



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**METODY A TECHNOLOGIE PRO ZÁCHYT OXIDU
UHLIČITÉHO V PRŮMYSLÝCH PROVOZECH**

METHODS AND TECHNOLOGIES FOR CARBON DIOXIDE CAPTURE IN INDUSTRIAL PLANTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Rek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. Kateřina Sukačová, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. David Rek**
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **RNDr. Kateřina Sukačová, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Metody a technologie pro zachyt oxidu uhličitého v průmyslových provozech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V souvislosti s cíli Evropské unie, jak byly představeny v balíčku opatření "The European Green Deal", nabývá na významu nutnost rozvoje inovativních řešení v oblasti navyšování energetické efektivity a snižování množství produkovaných emisí napříč průmyslovými odvětvími. Tento fakt je ještě více umocněn ve vysoce energeticky náročných sektorech průmyslu, ke kterým se řadí i průmysl keramický. Specifické podmínky v keramické výrobě nutí výrobní společnosti, aby se spolupodílely na hledání nových cest k udržitelnosti. Vedle zavádění a rozšiřování konvenčních postupů a technologií tak může být jednou z možností, jak se s nastalou situací vypořádat, výzkum použitelnosti CCSU řešení v podobě bioreaktorů.

Cíle diplomové práce:

1. Literární rešerše současného stavu poznání v oblasti zachycování a ukládání resp. dalšího využití uhlíku
2. Představení potenciálu řasových technologií pro zachyt CO₂
3. Příprava dat z vybraného provozu ve spolupráci s průmyslovým partnerem za účelem integrace technologie pro zachyt CO₂
4. Posouzení využitelnosti řasových technologií pro podmínky daného provozu

Seznam doporučené literatury:

Carbon Capture and Storage [online]. 2nd. Oxford: Elsevier, 2017 [cit. 2021-03-12]. ISBN 9780128120415. Dostupné z: doi:10.1016/C2015-0-01587-8.

KAMKENG, Ariane D.N., Meihong WANG, Jun HU, Wenli DU a Feng QIAN. Transformation technologies for CO₂ utilisation: Current status, challenges and future prospects. Chemical Engineering Journal [online]. 2021, 409, 128138. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.128138.

GAYATHRI, R., Shahid MAHBOOB, Marimuthu GOVINDARAJAN, Khalid A. AL-GHANIM, Zubair AHMED, Norah AL-MULHM, Masa VODOVNIK a Shankar VIJAYALAKSHMI. A review on biological carbon sequestration: A sustainable solution for a cleaner air environment, less pollution and lower health risks. Journal of King Saud University - Science [online]. 2021, 33(2), 101282. ISSN 10183647. Dostupné z: doi:10.1016/j.jksus.2020.101282.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Rostoucí koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře negativně ovlivňuje život na naší planetě. Lidstvo řeší vyvstálý problém prostřednictvím nadnárodních organizací, které motivují průmyslové podniky k rozvoji inovativních řešení v oblasti navyšování energetické efektivity a snižování množství produkovaných emisí. Nejvíce jsou zasaženy energeticky náročné sektory průmyslu, ke kterým se řadí i průmysl keramický. Diplomová práce si zakládá na důkladné rešerši odborné literatury, zejména vědeckých článků. V teoretické části je čtenář uveden do problematiky zvyšující se koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, poté jsou představeny technologie zachycení, uložení a využití tohoto emisního plynu. Následně se práce zaměřuje na jednu z inovativních technologií – mikrořasové bioreaktory. Praktická část posuzuje využitelnost mikrořasových bioreaktorů pro záchyt emisního oxidu uhličitého v jednom z výrobních závodů společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.* realizující se v keramickém průmyslu. Trubicový bioreaktor o objemu 2000 m³ by zpracoval 3,75 % CO₂ produkovaného klíčovým zařízením provozu – rozprachovou sušárnou, přičemž se vyprodukuje 367,92 t mikrořasové biomasy za rok.

KLÍČOVÁ SLOVA

Emise CO₂, CCS, CCU, keramický průmysl, bioreaktor, mikrořasy, kultivace

ABSTRACT

The rising level of carbon dioxide in the atmosphere has negative effects on life on our planet. Humanity is now dealing with the issue through multinational organizations which attempt to motivate the current industry to develop innovative solutions to increase the energy-efficiency while lowering the amount of produced emissions. The most affected are energy-intensive sectors of the industry, such as the ceramics industry. This diploma thesis is based on a thorough research conducted on scientific literature, mainly scientific articles. The theoretical part is to familiarize one with the issue of rising levels of carbon dioxide. Next, methods to capture, store and use the gas are presented. Furthermore, the thesis focuses on one such method – microalgal bioreactors. The practical part weighs the usability of microalgal bioreactors for the purpose of carbon dioxide emissions capture in a production company *LASSELSBERGER, s.r.o.* belonging to the ceramic industry. Tubular bioreactor with a volume of 2000 m³ would process 3,75 % of CO₂ produced by the core production machine – spray drier, during this process 367,92 tons of microalgal biomass would be produced annually.

KEYWORDS

CO₂ emissions, CCS, CCU, ceramics industry, bioreactor, microalgae, cultivation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

REK, David. *Metody a technologie pro zachyt oxidu uhličitého v průmyslových provozech* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137163>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Kateřina Sukačová.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí práce RNDr. Kateřině Sukačové Ph.D. za její věcné připomínky, rady, ochotu a čas věnovaný mé diplomové práci. Dále bych rád poděkoval společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.* za možnost zpracování diplomové práce z průmyslové praxe, resp. Ing. Tomáši Dufkovi za ochotné jednání a poskytnutí potřebných podkladů. Nakonec bych chtěl poděkovat pracovníkům Ústavu procesního inženýrství FSI VUT za odborné rady.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením RNDr. Kateřiny Sukačové Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

David Rek

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	OXID UHLIČITÝ – SKLENÍKOVÝ PLYN	14
2.1	Vývoj koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře	14
2.2	Následky zvyšující se koncentrace CO ₂ v atmosféře	15
2.3	Zdroje emisí oxidu uhličitého	16
2.4	Kroky ke snížení emisí oxidu uhličitého a zmírnění změny klimatu	17
2.4.1	Pařížská dohoda	17
2.4.2	Zelená dohoda pro Evropu	18
2.5	Shrnutí a diskuze	19
3	TECHNOLOGIE ZACHYCENÍ, ULOŽENÍ A VYUŽITÍ CO₂	20
3.1	Zachycení CO ₂	20
3.1.1	Zachycení CO ₂ po procesu konverze/spalování	20
3.1.2	Zachycení CO ₂ při spalování v kyslíkové atmosféře	21
3.1.3	Zachycení CO ₂ před procesem spalování	22
3.1.4	Mechanismy separace CO ₂ ze směsi	23
3.2	Transport CO ₂	25
3.3	Technologie CCS	26
3.3.1	Geologické uložení CO ₂	27
3.3.2	Uložení CO ₂ do oceánů	29
3.4	Technologie CCU	30
3.4.1	Přímé využití	31
3.4.2	Chemická konverze CO ₂	31
3.4.3	Biologická konverze CO ₂	32
3.5	Shrnutí a diskuze	32
4	POTENCIÁL MIKROŘASOVÝCH BIOREAKTORŮ	33
4.1	Možnosti využití mikrořasové biomasy	33
4.2	Faktory ovlivňující růst mikrořas	34
4.2.1	Nutriční (chemické) faktory	34
4.2.2	Světlo	35
4.2.3	Teplota	37
4.2.4	Hodnota pH/koncentrace CO ₂	38
4.2.5	Rozpuštěný kyslík	39
4.3	Typy bioreaktorů pro kultivaci mikrořas v průmyslovém měřítku	40
4.3.1	Traťový systém kultivace	40
4.3.2	Plošinový (kaskádový) bioreaktor	41

4.3.3	Trubicový bioreaktor	42
4.3.4	Deskový bioreaktor	44
4.3.5	Charakteristické parametry jednotlivých typů mikrořasových bioreaktorů	44
4.4	Hodnocení profitability produkce mikrořasové biomasy	46
4.5	Budoucnost mikrořasových bioreaktorů jakožto CCU technologie	49
4.6	Shrnutí	50
5	MOŽNOSTI VYUŽITÍ EMISNÍHO CO₂ VE VYBRANÉM PROVOZU	51
5.1	Představení společnosti	51
5.2	Proces výroby keramických obkladů/dlažeb	52
5.3	Rozprachová sušárna	54
5.3.1	Popis funkce sušárny	54
5.3.2	Možnosti využití emisí CO ₂ z rozprachové sušárny	55
6	INTEGRACE MIKROŘASOVÉHO BIOREAKTORU DO VYBRANÉHO PROVOZU	58
6.1	Stanovení účelu kultivace	58
6.2	Volba vhodného rodu mikrořas	59
6.3	Kontrola/úprava parametrů přiváděného proudu spalin	60
6.4	Výběr typu bioreaktoru	62
6.5	Výpočet základních parametrů kultivačního systému	63
6.5.1	Varianta 1 – velkokapacitní bioreaktor o objemu 2000 m ³	63
6.5.2	Varianta 2 – bioreaktor pro kompletní využití CO ₂	66
7	ZÁVĚR	69
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	81
10	SEZNAM TABULEK	83
11	SEZNAM PŘÍLOH	84

1 ÚVOD

Oxid uhličitý jakožto jeden ze skleníkových plynů přispívá ke skleníkovému efektu a změně klimatu. Jeho koncentrace v atmosféře neustále roste, čímž se negativní účinky na planetu Zemi umocňují. Vystavilý problém řeší nadnárodní organizace (*Organizace spojených národů, Evropská unie*), a to snahou o uzavírání mezinárodních dohod týkajících se opatření v oblasti klimatu.

Na základě těchto dohod jsou průmyslové podniky nuceny hledat inovativní řešení v oblasti navyšování energetické efektivity a snižování množství produkovaných emisí. Tato diplomová práce má za cíl představit současný stav poznání v oblasti zachycování, uložení a využití oxidu uhličitého. Zaměřuje se hlavně na technologie a metody, které lze aplikovat v průmyslových provozech.

Jednou ze zkoumaných technologií pro snížení emisí průmyslových provozů je i biologická fixace oxidu uhličitého pomocí mikrořasových bioreaktorů. Mikrořasy v posledních letech celosvětově přitahují značný zájem, a to hlavně díky jejich rozsáhlému aplikačnímu potenciálu. Diplomová práce seznámí čtenáře nejen s jejich potenciálem, ale i s obecnými principy fungování bioreaktorů a faktory ovlivňujícími růst mikrořas. Tím poskytne potřebné podklady pro analýzu využitelnosti mikrořasových bioreaktorů v průmyslových provozech.

Konkrétně se bude zabývat problémem jednoho z výrobních závodů společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.* Společnost se realizuje ve vysoce energeticky náročném sektoru průmyslu – keramickém průmyslu. Ve výrobním závodě v Chlumčanech dochází při výrobě obkladů a dlažeb k produkci velkého množství emisí oxidu uhličitého. Diplomová práce posoudí využitelnost mikrořasových technologií pro podmínky daného provozu.

