve values of the optical density. Decline of H_2S was not confirmed.

Key words: biogas, algae, carbon dioxide, methane, hydrogen sulfide, *Chlorella*

OBSAH:

ÚVOD 8

CÍL PRÁCE 10

1 LITERÁRNÍ PŘEHLED 11

1.1	Řasy	11
1.1.1	Charakteristika	11
1.1.2	Rozmnožování	12
1.1.3	Klasifikace	12
1.1.4	Mikrořasy	14
1.2	Kultivace	14
1.2.1	Masová produkce	15
1.2.2	Otevřené systémy	15
1.2.3	Uzavřené systémy	17
1.3	Produkce řas v ČR	18
1.4	Druhy kultivovaných řas	19
1.4.1	Rod Chlorella	19
1.4.2	Arthrospira platensis	19
1.4.3	Dunaliella	20
1.4.4	Haematococcus pluvalis	20
1.5	Možnosti využití řas	20
1.5.1	Řasy a člověk	20
1.5.2	Biopaliva	21
1.5.3	Čištění odpadních vod	22
1.5.4	Čištění spalin	22
1.6	Využití řas v bioplynových transformacích	23
1.6.1	Zdroj biomasy	23
1.6.2	Bioplyn	24
1.6.3	Čištění bioplynu	28

1.7	Limitující faktory pro použití v praxi	28
1.7.1	Kultivační parametry	28
1.7.2	Porovnání kultivačních systémů	30

2 MATERIÁL A METODIKA 31

3 VÝSLEDKY A DISKUZE 34

4 ZÁVĚR 40

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY: 42

ODBORNÁ LITERATURA: 42

INTERNETOVÉ ZDROJE: 45

SEZNAM OBRÁZKŮ 45

ÚVOD

Obavy z globálního oteplování a závislosti na ropě nabádají řadu odborníků ke studiu obnovitelných zdrojů energie. Mezi takové patří i dnes už velmi dobře známý bioplyn, který je získáván anaerobní fermentací organických látek. Často používanou vstupní surovinou pro výrobu bioplynu je kukuřičná siláž a cukrová řepa. Používáním energetických plodin nezvyšujeme množství oxidu uhličitého v atmosféře. Mluvíme o tzv. nulové bilanci CO_2 . To znamená, že uvolněné množství CO_2 spálením paliva (bioplynu), je spotřebováno pro růst dalších rostlin, které mohou být později použity také k výrobě energie. Jedná se o uzavřený cyklus koloběhu CO_2 . Nevýhodou používání energetických plodin je, že jsou pěstovány na úrodných zemědělských plochách, na kterých by měly být přednostně pěstovány rostliny pro potravinářský průmysl.

Tuto situaci by mohly vyřešit řasy, které jsou lidmi využívány již od nepaměti. Nejčastěji jsou aplikovány jako hnojivo, krmivo, potravina či terapeutika. Komerční produkce řas začala teprve v druhé polovině 20. století. Důvodem bylo široké spektrum jejich uplatnění, a to nejen v potravinářském průmyslu, ale i v dalších odvětvích. Příkladem je i integrovaný systém navržený Goelukem a Oswaldem v USA v roce 1960. Systém sloužil pro zlepšení kvality odpadních vod. Vzniklá biomasa byla následně využita ve fermentačních zařízeních pro výrobu methanu. Takové využití řas, jako zdroje obnovitelné energie, vyvolalo vlnu obrovského zájmu, neboť v 70. letech došlo k první ropné krizi (Sialve et al. 2005).

Hlavní předností řas je jejich schopnost růst téměř všude, kde je dostatečné množství světla. Pro jejich kultivaci není ani zapotřebí velká zemědělská plocha jako je tomu u řepky či kukuřice. Mohou být získávány z kultivačních zařízení, z rybníků či dokonce z čistíren odpadních vod, kde sehrávaly významnou roli při čištění odpadních vod. Mezi další výhody řas patří jejich všestrannost použití. Lze je využít nejen jako substrát pro výrobu bioplynu, ale i jako biologický filtrační systém pro odstranění nežádoucích složek samotného bioplynu. Bioplyn je pro získání tepelné a elektrické energie nejčastěji spalován v kogeneračních jednotkách. Pro využití bioplynu jako pohonné hmoty vozidel nebo jako náhrada zemního plynu, je nutné, aby bioplyn obsahoval více než 97 % methanu. Proto je zapotřebí bioplyn upravit a zbavit nežádoucích složek jako je CO_2 a H_2S . Nejčastěji jsou k tomuto využívány fyzikální, fyzikálně – chemické nebo biologické metody. Technologie pro zvyšování kvality bioplynu však mohou být poměrně náklad-

né, zejména technologie pro odstranění oxidu uhličitého. Tyto technologie by mohly být nahrazeny ekologicky přívětivějšími řasovými filtracemi, které za pomoci probíhající fotosyntézy dokáží odstranit CO₂ a podle některých studií i H₂S.

CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat a zhodnotit současný stav využití řas zejména v oblastech zabývajících se zvyšováním kvality bioplynu. Krátce charakterizovat nejčastěji využívané druhy pro komerční produkci a popsat používané kultivační systémy. Dále se bude práce zabývat faktory, které omezují používání řas v praxi a brání jejich expanzi a uchycení se na trhu. V praktické části pak bude ověřována možnost využití řas pro odstranění nežádoucích látek z bioplynu.

1 LITERÁRNÍ PŘEHLED

1.1 Řasy

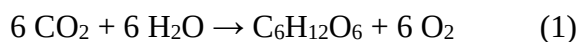
1.1.1 Charakteristika

Řasy jsou morfologicky různorodé organismy spadající do podříše nižších rostlin. Jedná se o jednobuněčné či vícebuněčné primárně autotrofní organismy fotosyntézou produkující kyslík. Tyto organismy se od sebe mohou lišit nejen stavbou buňky, velikostí, tvarem ale i obsahem akcesorických barviv. Jejich výskyt je většinou nerozlučně spjat s vodou, kterou je pokryto více než 70 % povrchu Země. Lze je tedy nalézt ve všech klimatických pásmech. Můžeme je najít v oceánech, v řekách či dokonce na kmenech stromů, kde vystupují jako symbiotické organismy. V přírodě hrají nezastupitelnou roli jako producenti organické hmoty a kyslíku. Vylučovaný kyslík okysličuje vodní prostředí a tím umožňuje dýchání živočichů (ŠPAČEK, 1999; JANKOVSKÝ, 1997).

Fotosyntéza

Fotosyntéza patří k jednomu z nejstarších procesů podílejících se na životním prostředí Země. Poskytuje základ pro všechny aerobní formy života. Z fyzikálního hlediska se jedná o přeměnu energie slunečního záření na energii chemickou. Jde o velmi složitý endergonický děj. Základem pro fotosyntézu jsou jednoduché anorganické látky o nízké energii a voda, které se za pomoci sluneční energie přemění na organické látky o vysoké energii (sacharidy) a uvolní se molekuly kyslíku (ZHANG, 2015; KÁRA, 2007).

Fotosyntézu lze zapsat sumární rovnicí:



Fotosyntéza je děj probíhající ve dvou po sobě jdoucích fázích. Primární světelné, která probíhá jen za přítomnosti světla, a sekundární temnostní, která probíhá i bez přítomnosti světla.

Světelná fáze je fotochemický děj, ve kterém dochází k přeměně fotonů slunečního záření na energii chemickou. Nejprve fotoreceptory (chlorofyl *a* a chlorofyl *b*, činnost chlorofylů často doplňují karotenoidy) absorbují záření, které následně fotosyntetickým reakčním centrem přemění na energii elektrickou. Dochází tedy k excitaci elektronů fotoreceptoru díky absorbovanému záření. Následně se za pomoci řetězce oxidoreduktáz přeměňuje energie excitovaných elektronů na energii chemickou.

Fáze temnostní probíhá paralelně s fází světelnou, a to nezávisle na světle. V této fázi dochází k ukládání chemické energie získané ve světelné fázi (ve formě NADPH a ATP) fixací CO₂ do sacharidů. Jsou známy tři cykly fixace CO₂ – Calvinův, Hatch-Slackův a CAM cyklus (KÁRA, 2007).

1.1.2 Rozmnožování

Řasy se reprodukují různými typy. Prvním způsobem množení řas je vegetativní, kdy dochází u jednobuněčných řas k rozpadu kolonií a u mnohobuněčných řas k fragmentaci mnohobuněčné stěny. Nedochozí však k redukci počtu chromozomů. Dalším způsobem je nepohlavní rozmnožování. V tomto případě dochází ke vzniku nepohlavních buněk – spor. Ty mohou být pohyblivé – zoospory nebo nepohyblivé – aplanospory. Poslední typem množení je pohlavní. Vytváří se pohlavní buňky (gamety) v pohlavních orgánech (gametangích). Splynutím těchto buněk vzniká nový jedinec (JANKOVSKÝ, 1997).

1.1.3 Klasifikace

Řasy byly donedávna tříděny na základě obsahu pigmentů, přítomnosti chlorofylů či obsahu zásobních látek. Díky novějšímu třídění řasy dělíme do 9 oddělení:

Glaucophyta

Jsou to sladkovodní organismy. Obsahuje v sobě endosymbioticky žijící sinice – cyaneoly. Sinice zde fungují jako fotosyntetický aparát (www.sci.muni.cz).

Rhodophyta– ruduchy

Je známo asi 4000 druhů. Vyživují se převážně autotrofně. Existují druhy, které jsou druhotně heterotrofní paraziti na jiných ruduchách. Vyskytují se převážně v teplých mořích a to v hloubkách až do 200 metrů. Většinou však žijí přisedle na kamenech či rostu na větších řasách. Charakteristické červené zbarvení je zapříčiněno výskytem akcesorického pigmentu fykoerytrinu. Mohou mít i jiné zbarvení, například modrozelené. Záleží na poměru barviv. Ruduchy obsahují chlorofyl *a* a *d* (ŠPAČEK, 1999; JANKOVSKÝ, 1997).

Dinophyta– obrněnky

Obrněnky jsou jednotlivě žijící organismy s dvěma nestejně dlouhými bičíky. Jsou hlavní složkou rostlinného planktonu v oceánech. Některé druhy vylučují do moře toxi-

ny způsobující otravu ryb. Chloroplasty obsahují chlorofyl *a*. Jsou druhy, u nichž se vyskytuje ale i chlorofyl *c*. Obrněnky mohou být žlutozelené až načervenalé (ŠPAČEK, 1999).