První část diplomové práce uvede problematiku zvyšující se koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, jeho zdroje a negativní následky na planetu Zemi. Poté seznámí čtenáře s technologiemi zachycení, uložení a využití tohoto emisního plynu. Následně se zaměří na jednu z těchto technologií – mikrořasové bioreaktory. Představí jejich potenciál, uvede rozsáhlé možnosti aplikace mikrořasové biomasy a shrne nejdůležitější informace týkající se kultivace mikrořas v průmyslovém měřítku. Touto rešeršní analýzou problematiky připraví podklady pro poslední, praktickou část, která se zabývá posouzením konkrétního problému, a to redukcí emisí oxidu uhličitého z rozprachové sušárny ve výrobním závodě v Chlumčanech. V této části bude představen postup pro integraci mikrořasového bioreaktoru a vypočteny základní parametry kultivačního systému. Nakonec budou zhodnoceny dosažené výsledky.

2 OXID UHLIČITÝ – SKLENÍKOVÝ PLYN

Plyny, které zachycují teplo v atmosféře a přispívají k tzv. skleníkovému efektu, se nazývají skleníkové plyny. Jedním z klíčových skleníkových plynů pohánějících globální změnu klimatu je oxid uhličitý. Tato kapitola popisuje vývoj koncentrace CO_2 v atmosféře, jeho dopady na životní prostředí a plány, jak se vypořádat s negativními důsledky tohoto jevu.

2.1 Vývoj koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře

Atmosférická koncentrace oxidu uhličitého – nejnebezpečnějšího a nejrozšířenějšího skleníkového plynu se v současné době nachází na nejvyšších hodnotách v historii a neustále roste.

Podle odhadů koncentrace CO_2 v atmosféře za posledních 800 000 let konzistentně kolísala, a to v korelaci se změnou doby ledové (nízká koncentrace CO_2) a interglaciálů (vysoká koncentrace CO_2). Za toto dlouhé období nepřesáhla hodnotu 300 ppm. S nástupem průmyslové revoluce však koncentrace CO_2 v atmosféře prudce vzrostla a dnes dosahuje hodnot přesahujících 400 ppm (viz Obr. 1). [1]

Problémem není pouze vysoká koncentrace CO_2 v atmosféře, ale také rychlost, jakou se hodnota změnila. Změny v koncentraci CO_2 obvykle probíhaly v rámci několika stovek let, lidstvo však svou činností přispělo k mnohem většímu nárůstu koncentrace CO_2 , a to za mnohem kratší dobu (několik desítek let). Živočišné druhy a ekosystémy tak mají mnohem méně času na přizpůsobení se měnícímu se prostředí.

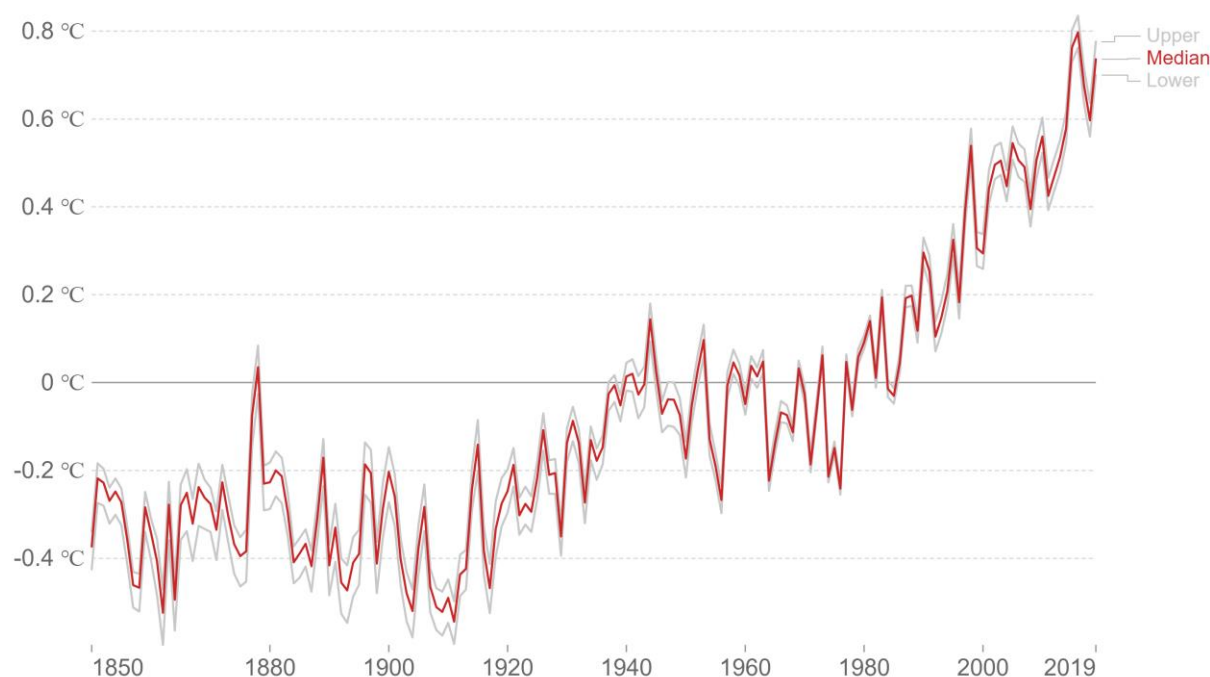


Obr. 1 Odhadovaný vývoj koncentrace CO_2 v atmosféře [1], [2]

2.2 Následky zvyšující se koncentrace CO₂ v atmosféře

I přes různorodost názorů na problematiku globálního oteplování a změny klimatu, hlavní zpráva *Mezivládního panelu pro změnu klimatu* (IPCC) uvádí, že vědci jsou si s pravděpodobností 95 % jisti vazbou mezi lidskou činností a globálním oteplováním. Lidská činnost je tedy dominantní příčinou pozorovaného oteplování od poloviny 20. století. [3]

Globální oteplování má již měřitelné účinky na naši planetu. *Národní úřad pro oceán a atmosféru* (NOAA) uvádí, že se průměrná teplota za posledních 100 let zvýšila přibližně o 0,8 °C [4]. Na Obr. 2 vidíme, jak prudce za několik posledních desetiletí globální teploty vzrostly.



Obr. 2 Roční globální difference průměrné teploty (vztaheno k průměrné teplotě z let 1961-1990) [5], [6]

S rostoucí teplotou dochází k tání ledovců. Podle amerického *Národního datového centra pro sníh a led* (NSIDC) je nyní na severní polokouli o 10 % méně permafrostu, než tomu bylo na počátku 20. století [7]. S tajícími ledovci stoupá hladina moří. Očekává se, že tání polárního ledu výrazně zvýší hladinu moří, což zasáhne nezanedbatelnou část populace Země (kolem 10% celosvětové populace žije v pobřežních oblastech do 10 metrů nad mořem) [8]. *Mezivládní panel pro změnu klimatu* (IPCC) uvádí, že pokud emise skleníkových plynů zůstanou nekontrolované, mohly by se hladiny moří do roku 2100 zvýšit až o 0,9 metru [3].

Extrémní výkyvy počasí jsou dalším následkem globálního oteplování. Například hurikány se stanou méně častými, zato mnohem intenzivnějšími. Teplotní rozdíl mezi teplým tropickým oceánem a chladnou horní atmosférou je hnací silou hurikánů a globální oteplování tento rozdíl neustále zvyšuje. Dále má globální oteplování vliv i na četnost bouřek. Studie uvádí, že pokud světové teploty nadále porostou, do roku 2100 se dá očekávat nárůst počtu úderů blesků v USA o 50 % [9]. Vědci dále předpokládají, že výkyvy počasí jako jsou např. vlny veder, sucha atp. se budou vyskytovat mnohem častěji a s větší intenzitou. Klimatické vzorce zažijí významné změny, které budou zahrnovat rozdíly v charakteristikách větru, ročních srážek a kolísání sezónních teplot. [4]

Mezi další následky zvyšující se koncentrace CO_2 v atmosféře, resp. globálního oteplování patří acidifikace¹ oceánů, hroucení ekosystémů, pokles biodiverzity atd. Globální oteplování má i nepřímý vliv na lidské zdraví a šíření nemocí.

2.3 Zdroje emisí oxidu uhličitého

Celosvětově je ročně produkováno téměř 50 miliard tun skleníkových plynů (uvedeno v CO_2 ekv.²) [10]. Emise oxidu uhličitého, resp. skleníkových plynů vznikajících v důsledku lidské činnosti pochází hned z několika zdrojů. Můžeme je rozdělit například na energie (elektřina, teplo a doprava), zemědělství a lesnictví, přímý vznik při průmyslových procesech a sektor odpadů (viz Obr. 3).

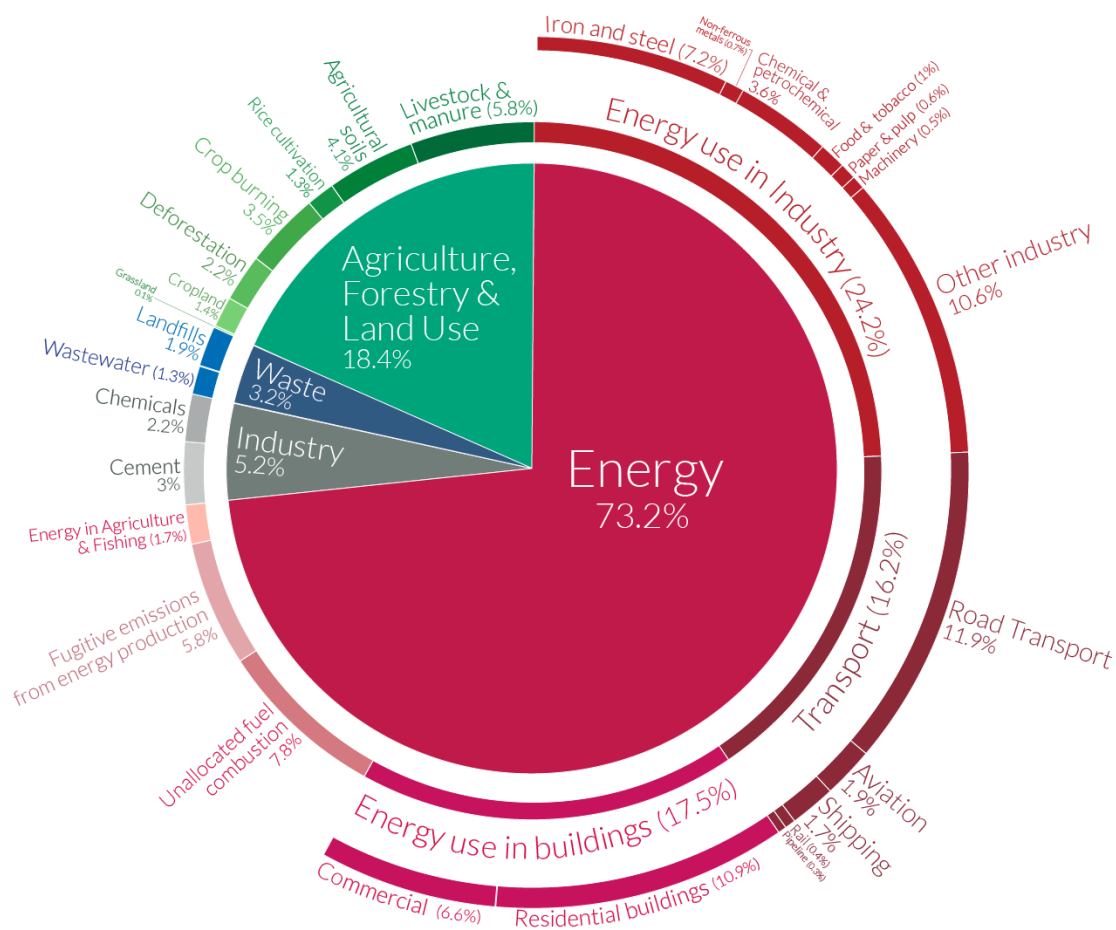
Celkově pokrývají energie téměř tři čtvrtiny (73,2 %) produkovaných emisí skleníkových plynů. Z toho 24,2 % náleží energiím potřebných pro průmyslové procesy, 17,5 % spotřebě energie v budovách (elektřina, teplo) a 16,2 % dopravě (zejména spalování fosilních paliv).

Zemědělství a lesnictví přímo produkuje 18,4 % celkových emisí. Vezmeme-li výrobu potravin jako celek (zpracování potravin, balení, dopravu), bude tento sektor představovat přibližně jednu čtvrtinu emisí.

Zbývajících 8,4 % produkovaných emisí tvoří přímý vznik skleníkových plynů při průmyslových procesech a sektor odpadů. Jako příklad si můžeme uvést výrobu cementu. Při jeho výrobě vzniká oxid uhličitý jako vedlejší produkt chemické přeměny vápence (CaCO_3) na nehasené vápno (CaO). Sektor odpadů zahrnuje hlavně emise metanu vznikajících při rozkladu zbytků ze zvířat, rostlin, lidí a jejich odpadních produktů hromadících se v odpadních vodách a na skládkách.

¹ Acidifikace je proces, při kterém dochází k okyselení půdního nebo vodního prostředí.

² Ekvivalent oxidu uhličitého shrnuje potenciál dopadů jednotlivých skleníkových plynů na globální oteplování do jediné hodnoty. Hmotnost emitovaných skleníkových plynů (jiných než CO_2) je vynásobena „potenciálem globálního ohřevu“ (GWP), čímž vzniká ekvivalent oxidu uhličitého pro dané množství skleníkového plynu.



Obr. 3 Globální zdroje emisí CO₂ [10]

2.4 Kroky ke snížení emisí oxidu uhličitého a zmírnění změny klimatu

Zmírnění dopadů změny klimatu spočívá ve snížení množství vypouštěných skleníkových plynů (resp. oxidu uhličitého) do atmosféry. Lidstvo proto prostřednictvím nadnárodních organizací přistupuje v rámci boje se změnou klimatu k opatřením směřujícím ke snížení těchto emisí.

2.4.1 Pařížská dohoda

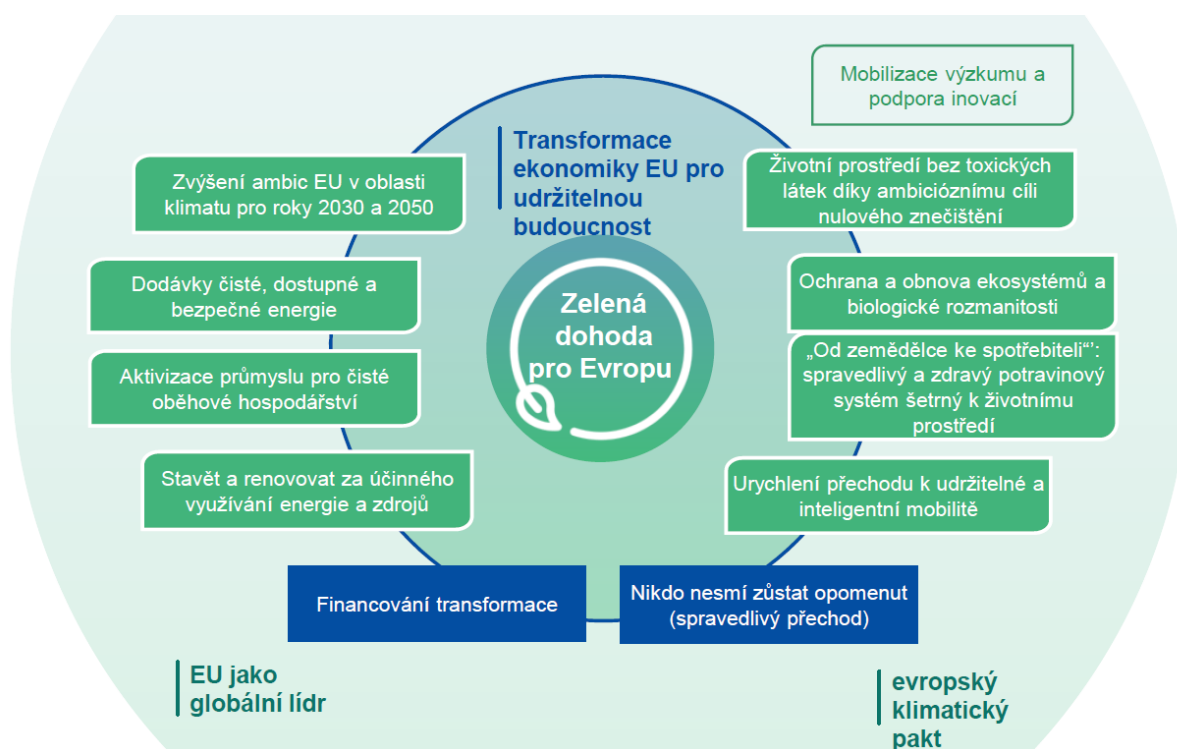
V roce 2015 *Organizace spojených národů* (OSN) iniciovala uzavření významné mezinárodní dohody, tzv. *Pařížské dohody*, která znamenala historický zlom pro globální opatření v oblasti klimatu. Tato úmluva byla podepsána téměř 197 státy a jejím účelem je řešení změny klimatu a s ní spojených negativních dopadů. Ať už jde o vyspělé nebo rozvojové země, všechny smluvní strany se zavazují stanovit si vnitrostátní redukční příspěvky k dosažení cílů *Pařížské dohody*. [11], [12]

Mezi hlavní cíle patří podstatné snížení globálních emisí skleníkových plynů, ochrana klimatu a omezení nárůstu průměrné globální teploty výrazně pod hranici 2 °C v porovnání s obdobím před průmyslovou revolucí. Dále se smluvní strany zavazují, že budou usilovat o hledání prostředků k omezení nárůstu teploty pod hranici 1,5 °C. [12]

2.4.2 Zelená dohoda pro Evropu

V souladu s *Pařížskou dohodou*, kterou podepsaly všechny členské státy *Evropské unie* (EU), přichází v roce 2019 *Zelená dohoda pro Evropu*. Ta představuje plán, na jehož základě má *Evropská unie* realizovat své ambice v oblasti klimatu – učinit z Evropy první klimaticky neutrální kontinent³. *Evropská unie* stojí v čele boje proti změnám klimatu a jako globální lídr se snaží inspirovat k cílevědomým aktivitám v této oblasti.

Hlavním cílem *Zelené dohody pro Evropu* je: „transformovat EU na spravedlivou a prosperující společnost s moderní a konkurenceschopnou ekonomikou efektivně využívající zdroje, která v roce 2050 nebude produkovat žádné emise skleníkových plynů a ve které bude hospodářský růst oddělen od využívání zdrojů“ [13]. Milníkem k dosažení tohoto ambiciózního plánu je snížení emisí do roku 2030 nejméně o 55 % oproti roku 1990. Jednotlivé prvky komplexní strategie *Zelené dohody pro Evropu* můžeme vidět níže (viz Obr. 4).



Obr. 4 Cíle a jednotlivé prvky Zelené dohody pro Evropu [13]

³ Klimatická neutralita znamená hospodářství s nulovými čistými emisemi skleníkových plynů.

2.5 Shrnutí a diskuze

Koncentrace oxidu uhličitého, nejrozšířenějšího skleníkového plynu, v atmosféře nezpochybnitelně roste a dosahuje nejvyšších hodnot v historii. Působí tak negativně na naši planetu, značnou mírou se podílí na skleníkovém efektu a podle *Mezivládního panelu pro změnu klimatu* (IPCC) s největší pravděpodobností i na globálním oteplování [3].

Lidstvo svou činností produkuje obrovské množství oxidu uhličitého každý rok. Ať už se jedná o průmysl, zemědělství, dopravu, služby nebo každodenní život, všude dochází do jisté míry k produkci emisního oxidu uhličitého. Je tedy zřejmé, že neexistuje jediné a jednoduché řešení tohoto problému. Zaměřit se na jednotlivé sektory nestačí. Problém je potřeba řešit komplexně a nacházet inovace napříč všemi sektory.

Evropa, resp. *Evropská unie* se v tomto směru snaží jít příkladem celému světu a přichází s komplexním balíčkem opatření. V roce 2019 podepisují všechny členské státy tzv. *Zelenou dohodu pro Evropu*, jejíž cílem je učinit z Evropy první klimaticky neutrální kontinent, a to do roku 2050.

3 TECHNOLOGIE ZACHYCENÍ, ULOŽENÍ A VYUŽITÍ CO₂

Na základě mezinárodních dohod o změně klimatu byly představeny základní technologické postupy a mechanismy zajišťující snižování emisí oxidu uhličitého. V této kapitole se budeme zabývat technologiemi zachycení oxidu uhličitého relevantními k tématu diplomové práce, tj. technologiemi, které lze využít v průmyslových provozech. V závislosti na tom, jak je naloženo se zachyceným oxidem uhličitým, rozlišujeme dvě technologické metody: CCS („Carbon capture and storage“) a CCU („Carbon capture and utilisation“).

V obou případech nejprve dochází k zachycení oxidu uhličitého ze směsi plynů (nejčastěji spalin). Druhým krokem je co nejekonomičtější doprava k technologii CCS, resp. CCU. Nakonec dochází k uskladnění (CCS) nebo k využití (CCU) zachyceného oxidu uhličitého. V následujících podkapitolách bude představeno rozdělení a popis jednotlivých technologií.

3.1 Zachycení CO₂

Ať už jde o výrobu elektřiny, spalování uhlí a zemního plynu, výrobu železa a oceli, cementu nebo papíru, všechny zmíněné procesy produkují jako vedlejší produkt velké množství oxidu uhličitého (viz Obr. 3, str. 17). Aplikace technologie zachycení oxidu uhličitého v těchto procesech bude hrát klíčovou roli při snižování globálních emisí.