Cryptophyta–skrytěnky

Původně byly řazeny mezi obrněnky. Jsou to jednobuněční bičíkovci s dorziventrální stavbou těla. Mohou být hnědé, modrozelené či dokonce bezbarvé. Nejčastěji se vyskytují ve sladkých vodách. Obsahují chlorofyl *a* i *c* (ŠPAČEK, 1999).

Heterokontophyta – Chromophyta

Tyto stélkaté organismy bývají zbarveny žlutě či žlutohnědě, neboť akcesorická barviva překrývají chlorofyl *a* nebo *c*. Obsahují dva bičíky. Delší slouží k pohybu dopředu a kratší hladký bičík směřuje dozadu (www.sci.muni.cz).

Prymnesiophyta – Haptophyta

Má dva stejně dlouhé bičíky sloužící k pohybu. Mezi nimi je vlákno haptonema sloužící jako přichytný orgán. Vyskytují se ve sladkých i slaných vodách. Většina druhů se však vyskytuje jako součást mořského planktonu. Živí se fototrofně i fagotrofně (ŠPAČEK, 1999).

Euglenophyta – Krásnoočka

Jsou to jednobuněčné bičíkaté organismy bez buněčné stěny. Některé se dokáží pohybovat pouze změnou tvaru svého těla. Mnohé druhy mají červenou oční skvrnu – stigma, díky které jsou schopny vnímat sluneční záření. Nejčastěji se vyskytují ve sladkých vodách. Rozmnožují se podélným dělením. Jejich přemnožení způsobuje zbarvení vody do zelena či do červena (ŠPAČEK, 1999).

Chlorophyta– Zelené řasy

Tato skupina řas se řadí mezi vývojově nejsložitější organismy, ze kterých se postupně vyvinuly vyšší zelené rostliny. Obvykle mají 2-4 stejně velké bičíky. Mimo chlorofyl *a* obsahují i chlorofyl *b*. V chloroplastu se vyskytuje velmi důležitá zásobní látka škrob. (JANKOVSKÝ, 1997) Významným zástupcem tohoto oddílu je *Chlorella* neboli Zeleňka. Její buňky mají kulovitý či oválný tvar. Vyskytuje se jak jednotlivě, tak i

ve shlucích ve sladkých vodách. Velmi často se používá jako modelový organismus, na kterém se provádí pokusy při modelových kultivacích (ŠPAČEK, 1999).

Chlorarachniophyta

Jedná se o velmi odlišné oddělení v porovnání s doposud jmenovanými. Tento organismus se vyskytuje v teplých mořích. Obsahuje chlorofyl *a* i *b*. Bylo dokázáno, že jsou schopny požít i drobné bičíkovce či rozsivky (www.sci.muni.cz; www.sinicearasy.cz).

1.1.4 Mikrořasy

Mikrořasy jsou jednobuněčné organismy v řádech mikrometrů. Jedná se o prokaryotní sinice a eukaryotní řasy. Nejmenší známou mikrořasou je jednobuněčná mořská sinice *Prochlorococcus*, která má v průměru méně než 1 mikrometr. Jsou to fotosyntetizující organismy, které se před více než 2,5 miliardami let začaly podílet na tvorbě kyslíku na Zemi. Vyvinuly se ve velmi rozmanitou skupinu vyskytující se téměř na všech místech světa (MASOJÍDEK et al. 2016). Na základně požadavků na výživu mohou být rozděleny do tří tříd: autotrofní, heterotrofní a mixotrofní. Autotrofní organismy vytvářejí z energeticky chudých anorganických látek organické látky bohaté na energii. Zdrojem je CO₂, který je nejčastěji získáván fotosyntézou doprovázenou s uvolněním kyslíku. Heterotrofní organismy jsou nezávislé na fotosyntéze, neboť jsou schopny přijímat organické látky jako je glukosa či glycerol, ze kterých dokáží získávat uhlík a energii pro jejich život. Mixotrofní organismy jsou schopny přijímat uhlík jak autotrofně fotosyntézou, tak stejně dobře i heterotrofně z organických látek (MIYAWAKI et. al. 2013).

1.2 Kultivace

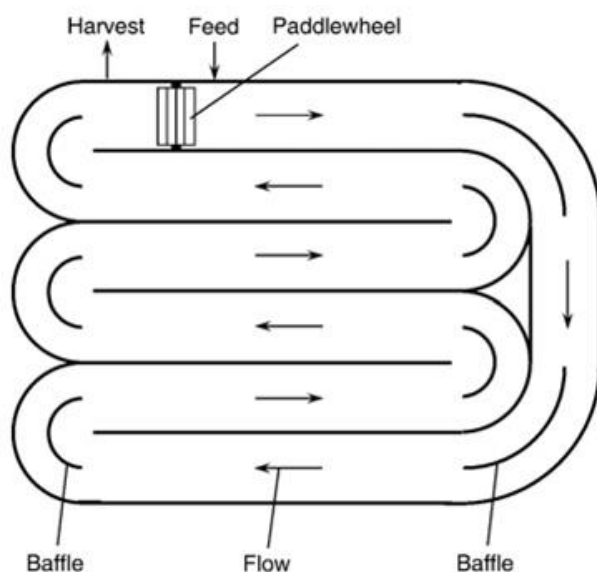
Umělé pěstování řas se využívá pro produkci organického materiálu, po kterém je na trhu velká poptávka. Dají se využívat nejen v medicíně, v potravinářství ale i v průmyslu. Řasy ke svému růstu potřebují vodní prostředí a dostatek sluneční energie, díky které dochází k procesu zvanému fotosyntéza. Díky tomu, že nekladou vysoké nároky na kvalitu vody, mohou se pěstovat i v odpadních vodách z průmyslových procesů (www.oilgae.com).

1.2.1 Masová produkce

Kultivaci ve venkovních nádržích zpravidla předchází příprava v laboratořích, kde se kultivuje startovací kultura neboli inokulum. Inokulum se připravuje ve skleněných válcích o objemech 0,5–10 dm³. Tyto skleněné nádoby jsou ve vodní lázni osvětlovány a probublávány vzduchem s přidaným CO₂. Příprava inokula je dlouhodobý proces, který trvá několik týdnů. Před přenesením inokula do větší nádrže musí dojít k jeho naředění, a to asi o 1 řád. Větší naředění by mohlo způsobit fotoinhibici celé doposud vypěstované kultury. Aby se jí předcházelo, je nutné udržovat ve venkovních nádržích správné množství biomasy. To je v rozmezí 5–10 g·m⁻² (to je asi 100–200 mg·m⁻² chlorofylu) (MASOJÍDEK et al. 2016).

1.2.2 Otevřené systémy

Komerční produkce biomasy ve velkém měřítku vyžadující velkoobjemové systémy o velikosti od 10 000 až do více než 1 000 000 litrů nejčastěji využívá otevřené systémy. Důvodem je ekonomická stránka. Otevřené systémy na rozdíl od fotobioreaktorů využívají sluneční energie. Velkoplošné systémy jsou většinou z důvodu příznivých světelných a tepelných podmínek situovány do tropických či subtropických oblastí s nízkým úhrnem srážek a malou oblačností. V těchto pásmech tak hrozí menší riziko nechtěného naředění kultury. Nevýhodou otevřených systémů je možnost kontaminace způsobené vnějšími vlivy. Další nepříznivou skutečností je, že v takových nádržích smí být kultivováno jen omezené množství druhů biomasy. Mimo jiné, každý z těchto druhů vyžadující světlo a oxid uhličitý má ještě své vlastní specifické požadavky (ANDERSEN, 2005; BOROWITZKA, 1999).



Obr. 1: schéma kultivace řas v otevřených systémech (www.e-education.psu.edu)

Velké, rozsáhlé nádrže

Tyto nádrže nebývají již promíchávány. Jsou využívány v Austrálii pro pěstování *D.sallina*. Nevýhodou je, že pro většinu jiných druhů není tento typ vhodný. Nádrže mohou mít rozlohu 10 000 m², ale i více než 2·10⁶ m². Hloubka je v rozmezí 20–30 cm. *D.salina* roste ve velmi slaném prostředí, což znamená, že kontaminace nádrže může být kontrolována pouze udržováním vysoké salinity. Tento typ vyžaduje optimální podmínky, čímž se rozumí malé množství srážek nebo nízká oblačnost (ANDERSEN, 2005).

Hluboké nádrže

Hluboké nádrže jsou většinou používány pro menší produkci řas. Slouží pro kultivaci mořský řas, jako je například *Nannochloropsis* sp. Nádrže mají plochu nejvýše 10 m² a hloubku 50 cm. Tyto nádrže bývají již promíchávány – provzdušňovány. Ačkoliv se jedná o neefektivní systém, bývají v oblibě díky nízkým nákladům na provoz (ANDERSEN, 2005).

Kruhové nádrže

Jsou opatřeny centrálně rotujícím míchadlem. V Japonsku a na Taiwanu se využívají pro kultivaci *Chlorelly* sp. Tyto kruhové nádrže jsou hluboké 30 cm s plochou přibližně 10 000 m². Jsou založeny na podobném principu, jako jsou nádrže určené pro čištění odpadních vod (ANDERSEN, 2005).

Samostatné obdélníkové nádrže

Jedná se o nejrozšířenější typ sloužící pro produkci řas *Spirulina* sp., *Dunaliella salina* a *Haematococcus*. Nádrž o hloubce 20–30 cm a ploše 10 000 m² představuje nejefektivnější kultivaci řas (ANDERSEN, 2005).

Spojené obdélníkové nádrže s krouživými lopatkami

Používání těchto nádrží pro komerční účely není vhodné. Pomalé proudění kultury vede ke vzniku málo kvalitní biomasy řas. Produkce z celého kultivačního systému bývá malá, a navíc se zde hůře předchází možným kontaminacím. Proto se spíše používá na zpracování odpadních vod a také na některých místech na produkci řasy *Spirulina* jako živočišné potravy. Plochy těchto nádrží jsou 10 000 m² a více (ANDERSEN, 2005).

1.2.3 Uzavřené systémy

Uzavřené systémy se využívají pro produkci řas s vysokými nároky na kultivační podmínky. K tomu se používají fotobioreaktory, které mohou být uzavřené nebo polouzavřené. Nabídka fotobioreaktorů je obrovská. Různé typy se liší především požadavky použitého kmene, účelem kultivace nebo místem kde bude zařízení umístěno. Ačkoliv mluvíme o zařízení mnohem nákladnějším na provoz, je zde dosahováno daleko vyšší hustoty biomasy díky lépe nastavitelným podmínkám a lepšímu provzdušňování. Příkladem takového fotobioreaktoru může být i velký průhledný vak, který je naplněn inkulem a provzdušňován vzduchem s přidaným oxidem uhličitým. Fotobioreaktory mohou být dále tvořeny systémem trubic či plochých panelů, vyrobených ze skel nebo odolných plastů stočených do smyček uspořádaných vodorovně nebo svisle vedle sebe. Nevýhodou těchto systémů může být obtížné čištění. Materiál může vlivem světelného záření degradovat. Zařízení musí být chlazeno a zbavováno kyslíku, aby nedošlo k inhibici fotosyntézy (MASOJÍDEK et al. 2016). Způsob kultivace v uzavřených systémech může být heterotrofní, fotoautotrofní nebo mixotrofní.



Obr. 2: uzavřený systém pro kultivaci řas (www.gaet.gicon.com)

1.3 Produkce řas v ČR

Největší pracoviště zabývající se výzkumem řas v České republice je Algatech – Centrum řasových biotechnologií. Patří mezi světově uznávaná pracoviště základního a aplikovaného výzkumu mikroskopických řas, sinic a fotosyntetických bakterií, včetně vývoje řasových biotechnologií. Centrum Algatech má k dispozici jedinečnou tenkovrstevnou kultivační jednotku pro autotrofní kultivace a biotechnologickou halu pro heterotrofní kultivace mikroskopických řas. Dále je vybaveno zařízením pro zpracování řasové biomasy. Centrum má celkem 4 vědecká oddělení zabývající se fotosyntézou, buněčnými cykly řas, řasovou biotechnologií a anoxygenními fototrofy (www.alga.cz).

Centrum Algatech, mající poměrně dlouhou historii, se nachází v rekonstruovaném Opatovickém mlýně, kde docházelo k prvním experimentům zabývajících se velkoplošným pěstováním řas pro komerční použití. Vznikly zde celosvětově známé kaskádovité jednotky treboňského typu. Výhodou těchto jednotek bylo, že řasy mohly růst v poměrně malé hloubce 1–5 cm. To zajišťovalo dostatečnou intenzitu osvětlení buněk a zároveň dobrou výměnu plynů na rozdíl od přirozeného způsobu pěstování v rybnících, kde řasy rostou v hloubce

20–30 cm. Kaskádovité jednotky nesené na ocelové konstrukci byly vyrobeny ze skla a instalovány ve sklonu 3 %. Na povrchu byly použity příčky o výšce 3,5 cm ve vzdálenosti 15 cm. Suspenze řas protékala přes den rychlostí $7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ za pomoci axiálního čerpadla. Přes noc byla zadržována v retenční nádrži, aby nedocházelo k tepelným ztrátám. Pokud docházelo ke srážkám, které by mohly způsobit nechtěné naředění suspenze

dešťovou vodou, bylo využíváno zadržení řasové kultury v retenční nádrži i ve dne (www.alga.cz; MASOJÍDEK a PRÁŠIL, 2010).



Obr. 3: kaskádovitá jednotka pro venkovní kultivaci řas (www.alga.cz)

1.4 Druhy kultivovaných řas

Komerční produkce řas je téměř již přes 30 let starou záležitostí. Nejčastěji pěstovanými druhy jsou *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Spirulina*, *Dunaliella*, *Haematococcuspluvalis*.

1.4.1 Rod *Chlorella*

Jedná se o kosmopolitně rozšířenou jednobuněčnou mikroskopickou řasu. Velikost buňky je 3–8 μm . Většina kmenů tohoto rodu je schopna růst v rozmezí teplot 15–40 °C. *Chlorella* sp. je schopna růst autotrofně a stejně tak dobře i heterotrofně či mixotrofně. Nejčastější způsob pěstování je autotrofní v otevřených nádržích, nakloněných kaskádách či v polouzavřených fotobioreaktorech. Pro svůj obsah vitamínů, karotenoidů, polysacharidů, proteinů a dalších prospěšných látek, je široce využívána v potravinářském, farmaceutickém a kosmetickém průmyslu (MASOJÍDEK et al. 2016).

1.4.2 *Arthrospiraplatensis*

Arthrospiraplatensis nebo také *Spirulina* je rod vláknitých sinic skládajících se ze samostatných buněk o průměru průměru 3–4 μm délce 50–500 μm . Jejich přirozeným prostředím jsou alkalická jezera vyskytující se v tropickém a subtropickém pásmu. Rostou při teplotách okolo 35 °C. Pro komerční využití se pěstuje v mělkých rybnících nebo

v polouzavřených fotobioreaktorech při pH větším než 9. Vypěstovaná biomasa se používá jako doplněk stravy s obsahem proteinů, vitamínů, minerálů a jinými výživovými složkami (MASOJÍDEK et al. 2016).

1.4.3 *Dunaliella*

Buňky těchto mikrořas mají vejčitý tvar a jsou v průměru 10 µm velké. Vyskytují se ve slaných vodách. *Dunaliella* je velmi atraktivní zejména kvůli vysokému obsahu β-karotenu. Pěstuje se v otevřených mělkých rybnících při teplotě 30 °C (MASOJÍDEK et al. 2016).

1.4.4 *Haematococcuspluvialis*

Jedná se o sladkovodní druh známý převážně kvůli oranžovo-červenému pigmentu astaxanthinu, který produkuje při stresových podmínkách. Astaxanthin se používá jako pigment či antioxidant. Hojně se používá v chovech lososů pro zbarvení svaloviny (MASOJÍDEK et al. 2016).

1.5 Možnosti využití řas

Využívání řas pro potřebu lidské společnosti není dnes na světě již žádnou novinkou. Myšlenka takového využívání k získávání rozličných produktů z řas nabyla své opodstatnění zejména se snižujícími se zásobami ropy a se zvyšující se četností projevů globálního oteplování. Mezi stěžejní výhody řas patří jednak jejich všestrannost ale i schopnost se rychle rozmnožovat. Díky těmto vlastnostem se s nimi můžeme setkat v různých odvětvích průmyslu.

1.5.1 Řasy a člověk

Jedno z prvních odvětví, kde mikrořasy získaly své uplatnění, je potravinářský průmysl. S ohledem na striktnost bezpečnostních předpisů potravin se výběr vhodných druhů řas limituje jen na některé druhy. Mezi nejpoužívanějšími jsou *Chlorella* sp., *Spirulina* sp. a *Dunaliella* sp. Na trh se dostávají nejčastěji v podobě tablet či prášku jako doplněk stravy. Například *Chlorella* sp. je užívána pro posílení imunitního systému nebo jako prevence proti selhání ledvin. *Spirulina* je zase známá pro svůj poměrně vysoký obsah bílkovin. Mikrořasy obecně jsou řazeny jako velmi zdravé potraviny. Obsahují polynenasycené mastné kyseliny (polyunsaturated fatty acids, PUFA), zejména omega-3 a ome-

ga-6. Ty mají pro lidské zdraví nezastupitelnou roli. Dále jsou zdrojem vitamínů a minerálních látek, které lze zužitkovat i v kosmetickém průmyslu pro výrobu krémů, masek a vyživujících vod pro péči o tělo (ZHANG, 2015).

1.5.2 Biopaliva

Přeměna biomasy řas pro energetické účely je možná dvěma způsoby. Termochemicky nebo biochemicky. Biochemické procesy zahrnují anaerobní fermentaci, alkoholové kvašení a fotobiologickou produkci vodíku. Termochemické procesy zahrnují spalování, zplyňování, zkapalňování a pyrolýzu. Při volbě vhodného procesu musíme zohledňovat druh a množství vstupních surovin, brát zřetel na ekonomickou stránku, požadovanou formu energie a formu konečného produktu. Ten může být kapalný nebo plynný.

Bionafta

Olej vyrobený z řasové biomasy je velmi viskózní. Aby mohl být používán do motorů, je nutné jeho viskozitu snížit. Nejčastěji se používá metoda transesterifikace. Jedná se o reakci mezi olejem z řas (triglycerid) a alkoholem (ethanol) za působení příslušného katalyzátoru (ethanolát sodný). Výsledkem reakce je bionafta a glycerol a ethanolát sodný. Bionafta z řas má celou řadu výhod oproti klasické naftě. Příkladem je téměř nulový obsah síry, výborné mazací vlastnosti. Přesto není na trhu příliš rozšířená kvůli její relativně vysoké ceně (CYNAMON a BOUWERB, 2015; ZHANG, 2015; TIJAN et al. 2015).

Bioethanol

Výroba bioethanolu je vhodná jen u druhů řas, které se vyznačují vysokým obsahem sacharidů. Důvodem je fermentační proces, který se využívá pro výrobu ethanolu. Proces je zahájen přidáním kvasnic do fermentoru s biomasou. Vzniká ethanol, který je upravován v destilačním zařízení. Výsledný ethanol může být používán jako příměs benzínu (CYNAMON a BOUWERB, 2015; ZHANG, 2015).

Vodík

Výroba vodíku z řas má velký potenciál, ačkoliv se jedná o velice finančně náročný proces. Mikrořasy mají potřebné genetické a metabolické vlastnosti k tvorbě tohoto plynu. V průběhu fotosyntézy řasy mění molekulu vody na kyslík a vodíkový kationt.

Ten je za anaerobních podmínek následně přeměněn na molekulu H_2 (CYNAMON a BOUWERB, 2015; ZHANG, 2015).

1.5.3 Čištění odpadních vod

Využívání mikrořas k čištění odpadních vod není dnes již žádnou novinkou. Jedná se o poměrně účinný systém zakládající se na symbióze bakterií a řas. Řasami uvolňovaný kyslík, je využíván aerobními bakteriemi, které se účastní rozkladných procesů. Sahrávají významnou roli v biologickém procesu čištění. Není tedy zapotřebí používat mechanické provzdušňování. Řasy jsou velmi efektivní při odstraňování dusíku, fosforu, který vstřebávají jako živiny, a navíc jsou schopny na sebe vázat těžké kovy. Vzniklá biomasa řas, která může být dále zužitkována pro výrobu paliv či hnojiv, se tak stává velmi atraktivní (BRENNAN a OWENDE, 2010).

1.5.4 Čištění spalin

V důsledku spalování fosilních paliv a s ním spojené emise oxidu uhličitého, které se podílejí na změně klimatu, je dnes na světě několik společností řešící tento problém pomocí mikrořas. Využívají schopnosti řas spotřebovávat oxid uhličitý při fotosyntéze. Díky tomuto snižují tyto společnosti vypouštěné množství emisí a zároveň tak vyrábí cennou biomasu, kterou mohou dále zužitkovat.