Technologie zachycení oxidu uhličitého se ve velkém měřítku používají v některých odvětvích již desetiletí (např. zpracování zemního plynu), v poslední době se však kvůli nařízením postihujícím vypouštění emisí začínají rozšiřovat i do ostatních průmyslových odvětví. [14]

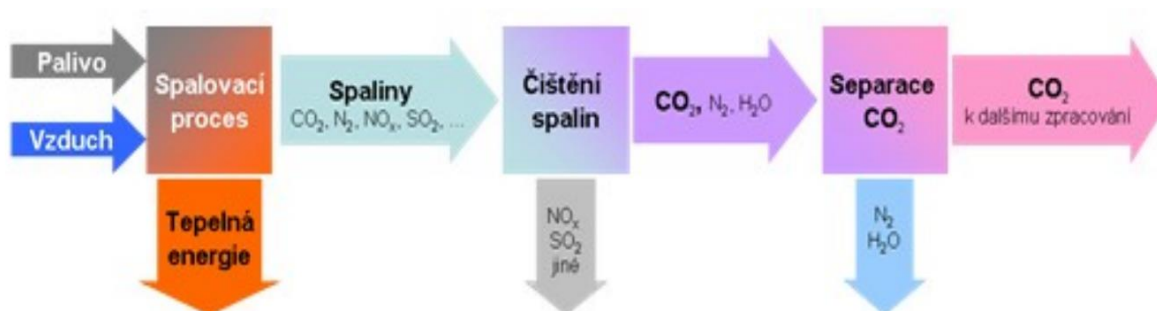
V současnosti se využívají tři základní uspořádání technologií s cílem zachycení oxidu uhličitého: zachycení CO₂ po procesu konverze/spalování, zachycení CO₂ při spalování v kyslíkové atmosféře a zachycení CO₂ před procesem konverze.

3.1.1 Zachycení CO₂ po procesu konverze/spalování

V tomto případě dochází ke konverzi uhlíku na oxid uhličitý a následnému zachycení a separaci produkovaného plynu („post-conversion capture“). Tento způsob lze využít při spalování fosilních paliv, digesce kalu z odpadních vod, výrobě cementu, paliv, železa a oceli atp. Jedná-li se o aplikaci ve spojení se spalováním, označuje se zachycení po procesu konverze jako zachycení po procesu spalování („post-combustion capture“). Při integraci do procesu vyžaduje tato technologie nejmenší zásahy do stávajícího zařízení. Na druhou stranu procesem zachycení procházejí velké objemy plynu, což je jedna z hlavních nevýhod. [15]

Co se týče samotné technologie, dochází nejprve k vyčištění spalín od popílku, sloučenin síry a dusíku. Následně je separován oxid uhličitý, a to nejčastěji principem chemické absorpce, která se ukazuje jako jedna z nejslibnějších [16]. Zachycení oxidu uhličitého po procesu spalování se běžně používá např. pro potřeby potravinářského průmyslu [14]. Schéma celého procesu můžeme vidět níže (viz Obr. 5).

Z emisního plynu se při relativně nízké teplotě (50 °C) zachytí oxid uhličitý např. pomocí aminového rozpouštědla, které oxid uhličitý absorbuje (tzv. mokrá vypírka). Poté se rozpouštědlo zahřívá na přibližně 120 °C, čímž dochází k uvolnění oxidu uhličitého. Rozpouštědlo se tímto recykluje, uvolněný oxid uhličitý se suší, stlačuje a transportuje k dalšímu zpracování. [17]



Obr. 5 Schematické znázornění technologie zachycení CO₂ po procesu konverze [18]

3.1.2 Zachycení CO₂ při spalování v kyslíkové atmosféře

Při spalování paliva se vzduchem musí celým procesem projít i velké množství dusíku obsaženého ve vzduchu, který se přímo neúčastní reakce. Vzhledem ke složení vzduchu (78 % dusíku, 21 % kyslíku) stojí za zvážení, nebude-li výhodné nejprve dusík separovat a do spalovací komory přivádět čistý kyslík.

Do spalovacího procesu tedy není přiváděn vzduch, ale atmosféra vznikající oddělením dusíku ze vzduchu (Obr. 6). Nedochází tak k ředění spalín a spalovací proces probíhá za podmínek blízkých stechiometrickému spalování. V literatuře lze tento způsob spalování najít také pod názvem „oxy-fuel combustion“ [19].

Teploty ve spalovací komoře dosahují vysokých hodnot, proto je část spalín ochlazena a recirkulována [19]. Spalováním paliva v takto připravené atmosféře vzniká směs obsahující převážně vodní páry a oxid uhličitý, který lze poměrně snadno oddělit, vyčistit a následně transportovat k dalšímu zpracování.

Mezi hlavní výhody tohoto způsobu patří nižší náklady na zachycení oxidu uhličitého (zpracovává se menší množství spalín), hlavní nevýhodou je velmi nákladný provoz kryogenního separátoru [19].



Obr. 6 Schematické znázornění technologie zachycení CO₂ při spalování v kyslíkové atmosféře [18]

3.1.3 Zachycení CO₂ před procesem spalování

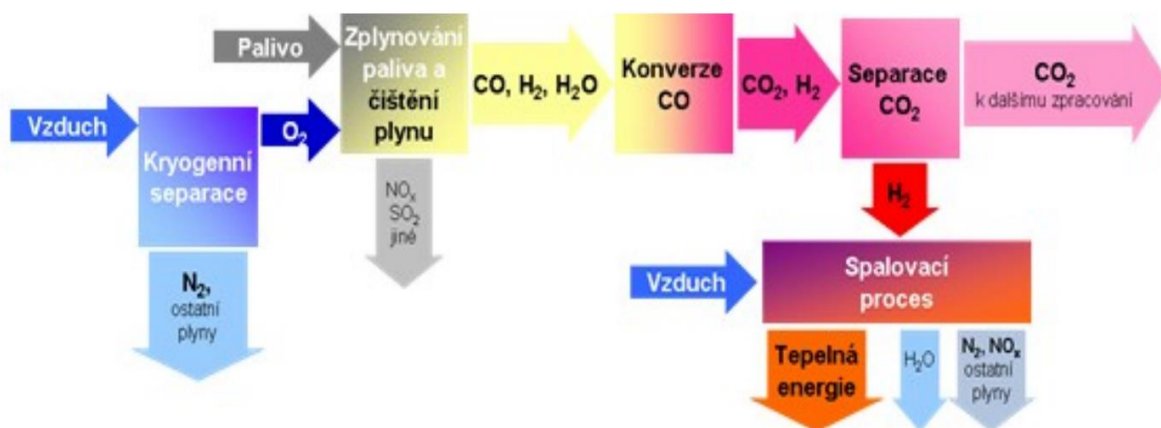
Ikdyž se může zachycení oxidu uhličitého před spalováním („pre-combustion capture“) zdát jako nemožný úkol, nachází své uplatnění v některých průmyslových aplikacích. Tuto technologii lze použít v případech, kdy jsou fosilní paliva zplyňována (reformována)⁴. Proces se také označuje jako IGCC („Integrated Gasification Combined Cycle“) a v praxi se nejčastěji setkáváme s parním reformingem zemního plynu nebo vyšších uhlovodíků [18].

V případě reformování zemního plynu je hlavní reakcí konverze metanu s vodní párou (1). Tímto způsobem vzniká syntézní směs („syngas“) oxidu uhelnatého a vodíku. Poté přidáním vody (vodní páry) a změnou podmínek dochází ke konverzi s oxidem uhelnatým a vzniku oxidu uhličitého a dalšího vodíku (2). [20]



Oxid uhličitý může být posléze separován např. principem chemické absorpce pomocí aminového rozpouštědla. Vzniklý vodík je využit jako palivo pro spalování (nebo se dále zpracovává). Oxid uhličitý může být z rozpouštědla uvolňován při atmosférickém tlaku, k regeneraci rozpouštědla a uvolnění oxidu uhličitého je potřeba méně tepla, než tomu bylo u zachycení CO₂ po procesu konverze/spalování, což vede až k polovičním energetickým požadavkům. Na druhou stranu kroky nutné k přípravě paliva jsou v případě zachycení před spalováním obtížnější nežli u zachycení po spalování (viz Obr. 7). [17], [21]

⁴ Rozdíl mezi zplyňováním (resp. reformingem) a spalováním je hlavně v množství přiváděného vzduchu. Spalování probíhá při přebytku vzduchu, zplyňování při nedostatku. Termín zplyňování se používá pro tuhá paliva, reforming pro paliva plynná.



Obr. 7 Schematické znázornění technologie zachycení CO_2 před procesem spalování [18]

Pozn. Schéma znázorňuje proces zplyňování tuhých paliv nikoliv parní reforming zemního plynu (procesy jsou však analogické).

3.1.4 Mechanismy separace CO_2 ze směsi

Výše popsané způsoby zachycení oxidu uhličitého mluví o umístění a uspořádání jednotlivých technologií, nikoliv o mechanismech separace oxidu uhličitého. Ty budou představeny v této podkapitole.

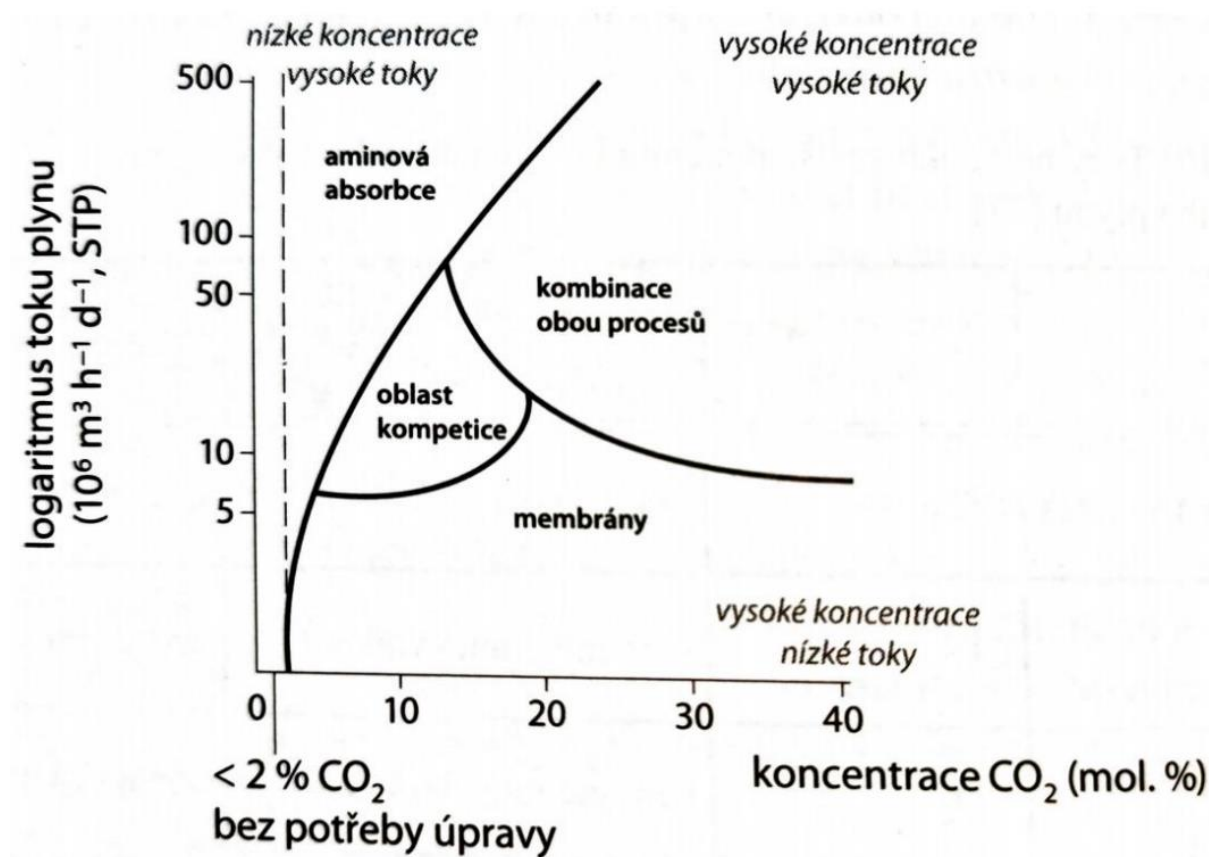
Prvním široce využívaným mechanismem založeným na reakci mezi oxidem uhličitým a chemickým rozpouštědlem je absorpce. Mezi nejpokročilejší a nejvyužívanější absorbéry patří aminová rozpouštědla [22]. Z výhod můžeme zmínit vysokou účinnost separace i u nízkých koncentrací oxidu uhličitého, z nevýhod nízkou kapacitu absorpce (30 až 60 g na 1 kg absorbentu) [23].