Mezi jednu z takových společností patří i australská firma Algae.Tec založena v roce 2007 specializující se na produkci řas za využití CO_2 z uhelných elektráren. Vynalezla vysoce výnosný uzavřený systém pro růst řas a jejich sklizeň. Algae.Tec je dnes jedna z největších společností (v Austrálii) zabývající se výrobou obnovitelné energie z řas. V roce 2013 podepsala tato společnost dohodu s energetickou společností Macquarie-Generation o spolupráci. Firma Algae.Tec tak mohla postavit své technologické zařízení v blízkosti uhelné elektrárny Bayswater v Hunter Valley NSW a využívat vyprodukovaný oxid uhličitý ve svém reaktoru pro kultivaci řas. Elektrárna ročně spálí asi 7,5 milionu tun uhlí, čímž vyprodukuje přibližně 19 milionu tun oxidu uhličitého za rok. Algae.Tec plánuje využívat zhruba 270 000 tun CO_2 za rok a použít jej tak k výrobě 250 000 m^3 paliva za rok (ZHANG, 2015; www.algaetec.com.au).

V roce 2012 v Rakousku vznikl velmi zajímavý výzkumný projekt pro výrobu bioplastů ve spolupráci s jednou z největších elektráren v Evropě Energie-Versorgung Niederösterreich společně s Univerzitou zemědělských věd a se strojírenskou firmou An-

dritz. Výzkum je situován u elektrárny Dürnrohr v Dolním Rakousku. K výrobě bioplastů se používají sinice kultivované ve fotobioreaktorech. Sinice jsou syceny oxidem uhličitým z elektrárny. Ze vzniklé biomasy vyrábí nejen kyselinu polyhydroxymáselnou pro již zmiňovaný bioplast, ale i bioplyn. V současné době jsou schopni vyrobit z 1 000 kg vyprodukovaného oxidu uhličitého asi 115 kg kyseliny polyhydroxymáselné a 320 m³ bioplynu. Projekt běží až do roku 2018 (ZHANG, 2015; www.evn.at).

Mezi další významné firmy patří i izraelská společnost Seambiotic, která vznikla v roce 2003. Byla to první společnost využívající spaliny ze spalování uhlí pro kultivaci řas. Řasy jsou pěstovány v otevřených nádržích s přívodem spalin obsahujících průměrně 12 % CO₂. Denní přírůstek biomasy je odhadován na 20 g·m⁻². Seambiotic v posledních letech také spolupracuje s Národním úřadem pro letectví a organizací NASA ve Spojených státech, aby vynalezla biopalivo z řas, které by mělo vyšší bod mrznutí než ostatní biopaliva rostlinného původu (ZHANG, 2015).

1.6 Využití řas v bioplynových transformacích

1.6.1 Zdroj biomasy

Pěstování mikrořas na rozdíl od konvenčních rostlin určených pro výrobu biopaliv, respektive bioplynu, který se na území České republiky vyrábí ve více než 500 bioplynových stanicích, není náročný na velikost plochy. Zdrojem zelené biomasy mohou být kultivační nádrže či čistírny odpadních vod využívající mikrořasy v procesu čištění.

Abychom mohli lépe chápat anaerobní rozklad mikrořas, je dobré znát jejich složení. Mikrořasy jsou popsány jako CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}. Jsou složeny z proteinů (6–52 %), sacharidů (7–23 %), lipidů (5–23 %) a v menším množství z nukleových kyselin a pigmentů. Mimo jiné obsahují železo, kobalt a zinek, u nichž je známo, že stimulují methanogenezi. Pro dosažení maximálních výnosů bioplynu je vhodné pro anaerobní fermentaci používat kmeny s tenkou buněčnou stěnou. Buněčné stěny bývají většinou velmi pevné a odolné, čímž se zhoršuje biologický rozklad anaerobními bakteriemi. Mezi další priority při výběru je ideální volit odolné druhy s vysokým tempem růstu schopné množit se i v nesterilním prostředí. Důležitou roli pro produkci methanu hraje poměr sacharidů, proteinů a lipidů. Přestože se lipidy na vzniku methanu podílejí nejvíce, nejsou jediným zdrojem (TIJAN et al. 2015). K efektivnější akumulaci lipidů v buňce přispívá omezení přístupu dusíku. To má za následek i přeměnu volných mast-

ných kyselin na triacylglyceroly (TAG), které jsou důležité při výrobě bionafty. Weldy a Huesemann 2007 potvrdili, že řasy rostoucí při dostatečné koncentraci dusíku vytvářejí vyšší množství lipidů v buňce ($46 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ za den) než řasy rostoucí při nedostatečném množství dusíku, ty vyprodukovaly $12 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ za den. Dusík je tedy důležitý pro růst řas a nesmí dojít k jeho úplné eliminaci (TONGPRAWHAN et al. 2014).

Ze získané biomasy lze mikrobiální činností vyrobit bioenergii. Anaerobní fermentace je proces přeměňující uhlíkatý substrát na fermentační zbytek a bioplyn skládající se převážně z methanu a oxidu uhličitého. Methan lze využít pro výrobu elektrické energie a tepla. Vzniklý oxid uhličitý je možné využít při kultivaci řas. Mezi další alternativní přeměny řasové biomasy na energii patří zplyňování. To probíhá za přítomnosti podstechiometrického množství kyslíku v rozmezí teplot $750\text{--}900 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Produktem je syntézní plyn skládající se z CH_4 , CO_2 , CO , H_2 a uhlovodíků. Syntézní plyn může být spalován pro výrobu elektrické energie nebo tepla. Lze ho však i dále upravovat do tekuté podoby biopaliv. Obecně lze říci, že z biomasy řas lze nezávisle na použitém druhu vyprodukovat kolem $69\text{--}75 \text{ \%}_{\text{obj}}$ methanu. Důležitý faktor podílející se na množství methanu ve vyprodukovaném bioplynu je hodnota pH (BRENNAN a OWENDE, 2010; YEN et al. 2015).

1.6.2 Bioplyn

Bioplyn je plyn vznikající během anaerobní fermentace rozkladem organické hmoty. Je to směs plynů skládajících se z methanu, oxidu uhličitého, vodní páry, dusíku, kyslíku, čpavku a síry. Hlavní složky jsou methan ($45\text{--}75 \text{ \%}_{\text{obj}}$) a oxid uhličitý ($25\text{--}55 \text{ \%}_{\text{obj}}$). Energeticky využitelný bioplyn je vyráběn ve specializovaných technologických zařízeních tzv. bioplynových stanicích. Bioplyn také vzniká v tělesech komunálních skládek odpadů, kde bývá pro další využití jímán systémem sběrných studní a čerpacích stanic. Výhřevnou složkou bioplynu je CH_4 . V závislosti na surovinách pro výrobu bioplynu, kterými jsou chlévská mrva, prasečí kejda, cíleně pěstovaná biomasa nebo kal z městských čistíren odpadních vod, může bioplyn obsahovat nežádoucí sloučeniny. Nejčastěji to jsou organokřemičité sloučeniny a sloučeniny síry. Bioplyn může být však vyráběn i z biomasy řas. Ta může pocházet z biologického čištění odpadních vod, z čištění spalin energetických podniků nebo může být biomasa přímo pro tyto účely kultivována.

Bioplyn je spalován v kogeneračních jednotkách za současné výroby elektrické a tepelné energie. Před spalováním je nutné bioplyn zbavit nežádoucích složek, aby se

předcházelo následným opravám strojního zařízení a aby byly dodrženy emisní limity z hlediska legislativy o ochraně ovzduší. Proto jsou některé bioplynové stanice osazeny i odsiřovacími systémy bioplynu (www.bioplyn.cz; STRAKA a DOHÁNYOS, 2003).

Výroba bioplynu

Výroba bioplynu je složitý proces rozkladu organických látek za pomoci mikroorganismů. Celý proces probíhá v anaerobním prostředí neboli anaerobní či methanové fermentace, jehož výstupem je bioplyn. V ideálním případě se skládá ze dvou plynných složek, a to methanu a oxidu uhličitého. Ve skutečnosti jsou výsledkem dva majoritní plyny (CH_4 , CO_2) a řada minoritních. Celý výrobní proces je ovlivňován řadou procesních a materiálových parametrů, například složením materiálu, podílem vlhkosti, teplotou, hodnotou pH atd. Anaerobní fermentace je složitý biochemický proces skládající se z mnoha na sebe navazujících fyzikálních, fyzikálně-chemických a biologických procesů. Pro zjednodušení a lepší pochopení bývá proces anaerobní fermentace rozdělován do čtyř základních fází.

I. Fáze

Hydrolyza probíhá v aerobním prostředí. Dochází při ní za pomoci mimobuněčně působících hydrolytických enzymů ke štěpení makromolekulárních látek na jednodušší organické látky.

II. Fáze

Acidogeneze – v této fázi vznikají za pomoci acidogenních a syntrofních mikroorganismů kyseliny s kratším postranním řetězcem jako je kyselina máselná, propionová, valerová a další.

III. Fáze

Acetogeneze – v této fázi dochází k produkci důležitých látek určených k produkci methanu. Jsou jimi kyselina octová, oxid uhličitý a vodík.

IV. Fáze

Methanogeneze – zde dochází ke tvorbě methanu. Kyselina octová je metabolizována autotrofními methanogenními archaea na methan a hydrogentrofními methanogenními archaea je metabolizován na methan směs oxidu uhličitého a vodíku (STRAKA a DOHÁNYOS, 2003).

Chemické složení bioplynu

Bioplyn je směs methanu a oxidu uhličitého. Tyto majoritní složky se vyskytují v různém procentním zastoupení v závislosti na kvalitě vstupního substrátu a podle podmínek fermentace. Mezi majoritní složky také patří anorganické plyny vyskytující se v desetinách objemového procenta. Mimo majoritních složek obsahuje bioplyn i stopové složky určující zřetelný rozdíl mezi skládkovým a reaktorovým bioplynem (STRAKA a DOHÁNYOS, 2003).

Majoritní složky bioplynu

U kvalitních plynů jsou za majoritní složky bioplynu označovány methan a oxid uhličitý. Poměrné zastoupení obou hlavních složek (CH_4 , CO_2) se v literárních pramenech liší. Důvodem může být mimo jiné proměnné množství rozložené vstupní suroviny. Množství methanu se obvykle pohybuje v rozmezí od 50 do 85 %_{obj}. Obecně se však všichni autoři shodují, že vyšší produkce a vyšší koncentrace CH_4 poskytují proteiny a lipidy na rozdíl od polysacharidů. Nelze tedy přesně určit obsah methanu a oxidu uhličitého podle použitého substrátu, neboť celý proces ovlivňuje celá škála parametrů (pH, typ reaktoru, teplota, skladba mikroorganismů, atd.) (STRAKA a DOHÁNYOS, 2003).

Minoritní složky bioplynu

Škála minoritních komponentů v bioplynu ve srovnání s majoritními složkami je velmi rozličná. Chemické sloučeniny v bioplynech byly popsány a určeny v jednotkách stovek miligramů na metr krychlový a menších. Díky provedeným analýzám bioplynu byly zjištěny stovky minoritních látek. Počet identifikovaných lze odhadnout na 400–500. Z praktického pohledu se však jedná o bezcenné látky, neboť nijak zvlášť nepřispívají k celkové výhřevnosti bioplynu. Vliv výhřevnosti spalitelných stopových látek je menší než 1–2 %. Je tedy menší než nepřesnost určení výhřevnosti podle analýzy obsahu methanu. Příkladem jsou uhlovodíky alicyklické, uhlovodíky aromatické, alkoholy, aldehydy a ketony, karbonové kyseliny a další látky.

Chování některých minoritních složek v plynu vzbuzuje přesto pozornost. Jedná se především o ty, které způsobují koroze či jsou nositeli toxických vlastností. V praxi jsou tyto problémy spojovány především s přítomností sulfanu (STRAKA a DOHÁNYOS, 2003).

Bioplyn a síra

Síra se v bioplynu vyskytuje jako minoritní složka, a to nejčastěji v podobě sulfanu. Takto vázaná síra může významně ovlivňovat kvalitu bioplynu.

Sulfan je jedovatý, bezbarvý, zápachající plyn, připomínající zkažená vejce. Jeho spalováním se tvoří oxid siřičitý, z něj pak následně oxid sírový. Ten při sloučení s vodní párou vytváří kyselinu sírovou. Ta způsobuje korozi motorů, spalinových a výfukových potrubí. Zhoršuje ale i mazací vlastnosti motorového oleje, do kterého se rovněž dostává.

Hlavním zdrojem síry jsou látky bílkovinné povahy ale i anorganický síran. Bioplyn obsahuje takové množství sulfanu, kolik je ho obsaženo ve vstupní surovině. Je známo, že rostlinné biomasy obsahují poměrně malé množství proteinů. Především se jedná o dřevní biomasu, papír nebo celulózu. Síra pochází ze sulfidických a disulfidických vazeb ve zpracovávané biomase (STRAKA a DOHÁNYOS, 2003).

Obsah sulfanu v bioplynu, jak již bylo zmíněno, závisí především na koncentracích siřných látek ve vstupním substrátu a použité technologii fermentace. Bioplyn lze dle tohoto kritéria rozdělit na:

- bioplyn s technologicky nevýznamným podílem sulfanu (do $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- bioplyn s nízkým podílem sulfanu ($50\text{--}250 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- bioplyn se středním podílem sulfanu ($250\text{--}1500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- bioplyn s vysokým podílem sulfanu (nad $1500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

(STRAKA a DOHÁNYOS, 2006)

Tab. 1: Množství sirovodíku v substrátu (STRAKA a DOHÁNYOS, 2003)

Druh substrátu	Obsah H_2S v bioplynu [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$]
dřevní biomasa, papír, celulóza, rostlinný odpad	do 100
kaly z čištění městských splaškových vod	300–1500
živočišné odpady (skot)	500–800
živočišné odpady (drůbež, vepř)	4000–6000
potravinářské odpady s vysokým obsahem proteinů	4 000–6 000

1.6.3 Čištění bioplynu

Čištění a úprava plynu je nezbytná nejen pro snižování skleníkových plynů, ale především pro zvýšení kvality samotného bioplynu. Pro odstranění nežádoucích látek byly vyvinuty mnohé technologie. Příkladem lze uvést metody založené na principu absorpce nečistot chemickými rozpouštědly, fyzikální absorpce, membránové separace a biologické nebo chemické metody. Mnohé z těchto metod jsou však drahé a škodlivé pro životní prostředí na rozdíl od biologických metod. Mezi biologické systémy schopné upravit kvalitu bioplynu lze zařadit i mikrořasy. Ty jsou schopny fotosyntézou fixovat oxid uhličitý, který snižuje výhřevnost bioplynu a zvyšuje emise oxidu uhelnatého při hoření. Další nežádoucí látkou je již zmiňovaný sirovodík, který způsobuje korozi motorů, potrubí a jiného zařízení (RAMARAK a DUSSADEE, 2015; ZHANG, 2015).

Jeden z první mikrořasových systémů byl popsán Oswaldem a Goluekem. Tento biologický způsob čištění prokazuje, že řasy snižují hodnotu CO_2 absorbováním do vlastní biomasy prostřednictvím fotosyntézy, která probíhá 10–50krát rychleji než u terestrických rostlin. Dle různých studií bylo zjištěno, že množství H_2S po úpravě bioplynu je taktéž menší (TIJAN et al. 2015).

1.7 Limitující faktory pro použití v praxi

Různé druhy řas si kladou různé životní podmínky. Z toho je zřejmé, že při výběru vhodného druhu pro konkrétní použití je nutné brát ohled na přirozené prostředí růstu daného druhu. Dále se výběr přednostně zužuje na druhy schopné růst v širokém rozmezí teplot o schopnosti absorbovat nestálé množství koncentrace CO_2 . Vzhledem k poměrně vysokým nákladům za pořízení kultivační techniky, její provoz a následné zpracování vzniklé biomasy, je vhodné si s rozmyslem zvolit nejen vhodný druh řas, ale i vhodnou kultivační techniku. Je vyzkoušeno, že ne každému druhu vyhovuje, aby byl kultivován jak v uzavřených, tak i v otevřených kultivačních systémech.

1.7.1 Kultivační parametry

Každý druh řasy může mít trochu rozdílné nároky na prostředí svého růstu. Pouze autotrofní řasy potřebující pro svůj růst světlo, CO_2 , vodu, živiny a stopové prvky. Prostřednictvím fotosyntézy jsou schopny si syntetizovat ostatní potřebné látky pro růst. Mnohé druhy však nejsou autotrofní a nejsou tak schopny si samy některé látky vytvořit. Proto

musí být tyto látky (například vitamíny) přítomny v kultivačním mediu. Nejdůležitějšími parametry regulující růst jsou teplota, světlo, hodnota pH kultivačního média, promíchávání kultivačního média a kultivační nádoby (GUALTIERI a BARSANTI, 2006).

Teplota

Teplota pěstované kultury by měla být co nejvíce podobná teplotě, ze které byly druhy sesbírány. Většina pěstovaných exemplářů toleruje teploty v rozmezí 16 až 27 °C. Teploty nižší jak 16 °C zpomalují růst buněk. Naopak dlouhodobé působení vysokých teplot nad 35 °C působí letálně (www.oilgae.com).

Světlo

Světlo je pro řasy důležitým zdrojem energie pro fotosyntetické reakce. Intenzita osvětlení je velmi podstatná. Požadavky na ni se mohou však lišit v závislosti na hustotě kultivované biomasy a na velikosti kultivační nádoby. U větších nádob s větší koncentrací buněk musí být intenzita osvětlení vyšší, aby bylo dosaženo rovnoměrného světelného záření pro všechny buňky. Příliš velká světelná intenzita může mít za následek fotoinhibici růstu buněk. Používaná světelná intenzita se proto pohybuje v rozmezí 100 až 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Zdroj světla může být jak přírodní, tak i umělý. Intenzita a kvalita osvětlení může být regulována pomocí filtrů. Některé druhy nerostou dobře pod stálým osvětlením. Vyžadují střídání temností a světelné fáze. Doporučená fotoperioda (den/noc) je minimálně 16:8, optimálně 12:12 (GUALTIERI a BARSANTI, 2006; MASOJÍDEK et al. 2016).

Hodnota pH

Některé druhy ke svému růstu vyžadují buď kyselé, nebo zásadité prostředí. Pro většinu kultivovaných řas jsou přijatelné hodnoty pH medií mezi 7 a 9. Optimální jsou pak média s pH 8,2–8,7. Hodnotu pH je velmi důležité sledovat, neboť může způsobit zničení celé pěstované kultury (GUALTIERI a BARSANTI, 2006).

Prvky a látky důležité pro růst řas

Kultivační medium je živný roztok obsahující potřebné látky pro růst řas. Základem jsou biogenní prvky (N, P, Ca, Mg, K), stopové prvky (Fe, Cu, Mn, Co), vitamíny a podobně. Živné půdy můžeme rozdělit na tekuté a pevné. Tekuté půdy se skládají ze směsi živin rozpuštěných ve vodě, zatímco pevné půdy se skládají ze směsi živin obsahujících většinou agarový gel.

Promíchávání kultivačního media

Promíchávání média je nezbytné, aby se předcházelo procesu usazování řas a aby měly všechny buňky stejnou intenzitu osvětlení. V celém mediu je pak stejná teplota, všechny buňky mají stejný přísun živin a dochází k lepší výměně plynů mezi kulturou a okolním vzduchem. V závislosti na pěstované kultuře může být promíchávání prováděno ručně, provzdušňováním, lopatkovými pádly nebo tryskovými pumpami (GUALTIERI a BARSANTI, 2006).

Kultivační nádoby

Kultivační nádoby by měly být vyrobeny z materiálu mající dobrou propustnost světla, dobře umyvateľné a sterilizovatelné. Některé materiály mohou v průběhu kultivace uvolňovat škodlivé látky mající nepříznivý vliv na pěstovanou kulturu. Proto je důležité vybírat materiály chemicky inertní. Doporučovanými materiály jsou teflon, polykarbonát, polystyren a borokřemičitanové sklo (GUALTIERI a BARSANTI, 2006).

1.7.2 Porovnání kultivačních systémů

Pro komerční pěstování je nejvhodnější z finančního hlediska volit otevřené systémy, ačkoliv v porovnání s uzavřenými systémy u nich hrozí větší riziko kontaminace. Přesto jsou otevřené systémy více časté. Využívají se pro produkci biomasy napříč všech regionů světa. Uzavřené systémy jsou navzdory svým lepším vlastnostem méně využívány, neboť produkty z řas nejsou na trhu z ekonomických důvodů tak konkurence schopné, aby bylo možné pokrýt náklady za pořízení a provoz. Porovnání výhod a nevýhod systémů je uvedeno v následující tabulce (ZHANG, 2015):

Tab. 2: Porovnání otevřených a uzavřených systémů kultivace (ZHANG, 2015)

vybrané parametry	otevřené systémy	uzavřené systémy
kontrola systému	obtížná	snadná
provoz a realizace	poměrně nízká	nákladná
požadavek na plochu	velký	malý
Kontaminace	ano	méně častá
absorpce CO ₂ řasy	nízká	vysoká
využití světla buňkami	nízká	vysoká

2 MATERIÁL A METODIKA

Laboratoř:

Pro uskutečnění tohoto experimentu byla využita dvě pracoviště. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (dále jen ÚVGZ AV ČR) a Celorepubliková referenční laboratoř bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně.