Další možností zachycení oxidu uhličitého je adsorpce s kolísáním tlaku. Proces se dá rozdělit do dvou fází. Nejprve dochází k adsorpci za zvýšeného tlaku, poté snížením tlaku dosáhneme desorpce. Mezi nejpoužívanější adsorbenty můžeme zařadit aktivní uhlí, zeolity, silikagely atd. Adsorbenty bohužel mají mnoho nevýhod – nesnášenlivost vůči složkám spalin (NO_x , SO_x atp.), nízkou kapacitu adsorpce a nižší účinnost separace. [24]

Membránové technologie lze uvést jako poslední využívaný mechanismus. V současné době patří k málo probádaným, jeho velký potenciál však tkví v použití v kombinaci s ostatními technologiemi separace oxidu uhličitého (viz Obr. 8). Membránová separace je tlakem řízený proces, který využívá polopropustné membrány k separaci molekul cílené látky. Mezi výhody patří snadný provoz a údržba, z nevýhod můžeme zmínit citlivost na složky spalin (NO_x , SO_x atp.) a nízkou teplotní odolnost. [25]

Porovnání jednotlivých separačních mechanismů

Separací mechanismy lze porovnat např. posouzením jejich využitelnosti pro dané provozní podmínky. Aminové absorbéry nacházejí uplatnění při vysokých průtocích a nižších koncentracích cílové látky, membránové technologie naopak při nízkých průtocích a vysokých koncentracích. V případě vysokých průtoků i koncentrací se vyplatí použít kombinaci obou technologií (viz Obr. 8). Využití adsorbentů se ukazuje jako nekonkurenceschopné. Základní procesní charakteristiky jednotlivých separačních mechanismů jsou shrnuty v Tab. 1. [26]



Obr. 8 Porovnání oblastí použití membránových technologií s aminovou absorpcí [26]

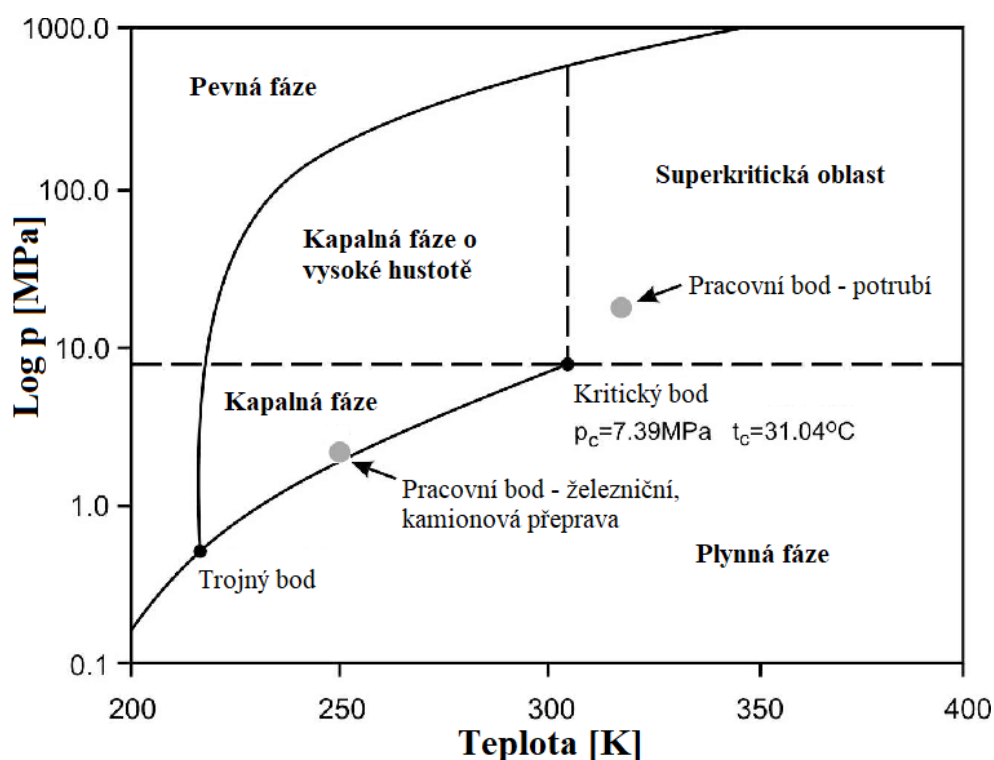
Tab. 1 Základní procesní charakteristiky jednotlivých separačních mechanismů [23], [24], [26], [27]

Parametr	Absorpce	Adsorpce	Membrány
Optimální vstupní koncentrace CO ₂ [% mol.]	> 5	> 10	> 15
Výstupní čistota CO ₂ [%]	> 95	75 – 90	80 – 95

3.2 Transport CO₂

V případech, kdy se technologie CCS nebo CCU nenachází přímo u zdroje oxidu uhličitého, je zapotřebí tento plyn přepravovat. Z ekonomických a logistických důvodů se oxid uhličitý nejčastěji přepravuje v kapalně fázi. Samotný transport lze realizovat hned několika způsoby.

Nejběžnějším z nich je transport pomocí potrubních systémů. Plyný oxid uhličitý se stlačuje nad kritický bod, tj. nad hodnotu 7,4 MPa (Obr. 9), čímž vzniká kapalina v superkritickém stavu [15]. Tím se zbavíme komplikací spojených s dvoufázovým režimem toku (toku plyného a kapalného oxidu uhličitého). Dochází také ke zvýšení hustoty superkritické kapaliny, takže se doprava stává snazší a méně nákladnou.

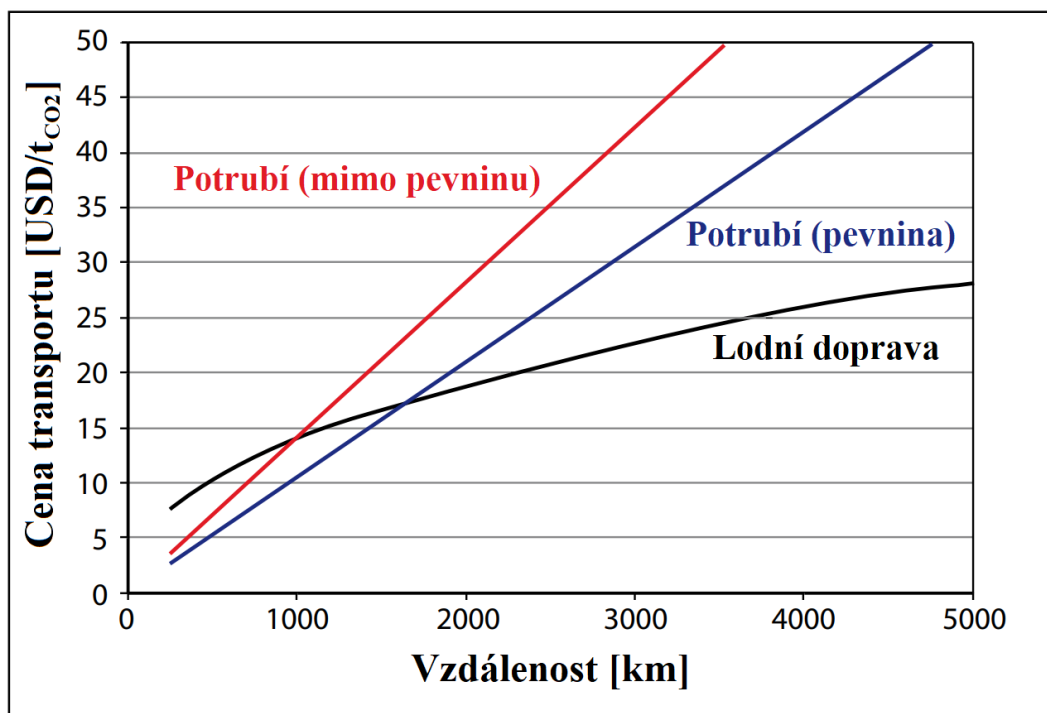


Obr. 9 Fázový diagram oxidu uhličitého [28]

Další možností je využití lodní dopravy – tankerů. Ropné společnosti běžně přepravují zkapalněné ropné plyny (LPG) ve velkém měřítku, oxid uhličitý lze přepravovat stejným způsobem. Plyn je podchlazen hluboko pod okolní teplotu za působení nižšího tlaku, čímž se dostává do kapalně fáze (Obr. 9). V současné době však kvůli malé poptávce probíhá lodní doprava oxidu uhličitého jen v omezeném měřítku. [15]

Poslední možností je využití železniční, popřípadě kamionové přepravy. Tímto způsobem se oxid uhličitý opět přepravuje ve formě kapaliny, a to při teplotě -20°C a tlaku 2 MPa. [15]

Při výběru vhodného způsobu přepravy je třeba zvážit množství přepravované látky a vzdálenost přepravy. Transportovat oxid uhličitý s využitím kamionové či železniční dopravy je ekonomicky výhodné pouze na malé vzdálenosti a pro malé objemy. V současné době se mnohem více využívá přeprava potrubními systémy, kterých existuje celosvětově více než 4000 kilometrů, a to převážně v USA a Kanadě. Při dopravě oxidu uhličitého na střední až dlouhé vzdálenosti vychází obvykle transport za pomoci potrubí jako nejlevnější. V některých případech se však přeprava lodí ukazuje jako ekonomicky atraktivnější (viz Obr. 10). [16]