Použité zařízení:

- zdroj bílého světla – žárovka (OsramLumilux T8 58W/840)
- 4 Erlenmeyerovy baňky o objemu 1000 ml
- čerpadlo bioplynu
- 4 aerační elementy
- teploměr
- pH metr (WTW pH 3110, Wissenschaftlich-TechnischeWerkstättenGmbH, Germany)
- plastové hadice, gumové zátky
- analyzátor bioplynu (COMBIMASS® GA-s, BINDER GmbH, Germany)
- měřič optické hustoty AquaPen C AP-C 100 (Photon Systems Instruments, CZ)

Použitá kultura: *Chlorella pyrenoidosa* Chick (IPPAS C2)

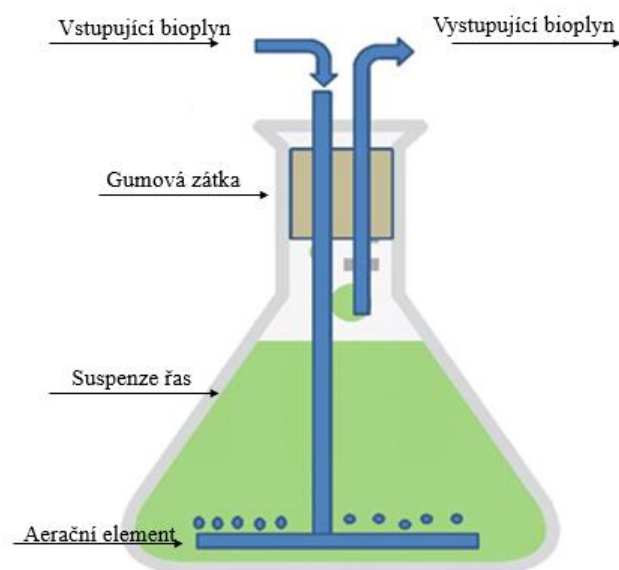
Použité medium:*Tab. 3: medium BG 11(Stanier et al. 1971)*

Chemická látka	Koncentrace [g·l ⁻¹]
NaNO ₃	149,6
MgSO ₄ · 7H ₂ O	7,48
CaCl ₂ · 2H ₂ O	3,6
Kyselina citrónová	0,6
Na ₂ -EDTA · 2H ₂ O	0,123
Citronan amonno-železitý	6
Na ₂ CO ₃	20
K ₂ HPO ₄	30,5
H ₃ BO ₃	2,86
MnCl ₂ · 4H ₂ O	1,81
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0,22
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0,39
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0,079
Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	0,049

Metodika:

Na základě vědeckých výzkumů zabývajících se zvyšováním kvality bioplynu za pomoci řas, byla ověřována pravdivost těchto tezí. Cílem bylo ověřit schopnost řas odstraňovat nežádoucí látky obsažené v bioplynu, zejména oxidu uhličitého a sirovodíku.

Pro založení experimentu bylo důležité pracovat ve sterilním prostředí. Aby se zamezilo případné kontaminaci kultury bakteriemi, veškerá přípravná práce byla prováděna ve flowboxu v moderní laboratoři ÚVGZ AV ČR, která zároveň poskytla zkoumanou kulturu *Chlorella pyrenoidosa* Chick (IPPAS C2). Řasová kultura zde byla smíchána se sterilním kultivačním médiem BG II, které obsahuje nezbytné makroelementy a mikroelementy důležité pro růst řas. Vzniklý roztok o objemu 1600 ml byl následně rozdělen do 4 Erlenmayerových baněk. Z toho 3 Erlenmayerovy banky byly dříve sterilizovány v autoklávu a 1 Erlenmayerova banka zůstala nesterilní. Do každé banky bylo odměřeno 400 ml tohoto roztoku. Každá banka byla následně uzavřena gumovým špuntem opatřeným 2 otvory. Jeden otvor sloužil pro bioplyn vstupující přes filtr do řasového roztoku a druhým otvorem byly měřeny výstupní hodnoty bioplynu. Připravená kultura byla poté převezena do laboratoře na Mendelově univerzitě v Brně, kde došlo k samotnému provedení experimentu.



Obr. 4: schéma kultivačního zařízení

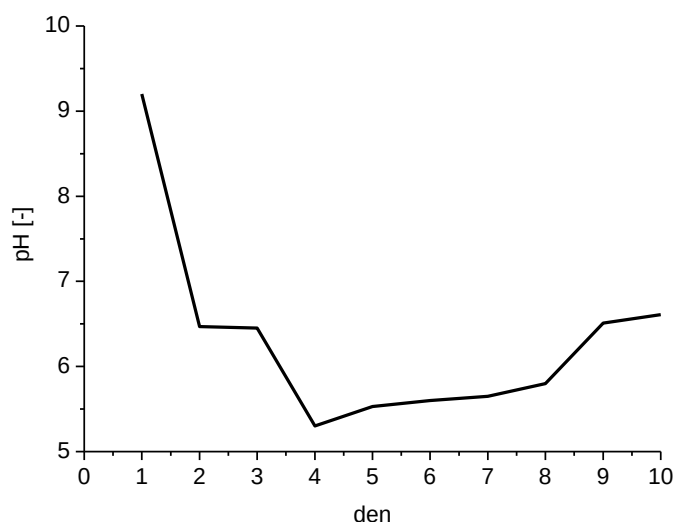
Baňky s kulturou byly umístěny do laboratorní digestoře, aby se zamezilo nežádoucímu úniku plynu do okolního prostředí. Jako zdroj bioplynu sloužil laboratorní plynodem o objemu 1 m³, ve kterém byl skladován bioplyn produkovaný při fermentačních testech. Regulovaný průtok vstupujícího bioplynu byl nastaven pro každou řasovou suspenzi stejně, a to v množství 100 ml·min⁻¹. Všechny suspenze byly po celou dobu experimentu neustále uměle osvětleny zářivkou bílého světla (OsramLumilux T8 58W/840) o intenzitě 20 μmol·m⁻²·s⁻¹. Řasy byly kultivovány po celou dobu při laboratorní teplotě 24 °C ± 1 °C.

Po dobu deseti dnů byla denně plynovým analyzátozem (COMBIMASS® GA-s, BINDER GmbH, Germany) měřena koncentrace vstupních a výstupních hodnot bioplynu (methan, oxid uhličitý, kyslík, sirovodík a vodík). Pro potvrzení funkčnosti řasového systému, byly pro tento experiment důležité především rozdíly hodnot naměřených koncentrací CO₂, H₂S a O₂. Pro zjištění hodnot pH a teploty byla používána nesterilní baňka, která byla pro toto měření určena. U ní byla rovněž zjišťována optická hustota za pomoci zařízení AquaPen C AP-C 100 (Photon Systems Instruments, Czech Republic), a to jednou na začátku experimentu a pak dvakrát v průběhu celého měření. Dále byla u všech baněk každý den pořizována fotodokumentace.

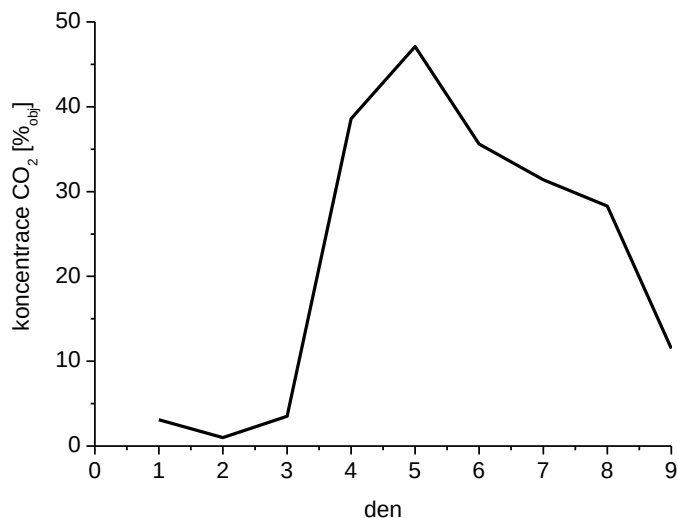
3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Optimální hodnota růstu kultury *Chlorella pyrenoidosa* Chick (IPPAS C2) je doporučována v rozmezí pH 6–8 (nepublikované tvrzení). První den experimentu vlivem naočkování kultury řas do nového kultivačního média byla vykazována poměrně zásaditá hodnota pH 9,2. Následující dny hodnota pH klesla. Po zbytek měření jevila spíše kyselý charakter, což je patrné z grafu č.1. Naměřené hodnoty pH se po naočkování ustálily a pohybovaly se v rozmezí 5,3–6,6.

V průběhu celého měření docházelo ke změně hodnoty pH. Tento průběh je způsoben nestejnoměrným příjmem koncentrace CO_2 do kultivačního média. V důsledku rozpustnosti CO_2 ve vodě se snižovala hodnota pH ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$), což je patrné při porovnání Grafu 1 a Grafu 2.

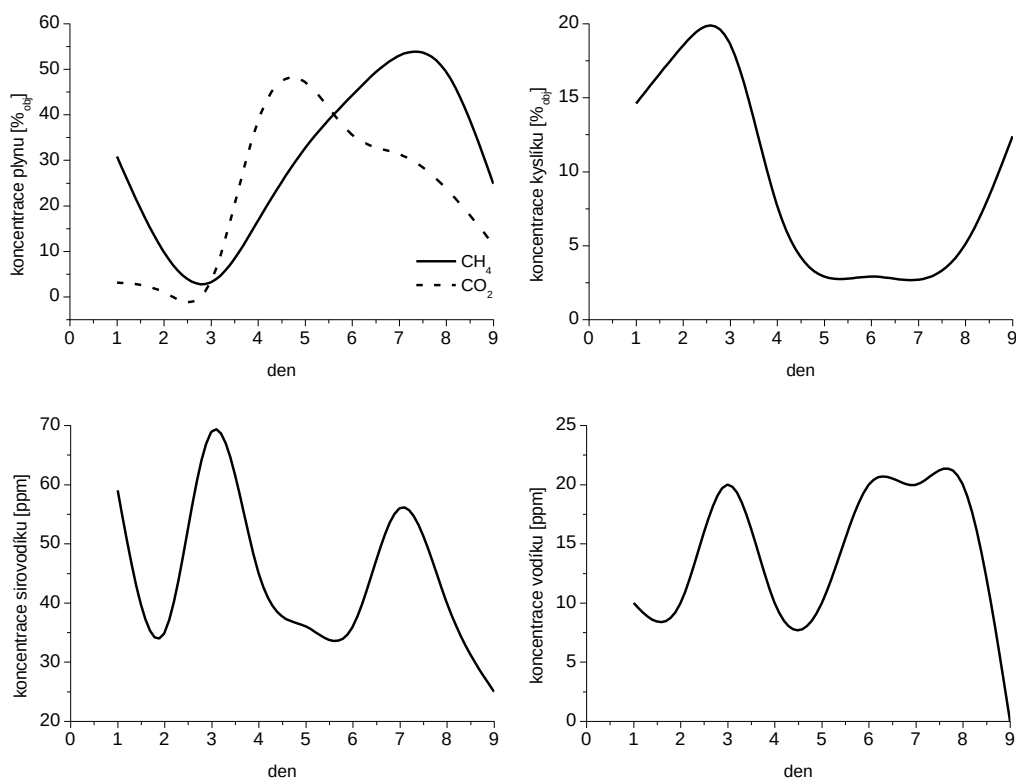


Graf 1: průběh změny pH kontrolního vzorku během měření



Graf 2: průběh koncentrace CO₂ na vstupu do kontrolního vzorku

Pro tento experiment byl používán bioplyn vznikající během fermentačních testů v laboratoři Mendelovy univerzity. Složení bioplynu se v průběhu měření měnilo v závislosti na fázi fermentačního procesu (Graf 3). V prvních dnech byly naměřeny velmi nízké koncentrace methanu (3,2 %) a oxidu uhličitého (1 %). Procentuální zastoupení kyslíku bylo poměrně vysoké (18,6 %). Koncentrace H₂S byla 10 ppm. Koncentrace CO₂ se postupně zvyšovala a asi v polovině celého testu nabyla svého maxima 47,1 %. Po tomto nárůstu došlo v následujících dnech vlivem začátku fáze methanogeneze ke snižování koncentrace CO₂, ale zároveň zvýšení koncentrace CH₄ na maximální hodnotu 53 %. Procentuální zastoupení O₂ vlivem vzniku methanu kleslo na pouhých 2,7 %. Množství sirovodíku se také změnilo. Vzrostlo z 10 ppm na 20 ppm.



Graf 3: složení bioplynu na vstupu do nádob s kulturou

Měřením vstupních a výstupních hodnot složek bioplynu se prokázalo, že řasy jsou schopny díky probíhající fotosyntéze absorbovat CO₂ a zároveň produkovat O₂. Účinek fotosyntézy je potvrzen naměřenými rozdílnými hodnotami CO₂ a O₂ na vstupu a výstupu bioplynu z řasové kultury. Rozdíl naměřených hodnot je uveden v Tabulce 4.

Maximální produkce O₂ nastala u vzorku č.2 a to druhý a osmý den měření. Průměrná produkce O₂ v celém experiment byla $0,15 \pm 0,051$ %. Maximální pokles byl jen u vzorku č.3 třetí den měření. Průměrný pokles oxidu uhličitého byl $0,22 \pm 0,026$ %. Největší naměřený rozdíl CO₂ byl 0,7 %, což představuje pokles o 20 % z původního obsahu CO₂ vstupujícího do řasové kultury. V porovnání s výsledky s podobnými experimenty, se jedná o poměrně malý pokles. Například Tongprawhan et al. (2014) dosáhl dokonce až 70 % odstranění CO₂. Při svém experimentu použil druh *Chlorella* sp. TISTR 8263. Toto množství CO₂ bylo odstraněno ze směsi vzduchu obsahující 50 % CO₂. V dalších jeho pokusech, kdy bylo odstraněno 68–69 % CO₂, použil plyn obsahující 50 % CO₂ a 50 % CH₄. V experimentu Tongprawhan et al. (2014) bylo používáno osvětlení o intenzitě $56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. V průběhu uměle vytvořené světelné fáze, trvající

16 hodin, docházelo k průtoku plynu $0,01 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Zatím co v experimentu, této bakalářské práce, byl naměřen nepatrný pokles absorbovaného CO_2 . To mohlo být způsobeno nedostatečnou intenzitou osvětlení, které bylo pouhých $20 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Příčinou také mohlo být nedodržení světelné a temnostní fáze a nedostatečným zdržením plynu v řasové suspenzi. Průtok plynu byl $100 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($0,1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$). Je tedy možné, že větší na plynu z důvodu nedostatečné retence, prošla skrze řasovou suspenzi beze změny.

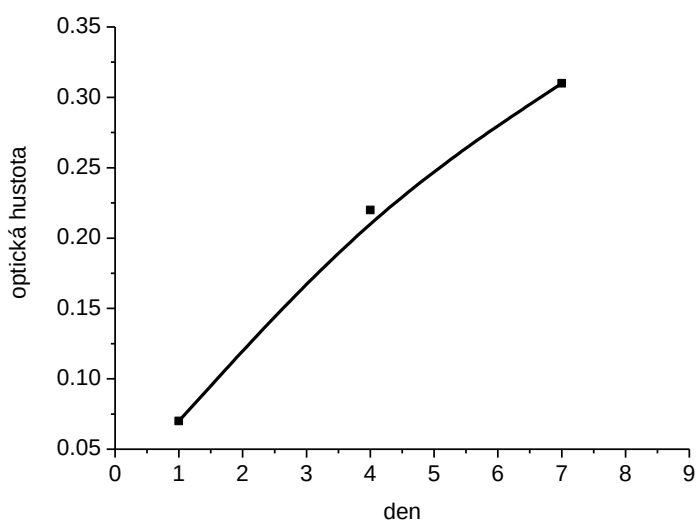
Z důvodu zaznamenání chybného rozdílu hodnot vstupního a výstupního CO_2 ve vzorku č. 1 čtvrtý den měření, byl tento vzorek pro výpočet průměrného snížení CO_2 vyloučen. V tomto vzorku byl zaznamenán na výstupu poměrně velký nárůst CO_2 (39,3 %) ve srovnání s mnohem nižší koncentrací CO_2 (38,6 %) vstupující do řasové kultury.

V průběhu měření mimo tři případů nebyla zaznamenána žádná změna na vstupu a výstupu koncentrace H_2S . Naměřené změny hodnot nastaly v 6. dnu měření u vzorku č. 3, v 7. dnu měření u vzorku č. 1 a 9. den měření u vzorku č. 2. Jednalo se však o chybné měření měřicího přístroje COMBIMASS® GA-s. Tato situace, kdy došlo k navýšení koncentrace H_2S , je nereálná. Schopnost řas metabolizovat H_2S nebyla v tomto experimentu prokázána. Mann et al. (2009), zabývající se podobným experimentem, vykazuje pozitivní výsledky ve smyslu odstranění H_2S . Ve svém experimentu použil druh *Chlorella vulgaris*, SAG 211-11b rostoucí v mediu Modified Bold's Basal při třech různých intenzitách světla ($53 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, $60 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, $100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Složení vstupního bioplynu bylo: 57,5 % CH_4 , 41 % CO_2 , 438 ppm H_2S . Ve všech případech úspěšně odstranil množství H_2S z původních 438 ppm na 0 ppm. Na základě získaných hodnot z měření na vstupu a výstupu je prokazatelné, že filtrace bioplynu přes kulturu řas má minimální vliv na změnu koncentrace CH_4 .

Tab. 4: výsledky rozdílů koncentrací složek plynu na vstupu a výstupu

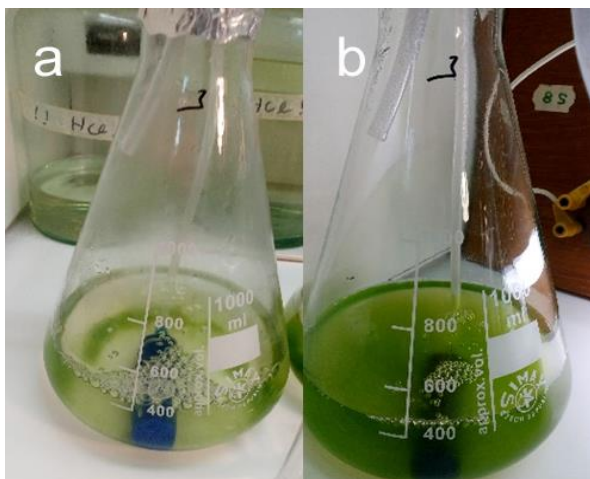
	1.vzorek			2.vzorek			3.vzorek		
	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	H ₂ S [ppm]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	H ₂ S [ppm]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	H ₂ S [ppm]
1.den	-0,2	0,1	0	-0,1	0,1	0	0	0,1	0
2.den	-0,2	0,3	0	-0,2	0,4	0	-0,1	0,2	0
3. den	-0,3	0,1	0	-0,3	0,1	0	-0,7	0,2	0
4. den	0,7	0	0	-0,1	0,3	0	-0,1	0,2	0
5. den	0	0	0	-0,1	0	0	-0,5	0,3	0
6. den	-0,2	0	0	-0,3	0,1	0	0	0,1	10
7. den	-0,1	0	10	-0,4	0,3	0	-0,3	0,1	0
8. den	-0,2	0,1	0	-0,3	0,4	0	-0,2	0,1	0
9. den	-0,4	0,2	0	-0,3	0,2	10	0,1	0	0

Schopnost řas růst pod vlivem proudícího plynu byla prokázána nárůstem řasové biomasy, která dle naměřených výsledků nabyla své optické hustoty o 4,5násobek. Růst optické hustoty je znázorněn v Grafu 4.



Graf 4: růst optické hustoty

Mezi další možnost prokazující růst řas je fotodokumentace, která byla pořizovaná každého dne měření. Z fotodokumentace je patrné sledovat rozdílnou intenzitu zbarvení kultury řas mezi prvním dnem (a) a posledním dnem (b) pořízení fotografického snímku (Obrázek 2).