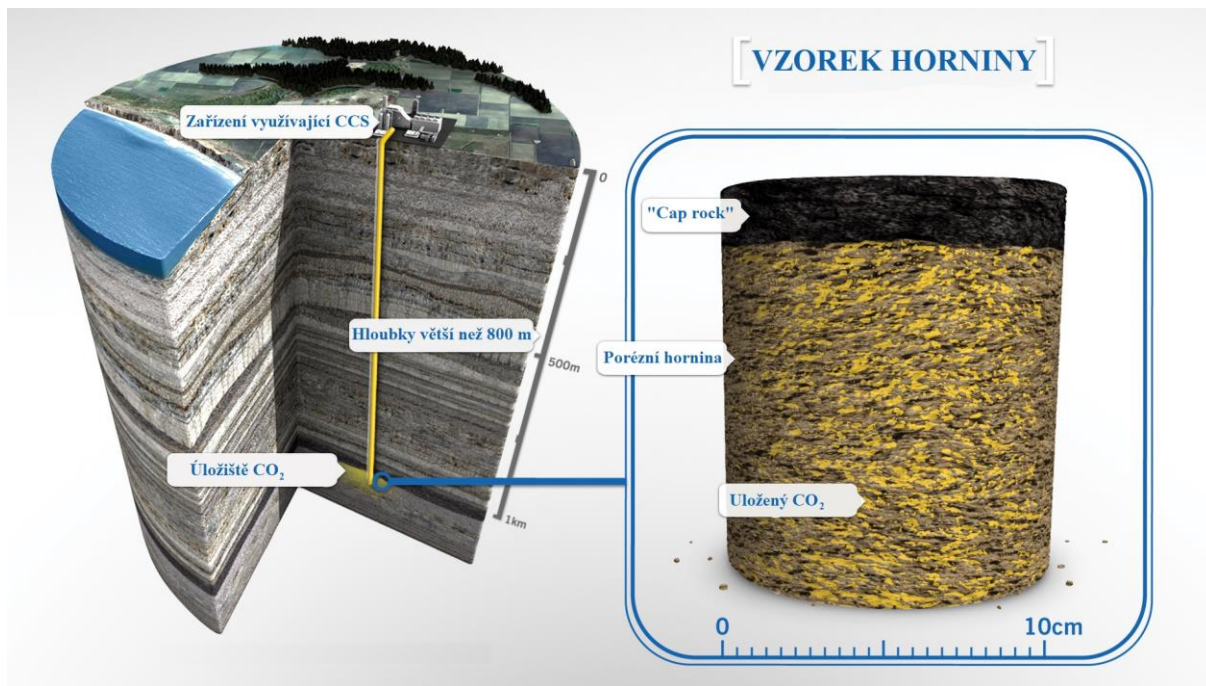
Obr. 10 Cena přepravy CO₂ v závislosti na dopravní vzdálenosti [15]

3.3 Technologie CCS

Technologie CCS („Carbon capture and storage“) označuje ucelený soubor technologií, kdy je zachycený oxid uhličitý vtlačován do úložišť umístěných ve velkých hloubkách (1000 metrů pod zemský povrch a níže) a kde dochází k jeho uskladnění. V základu existují dvě možnosti uložení: geologické uložení a uložení oxidu uhličitého do oceánů. Druhá z možností je však v současné době zakázána kvůli negativnímu dopadu na oceánské ekosystémy.

3.3.1 Geologické uložení CO₂

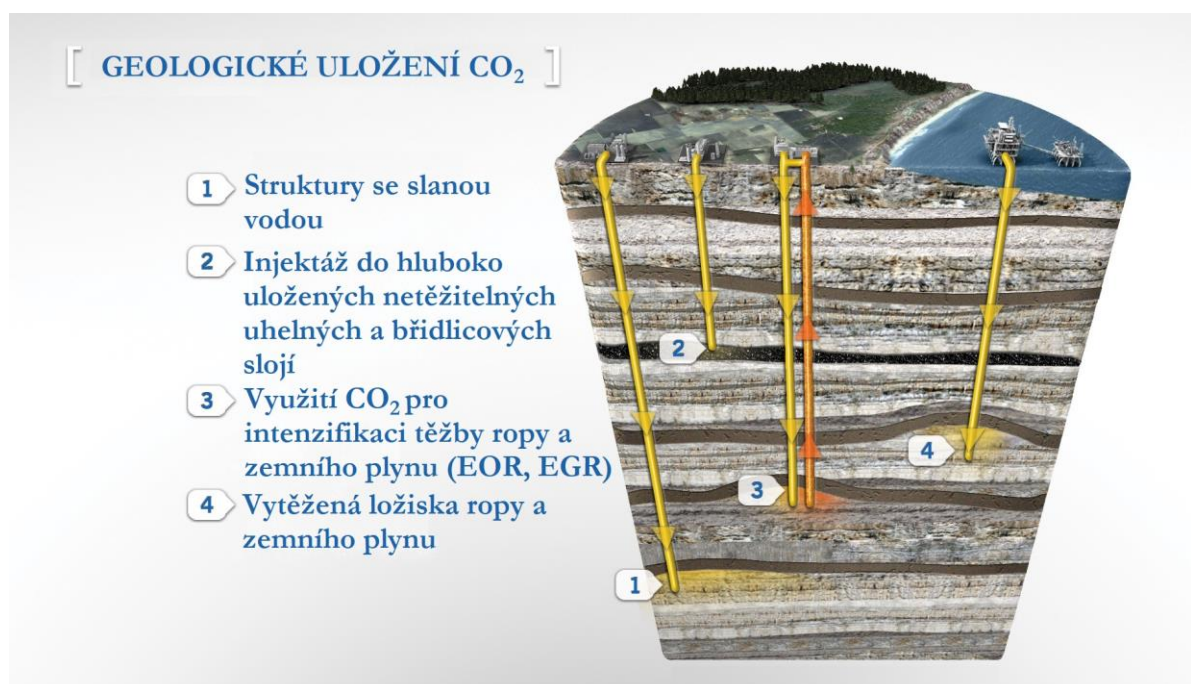
Při geologickém uložení se plyn zachycený během průmyslových procesů vtlačuje pod zemský povrch do hloubek větších než 800 metrů, kde vyplňuje mezery porézní horniny. Tlak a teplota v těchto podmínkách vedou k tomu, že se oxid uhličitý nachází v kapalně nebo superkritické fázi (viz Obr. 9). Jeho hustota se v tomto případě pohybuje mezi 50 až 80 procenty hustoty vody, která tvoří část okolního prostředí [15]. Rozdíl hustot vede k tomu, že molekuly oxidu uhličitého mají snahu stoupat vzhůru. Z tohoto důvodu musí být geologické úložiště překryté nepropustnou vrstvou jílovité horniny („cap rock“), která úložiště utěsňuje a brání úniku oxidu uhličitého do atmosféry (Obr. 11). [16]



Obr. 11 Schéma vhodného geologického úložiště CO₂ [29]

Vtlačování do hlubokých geologických formací zahrnuje mnoho podobných technologií, které byly vyvinuty pro těžbu ropy a zemního plynu. Existuje několik typů geologických úložišť vhodných pro uložení oxidu uhličitého: struktury se slanou vodou, téměř vytěžená nebo vytěžená ložiska ropy a zemního plynu, nebo hluboko uložené netěžitelné uhelné a břidlicové sloje (Obr. 12, Tab. 2).

V případě struktur se slanou vodou dochází k tzv. mechanismu geochemického zachytávání. Nejprve se oxid uhličitý rozpouští ve slané vodě. Vzhledem k podmínkám, jaké v tomto prostředí panují, může proces rozpouštění trvat stovky až tisíce let. Jakmile dojde k dokončení procesu, směs slané vody obohacené o oxid uhličitý se stává hustší, tím pádem klesá (na rozdíl od samotného oxidu uhličitého) a reaguje s okolními horninami, čímž po několika milionech let mohou vzniknout minerály (uhličitany). Celosvětově jsou struktury se slanou vodou považovány za geologické úložiště s největším potenciálem. Vzhledem k vysokým koncentracím solí totiž nejsou tyto struktury jinak ekonomicky využitelné. [15]



Obr. 12 Možnosti geologického uložení CO₂ [30]

Ložiska ropy a zemního plynu nabízejí kromě geologického úložného prostoru také ekonomickou příležitost, protože vtlačováním oxidu uhličitého do ložisek dochází ke zlepšení výtěžnosti fosilních paliv. Tato technika se v literatuře označuje zkratkou EOR, resp. EGR („Enhanced Oil Recovery“, resp. „Enhanced Gas Recovery“). Ropnými společnostmi je využívána ke zvýšení produkce již přibližně 40 let. Ložiska ropy a zemního plynu jsou považovány za vhodné kandidáty pro geologické uložení oxidu uhličitého, protože udržely fosilní paliva bez úniků po miliony let. [31], [32]

Další možností geologického uložení oxidu uhličitého by mohly být uhelné a břidlicové sloje, u kterých se nepředpokládá budoucí těžba (nacházejí se ve velkých hloubkách, takže by jejich těžba byla neekonomická). Vtlačováním oxidu uhličitého do takovýchto struktur dochází k vytlačení přítomného metanu. Oxid uhličitý se posléze naváže na uhlí, resp. břidlici (procesem adsorpce) a zůstane zde trvale uložen. Tento typ uložení je však prozatím ve fázi výzkumu. [31]

Tab. 2 Odhadovaná kapacita geologických úložišť CO₂ [16]

Typ uložení CO ₂	Svět [gt CO ₂]	Evropa [gt CO ₂]
Struktury se slanou vodou	1000 – 10 000	30 – 500
Vytěžená ložiska ropy a zemního plynu	600 – 1200	10 – 15
Netěžitelné uhelné a břidlicové sloje	3 – 200	?

3.3.2 Uložení CO₂ do oceánů

Oceány tvoří více než 70 % zemského povrchu a jejich průměrná hloubka je 3800 metrů. Mezi povrchem oceánu a atmosférou přirozeně dochází k výměně oxidu uhličitého, a to do té doby, než je dosaženo rovnováhy. Tento proces tvoří součást globálního uhlíkového cyklu⁵.