Obr. 5: fotodokumentace: a) první den experimentu, b) poslední den experimentu
(Foto: P.Paroulková)

4 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala možnostmi využití řas v praxi, zejména jejich uplatněním v bioplynových transformacích. V první části této práce byl zhodnocen současný stav využití mikrořas. Byly zde stručně charakterizovány typy kultivačních systémů, nejčastěji kultivované druhy řas a vymezeny faktory omezující uplatnění řas na trhu.

V druhé části byl proveden experiment s cílem zjistit a ověřit, zda je možné využívat řasy pro zvyšování kvality bioplynu. Experiment byl zaměřen na ověření schopnosti námi zkoumané řasy *Chlorella pyrenoidosa* Chick fixovat oxid uhličitý a metabolizovat sirovodík.

Výsledky experimentu potvrzují skutečnost, že řasy jsou schopny za pomoci fotosyntézy fixovat oxid uhličitý. V průběhu měření došlo vlivem proudícího bioplynu obsahujícího oxid uhličitý k nárůstu řasové biomasy, což je patrné nejen z naměřené optické hustoty, u které došlo k nárůstu téměř o 4,5násobek, ale i z pořízené fotodokumentace. Na ní je zřetelně vidět postupné zesílení intenzity zbarvení z počáteční světle zelené kultury do tmavě zelených odstínů. Dalším důkazem růstu řas je i částečná absorpce oxidu uhličitého z proudícího bioplynu a z naměřených hodnot zvýšeného obsahu kyslíku v Erlenmeyerových baňkách obsahující kulturu řas. Náš experiment bohužel nepotvrdil hypotézu o schopnosti námi zvolené řasy snižovat koncentraci sirovodíku adsorpcí na povrch řas. Nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl v koncentraci sirovodíku na vstupu a výstupu bioplynu z roztoku kultury řas.

Při srovnání výsledků z této experimentální části s podobnými vědeckými pracemi, které publikují pozitivní výsledky při odstranění sirovodíku, je možné, že během tohoto testu došlo k nežádoucím vlivům mající negativní vliv na celý prováděný pokus. Důvodem nepotvrzení hypotézy tedy může být zejména špatná těsnost Erlenmeyerových baňek, které byly zazátkovány pouze gumovými špunty. Zátky mohly být špatně perforované. To by pak vysvětlovalo i netěsnost vyskytující se zejména u vzorku č. 1, ve kterém byly naměřené hodnoty výstupní koncentrace oxidu uhličitého vyšší než koncentrace ve vstupním složení bioplynu. Přestože byly po celou dobu měření dodržovány kultivační parametry, byl opomenut základní požadavek fotosyntetizujících rostlin, a to dodržení světelné a temnoty fáze. Ačkoliv se nepotvrdilo, že by námi vybraný druh rostl špatně při nedodržení správného poměru světla a tmy, může mít přesto tento faktor vliv na odstraňování CO_2 a H_2S . V tomto experimentu byla suspenze mikrořas udržována

pouze ve světelné fázi, přičemž intenzita osvětlení nebyla z důvodu použití klasické bílé zářivky o intenzitě světla $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dostatečná. Doporučovaná intenzita je 100 až $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Dalším faktorem ovlivňující výsledek práce může být i nedostatečné zdržení bioplynu v řasové suspenzi. Pro lepší retenci by bylo vhodné zvolit pomalejší průtok a větší objem nakultivované suspenze řas v baňkách.

Tato bakalářská práce slouží zejména jako literární podklad a základní experimentální ověření pro navazující diplomovou práci, která se bude zabývat obdobnou problematikou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

ODBORNÁ LITERATURA:

ANDERSEN, Robert A. *Algal culture techniques*. Vyd. 1. Burlington, Mass.: Elsevier/Academic Press, 2005, 578 s. ISBN 978-012-0884-261.

BOROWITZKA, Michael. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* [online]. 1999, roč. 70, č. 1–3, s. 313–321 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165699000838>

BRENNAN, Liam a Philip OWENDE. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and coproducts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, roč. 2010, č. 14, s. 557–577 [cit. 2017-02-14].

CYNAMON, Debora a Edward BOUWERB. Prospects for biodiesel production from algae-based waste water treatment in Brazil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, roč. 2015, č. 52, s. 1834–1846 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500876X>

GUALTIERI, Paolo a L. BARSANTI. *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. Vyd. 1. Boca Raton: Taylor, 2006, 320 s. ISBN 0-8493-1467-4.

JANKOVSKÝ, Libor. *Viry, prokaryota, řasy, houby a lišejníky: přehled systému, fyto-geneze a ekologie*. Vyd. 1. Brno: Masarykova univerzita, 1997, 154 s. ISBN 80-210-1555-1.

KÁRA, Jaroslav. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha: VÚZT, 2007. ISBN 978-80-86884-28-8.

MANN, G., M SCHLEGEL, R SCHUMANN a A. SAKALAUSKAS. Biogas-conditioning with microalgae. *Agronomy Research* [online]. 2009, roč. 7, č. 1, s. 33–38 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://agronomy.emu.ee/vol071/p7104.pdf>

MASOJÍDEK, Jiří a Ondřej PRÁŠIL. The development of microalgal biotechnology in the Czech Republic. *Journal of Industrial Microbiology* [online]. 2010, roč. 37, č. 12, s. 1307–1317 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10295-010-0802-x>

MASOJÍDEK, Jiří, Richard LHOTSKÝ, Jiří KOPECKÝ a Ondřej PRÁŠIL. *Mikrořasy – solární továrna v jedné buňce*. 1. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2016, roč. 45, č. 11987, 28 s. Věda kolem nás, 11987. ISSN 2464-6245

MIYAWAKI, Bruno, Nelson Fernando Herculanio Diego de Oliveira Corrêa André Bellin Mariano José Viriato Vargas SELESU, Diego de CORRÊA, André Bellin MARIANO a José Viriato VARGAS. Biogas purification through Microalgae cultivation in photobioreactor. In: *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)* [online]. Brazil: ABCM, 2013, s. 2929-2940. Dostupné z: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2013/PDF/613.pdf>

RAMARAJ, Rameshprabu a Natthawud DUSSADEE. Biological purification processes for biogas using algae cultures: A review. *International Journal of Sustainable and Green Energy: Special Issue: Renewable Energy Applications in the Agricultural Field and Natural Resource Technology* [online]. 2015, roč. 4, č. 1-1, s. 20–32 [cit. 2016-08-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/270884936_Biological_Purification_Processes_for_Biogas_Using_Algae_Cultures_A_Review

SIALVE Bruno, BERNET Nicolas, BERNARD Olivier. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, Elsevier, 2009, roč. 27, č. 4, s. 409-416.

SPOLAORE, Pauline, Claire JOANNIS-CASSAN, Elie DURAN a Arsène ISAMBERT. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* [online]. 2006, roč. 101, č. 2, s. 87-96 [cit. 2016-09-01]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389172306705497>

STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. Říčany: GAS, 2003, 517 s. ISBN 80-732-8029-9.

STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006. ISBN 80-732-8090-6.

STANIER, R.Y., R. KUNISAWA, M. MANDEL a G. COHEN-BAZIRE. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales). *Bacteriology Reviews* [online]. 1971, roč. 2, č. 35, s. 171-205 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC378380/?page=1>

ŠPAČEK, Jan. *Hlenky, houby, řasy*. Vyd. 1. Brno: Masarykova univerzita, 1999, 134 s. ISBN 80-210-2157-8.

TIJANI, Hamzat, Norhayati ABDULLAH a Ali YUZIR. Integration of microalgae biomass in biomethanation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, roč. 2015, č. 52, 1610–1622 [cit. 2017-02-07].

TONGPRAWHAN, Wassana, Sirasit SRINUANPAN a Benjamas CHEIRSILP. Biocapture of CO₂ from biogas by oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid. *Bioresource Technology*. 2014, roč. 2014, č. 170, s. 90–99 [cit. 2017-02-07].

TRAVIESO, L. E. P. SANCHEZ, F. BENITEZ a J. L. CONDE. Arthrospiras. Intensive cultures for food and biogas purification. *Biotechnology Letters* [online]. 1993, roč. 15, č. 10, s. 1091–1094 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00129944>

YEN, Hong-Wei, Shih-Hsin HO, Chun-Yen CHEN a Jo-Shu CHANG. CO₂, NO_x and SO_x removal from flue gas via microalgae cultivation: A critical review. *Biotechnology Journal* [online]. 2015, roč. 10, č. 6, s. 829–839 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/biot.201400707>

WELDY, CHAD SHARE a MICHAEL HUESEMANN. Lipid production by *Dunaliella salina* in batch culture: effects of nitrogen limitation and light intensity. *U.S. Department of Energy Journal of Undergraduate Research* [online]. 2007, roč. 7, č. 1, s. 115–122 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1052055>

ZHANG, Xing. *Microalgae removal of CO₂ from flue gas* [online]. London: IEA Clean Coal Centre, 2015, 95 s. [cit. 2017-02-17]. ISBN 978–92–9029–572-3. Dostupné z: https://www.usea.org/sites/default/files/042015_Microalgae%20removal%20of%20CO2%20from%20flue%20gas_ccc250.pdf

INTERNETOVÉ ZDROJE:

AlgaeTec [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [http:// www.algaetec.com.au](http://www.algaetec.com.au)
Bioprofit [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.bioplyn.cz>
Centrum Algatech: Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i. - vědecké pracoviště Třeboň [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.alga.cz>
Energie vernünftigenutzen [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.evn.at/EVN-Group/Energie-Zukunft/Zukunftsprojekte/CO2-USE.aspx>
GICON Advanced Environmental Technologies GmbH [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.gaet.gicon.com>
John A. Dutton e-Education Institute [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.e-education.psu.edu>
Mikrobiologický ústav AV ČR, v.v.i. [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://mbucas.cz>
Oilgae [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [http:// www.oilgae.com](http://www.oilgae.com)
Systém a vývoj sinic a řas [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/botany/studium/nr-rasy.htm#glaucophyta>
Www.sinicearasy.cz: Fykologická labotaror na katedře botaniky Přírodovědecké fakulty JU v Českých Budějovicích [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.sinicearasy.cz>

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obr. 1: schéma kultivace řas v otevřených systémech (https:// www.e-education.psu.edu)	16
Obr. 2: uzavřený systém pro kultivaci řas (http://www.gaet.gicon.com)	18
Obr. 3: kaskádovitá jednotka pro venkovní kultivaci řas (www.alga.cz).....	19
Obr. 4: schéma kultivačního zařízení	33
Obr. 5: fotodokumentace: a) první den experiment, b) poslední den experiment (Foto: P.Paroulková).....	39