Se zvyšující se koncentrací oxidu uhličitého v atmosféře roste i množství oceány absorbovaného plynu. Tímto způsobem oceány absorbovaly za posledních 200 let asi 500 gigatun oxidu uhličitého z celkových 1300 gigatun vyprodukovaných lidskou činností. Zvýšené emise za poslední desítky let však způsobují pokles pH na povrchu oceánů (důvodem je kyselá povaha oxidu uhličitého), ve větších hloubkách však zatím nejsou pozorovány žádné změny. [15]

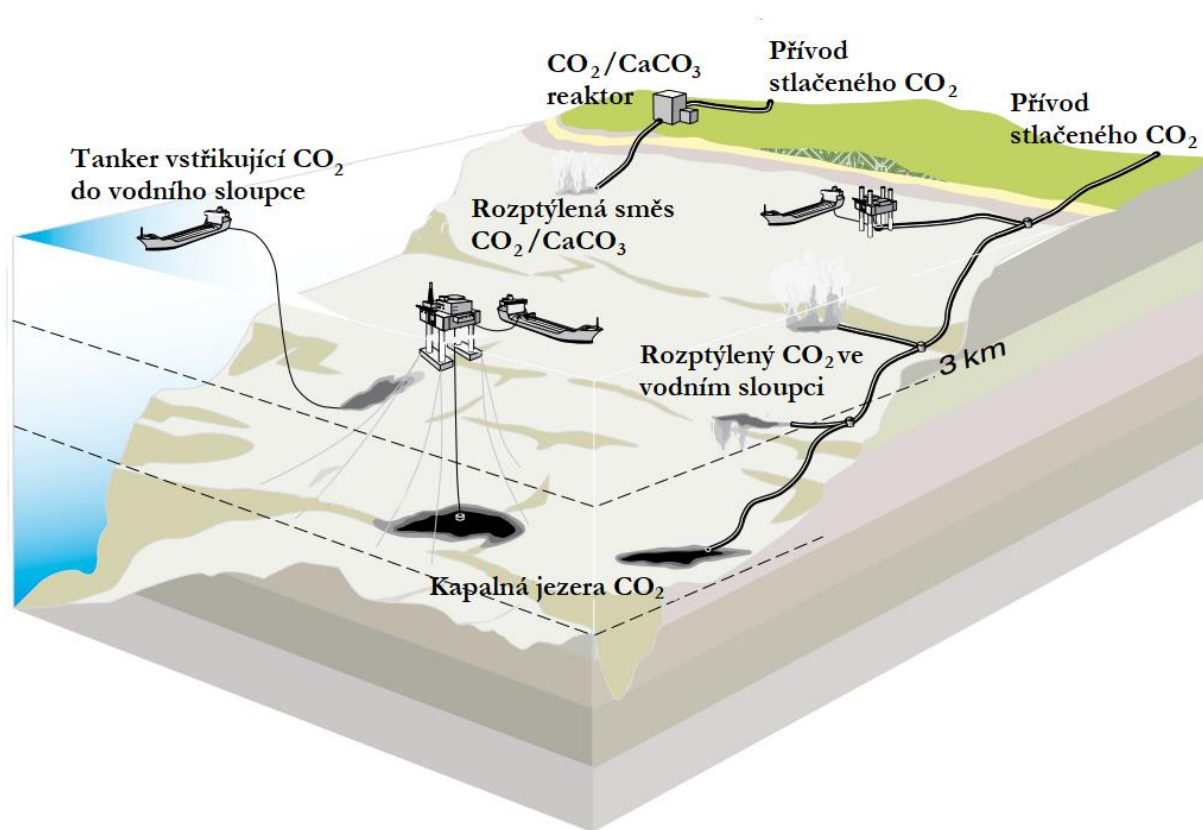
Tento fakt vede vědce k úvahám o potenciálním uložení oxidu uhličitého do hlubokých oceánů (hloubky větší než 1000 metrů). Hlavním omezujícím faktorem je maximální přípustná změna pH. Analýzy a modely naznačují, že s rostoucí hloubkou roste i doba zdržení oxidu uhličitého (viz Tab. 3). [15]

Tab. 3 Podíl složky CO₂ uložené v oceánu (vzhledem k celku) pro 100 let nepřetržitého vstřikování (počínaje rokem 2000) ve třech různých hloubkách (založeno na datech ze sedmi modelových studií) [15]

Rok	Hloubka 800 m	Hloubka 1500 m	Hloubka 3000 m
2100	0,78 ± 0,06	0,91 ± 0,05	0,99 ± 0,01
2200	0,50 ± 0,06	0,74 ± 0,07	0,94 ± 0,06
2300	0,36 ± 0,06	0,60 ± 0,08	0,87 ± 0,10
2400	0,28 ± 0,07	0,49 ± 0,09	0,79 ± 0,12
2500	0,23 ± 0,07	0,42 ± 0,09	0,71 ± 0,14

Oxid uhličitý lze do oceánů dopravit prostřednictvím potrubních systémů nebo tankerů vstřikujících oxid uhličitý do vodního sloupce nebo na mořské dno. Ke zvýšení doby zdržení je navíc možné využít různých principů a metod uložení: vytvoření „kapalných CO₂ jezer“ na oceánském dně, nebo rozpouštění zásaditých minerálů (např. vápence) vedoucího k neutralizaci kyselosti oxidu uhličitého (Obr. 13). [15]

⁵ Globální uhlíkový cyklus (koloběh uhlíku) je biochemický cyklus, při němž se uhlík vyměňuje mezi biosférou, litosférou, hydrosférou a atmosférou.

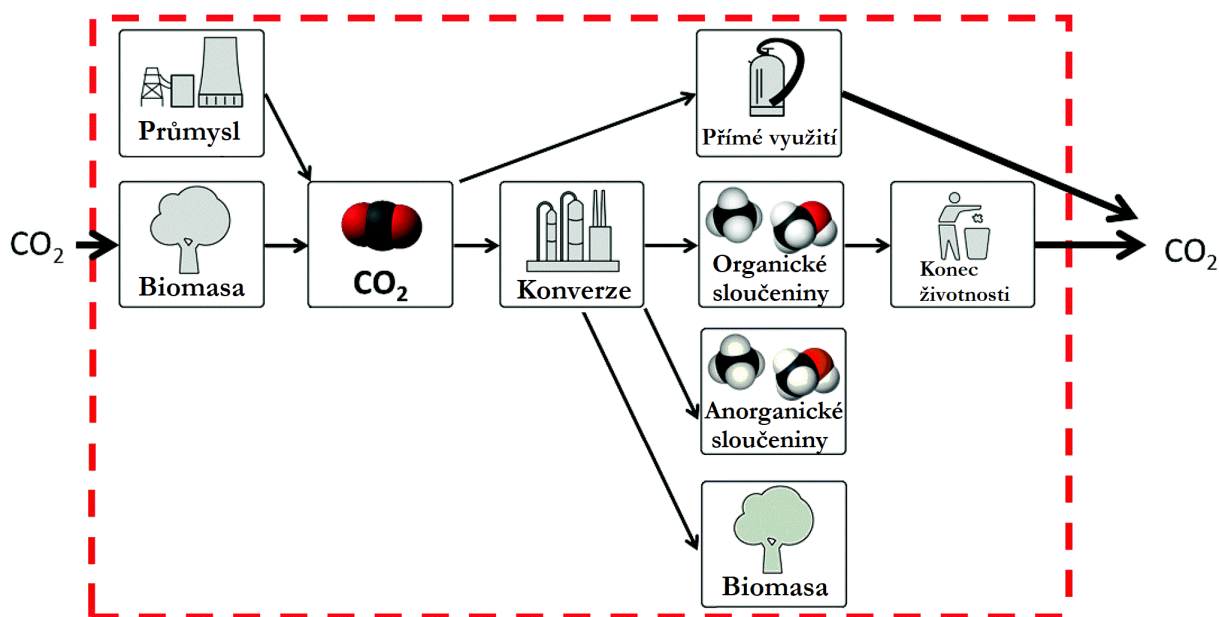


Obr. 13 Způsoby uložení oxidu uhličitého do oceánu [15]

Uložení oxidu uhličitého do oceánů je ve fázi výzkumu. Přesto, že k tématu vznikají teoretické, laboratorní a modelové studie již cca 25 let, experimentů bylo provedeno pouze několik. Tyto experimenty ukazují, že uložení může poškodit mořské organismy i malou změnou pH vodního prostředí. Také je zřejmé, že dojde k okamžitému usmrcení organismů v místě uložení oxidu uhličitého např. při použití metody vytvoření „kapalných jezer“ na oceánském dně. Kvůli negativním dopadům na oceánskou faunu a floru komise *Konvence pro ochranu mořského životního prostředí v severovýchodním Atlantiku* (OSPAR) v roce 2007 zakázala uložení oxidu uhličitého do oceánu [33].

3.4 Technologie CCU

Technologie CCU („carbon capture and utilisation“) lze definovat jako takové technologie, které používají oxid uhličitý jako výchozí surovinu a přeměňují ho na produkty s přidanou hodnotou (biopaliva, chemikálie, stavební materiály atp.). Schematické znázornění takových procesů můžeme vidět níže (Obr. 14). Vyvíjené technologie CCU mají za cíl zlepšit nebo nahradit tradiční procesy a omezit tím změnu klimatu a množství produkovaného skleníkového plynu. Využití zachyceného oxidu uhličitého by také mohlo vést k ekonomickým úsporám v souvislosti s nakládáním s tímto plynem. Oxid uhličitý lze využít přímo, nebo ho zpracovat prostřednictvím chemických či biologických procesů.



Obr. 14 Životní cyklus oxidu uhličitého při využití technologie CCU [34]

3.4.1 Přímé využití

Oxid uhličitý se přímo využívá v několika průmyslových odvětvích. Mezi ně patří například potravinářský průmysl, kde se běžně používá k sycení nápojů, jako konzervační látka, balicí plyn, jako rozpouštědlo pro extrakci aromat atp. Dalším odvětvím, ve kterém oxid uhličitý nalézá uplatnění, je zdravotnictví, resp. farmaceutický průmysl. Zde může být použit jako respirační stimulant. Zmíněné aplikace jsou velmi závislé kvalitě přiváděného oxidu uhličitého. Vyžadují jeho vysokou čistotu, čímž kladou velké nároky na zdroje plynu. [35]

3.4.2 Chemická konverze CO₂

Chemickým zpracováním oxidu uhličitého můžeme získat nepřeberné množství látek nacházející uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích – od chemického a petrochemického průmyslu, přes potravinářský či farmaceutický průmysl, až po stavebnictví.

Konkrétně ho lze využít pro výrobu pevných anorganických sloučenin (např. uhličitánů a akrylátů), nebo pro redukční reakce, kdy vznikají organické sloučeniny jako metan, methanol, močovina nebo kyselina mravenčí [35]. Oxid uhličitý dále nalézá využití jakožto výchozí surovina pro výrobu paliv při Fischer-Tropschově syntéze [19].

I přes to, že lze oxid uhličitý využít v chemickém a petrochemickém průmyslu, jeho přeměna je kvůli jeho termodynamické stabilitě energeticky velmi náročná. Mezi další nevýhody patří nízká životnost některých produktů (např. paliv), oxid uhličitý se totiž po krátké době (přibližně méně než šest měsíců) začne uvolňovat, čímž celá technologie CCU v tomto průmyslovém odvětví ztrácí na významu. [19]

3.4.3 Biologická konverze CO₂

Přímá fotosyntetická fixace oxidu uhličitého v rychle rostoucí biomase patří mezi hlavní charakteristiky tohoto typu konverze. Produkovaná biomasa nachází uplatnění hned v několika průmyslových odvětvích. V závislosti na kvalitě a čistotě může být využita pro produkci biopaliv, v potravinářském průmyslu nebo krmivářství nebo dokonce v kosmetickém průmyslu. Mikrořasy v tomto směru představují biomasu s největším potenciálem. Proto bude této CCU technologii věnovaná samostatná kapitola (kapitola 4). [36]

3.5 Shrnutí a diskuze

Pro snížení nadměrné produkce oxidu uhličitého se v současné době nabízejí dvě metody řešení problému – technologie CCS („Carbon capture and storage“) a CCU („Carbon capture and utilisation“). V obou případech nejprve dochází k zachycení skleníkového plynu a poté k dopravě k technologickému celku, který oxid uhličitý buď bezpečně uloží (technologie CCS) nebo zpracuje a využije pro další procesy (technologie CCU).

Samotné zachycení plynu může probíhat několika způsoby. Ve většině aktuálně vybudovaných zařízení produkujících oxid uhličitý není jiná možnost, než zachytit skleníkový plyn po procesu konverze/spalování. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu je zpracování velkého množství plynu (spalin). Další způsoby zachycení vyžadují výrazné změny uspořádání technologie. Patří mezi ně zachycení před procesem spalování a zachycení při spalování v kyslíkové atmosféře. Absorpce aminovým rozpouštědlem je nejpoužívanějším mechanismem zachytu oxidu uhličitého, do budoucna se však ukazuje jako perspektivní kombinovat tento mechanismus s membránovými technologiemi.

Většina zachyceného skleníkového plynu se v současné době po zkapalnění pumpuje hluboko pod zemský povrch do částečně vytěžených ložisek ropy a zemního plynu, a to kvůli intenzifikaci procesu těžby. Další možností je uložení do geologických struktur se slanou vodou.

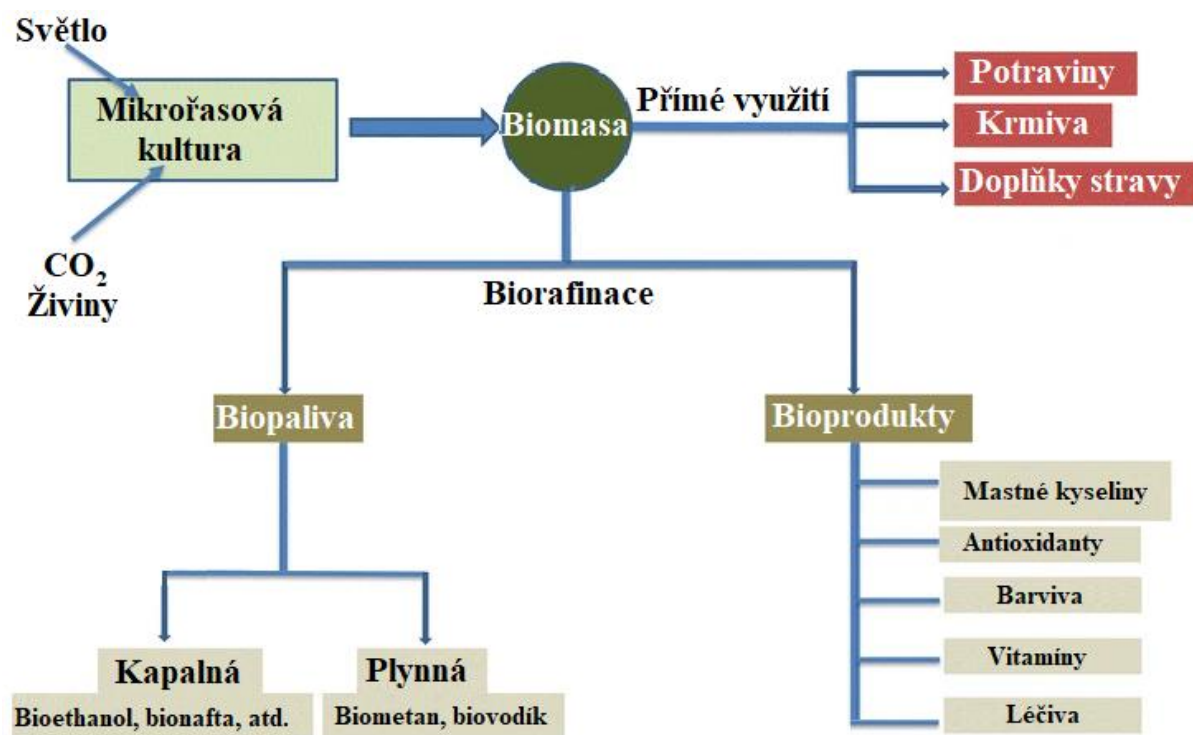
Technologie CCU v současnosti tvoří minoritní část celkového zpracovaného objemu oxidu uhličitého, lze je tedy uvést spíše jako doplněk technologií CCS. Pro vypořádání se s problémem vysoké atmosférické koncentrace tohoto skleníkového plynu se však do budoucna ukazují jako klíčové.

4 POTENCIÁL MIKROŘASOVÝCH BIOREAKTORŮ

Vzhledem ke zvyšujícím se koncentracím oxidu uhličitého v atmosféře a s tím spojenou změnou klimatu, je potřeba nacházet a rozvíjet nové technologie pro zachyt a využití oxidu uhličitého, tj. technologie CCU. Jednou z možností je biologická fixace, konkrétně zachyt oxidu uhličitého pomocí mikrořas v bioreaktorech.

4.1 Možnosti využití mikrořasové biomasy

Mikrořasy v posledních letech celosvětově přitahují značný zájem kvůli jejich rozsáhlému aplikačnímu potenciálu. Nacházejí využití ve farmaceutickém, kosmetickém, potravinářském a nutraceutickém průmyslu, v zemědělství, krmivářství a v oblasti obnovitelných energií. Mikrořasová biomasa může sloužit jako výchozí surovina pro výrobu biopaliv, bioaktivních léčivých přípravků, doplňků stravy, potravin atp. (viz Obr. 15). [37]



Obr. 15 Možnosti využití mikrořasové biomasy [37]

Kromě obrovské škály aplikací nabízí kultivace mikrořas několik dalších výhod. Pro růst buněk mikrořas lze využít odpadní proudy některých průmyslových odvětví. Např. emise oxidu uhličitého mohou být využity jako zdroj uhlíku, odpadní vody se mohou stát zdrojem živin (hlavně fosforu a dusíku). V obou případech růst mikrořas působí pozitivně na odpadní proud – snižuje koncentrace některých nežádoucích látek (oxidu uhličitého, dusíku, fosforu).

Záchyt a využití CO₂ mikrořasami

Přibližně 50% suché biomasy řas a rostlin tvoří uhlík, základní stavební kámen všech organismů, přičemž téměř všechn byl zachycen z atmosférického oxidu uhličitého fotosyntézou [38]. Prostřednictvím tohoto procesu mikrořasy přeměňují světelnou energii na energii chemických vazeb, anorganické sloučeniny na organickou hmotu.

Proces fotosyntézy probíhá ve dvou fázích – primární a sekundární. Primární, tedy světelná fáze fotosyntézy, zahrnuje všechny reakce potřebné k přeměně světelné energie na energii chemických vazeb ATP⁶ a ke vzniku NADPH⁷. V této fázi také dochází k uvolňování kyslíku. Při sekundární fázi, také nazývané „temnostní fáze fotosyntézy“, spotřebovávají buňky mikrořas vytvořené ATP a NADPH k přeměně anorganického uhlíku na sacharidy prostřednictvím Calvin-Bensonova cyklu. Zdrojem anorganického uhlíku je v tomto případě atmosférický oxid uhličitý (nebo např. odpadní oxid uhličitý v odpadním proudu spalin). [39]

4.2 Faktory ovlivňující růst mikrořas

Pro dosažení maximálního růstu mikrořas musí být zajištěny optimální podmínky kultivace. Ty jsou dány především charakterem procesu – fotosyntézou mikrořasových buněk. Faktory ovlivňující růst mikrořas lze rozdělit do dvou skupin, a to na fyzikální a nutriční (chemické). Nutričními faktory je myšlen dostatečný přísun živin (uhlíku, dusíku, fosforu atd.). Do druhé skupiny, tedy fyzikálních faktorů, lze zařadit pH, teplotu, světlo atd. Každé odchýlení od optimálních hodnot vede ke zpomalení růstu a snížení produktivity kultivačního systému. [40]

4.2.1 Nutriční (chemické) faktory

Jedním z hlavních nutričních faktorů ovlivňujících růst mikrořas je právě oxid uhličitý. V atmosféře se vyskytuje v nízkých koncentracích (0,04 %). Zvýšená koncentrace oxidu uhličitého v přiváděném plynu podporuje rychlost růstu buněk mikrořas. Studie uvádějí, že optimální koncentrace oxidu uhličitého v přiváděném plynu, kdy dochází k nejvyšší míře biofixace, se u většiny druhů mikrořas pohybuje mezi 2 % až 5 % [41].

Dusík a další potřebné sloučeniny se k buňkám při umělé kultivaci mikrořas dostávají prostřednictvím kultivačního média, což je speciálně připravený vodný roztok. Např. při kultivaci v laboratorních podmínkách se obvykle využívá média BG-11, jehož složení můžeme vidět níže (Tab. 4) [42]. Dusík se zde nachází ve formě sloučeniny, konkrétně se jedná o dusičnan sodný (NaNO₃).

⁶ ATP neboli adenosintrifosfát

⁷ NADPH neboli nikotinamidadenindinukleotid

Alternativně lze pro výživu buněk mikrořas využít dusičnan draselný (KNO_3) nebo močovinu ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) [43]. Ať už je zdrojem kterákoliv z vyjmenovaných sloučenin, studie ukazují, že optimální koncentrace látky v kultivačním médiu se obvykle pohybuje kolem $1,5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (čemuž odpovídá i složení BG-11) [43].

Tab. 4 Složení kultivačního média BG-11 [42]

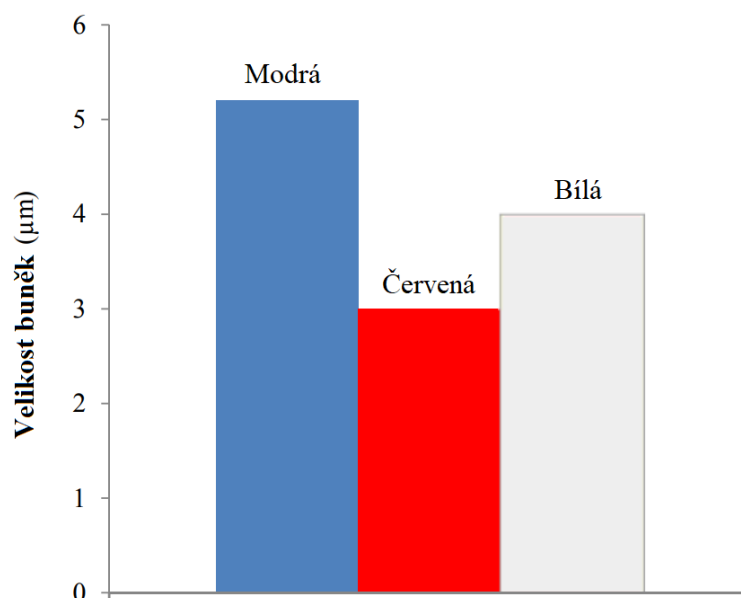
Chemická sloučenina	Koncentrace [$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$]
NaNO_3	1,5
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,036
Citrát železito-amonný	0,012
$\text{EDTA} \cdot \text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,001
K_2HPO_4	0,04
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,075
Na_2CO_3	0,02
Další sloučeniny ve stopovém množství	1 [$\text{ml} \cdot \text{L}^{-1}$]

Pozn. Seznam sloučenin obsažených v BG-11 ve stopovém množství: $\text{H}_3\text{BO}_3 = 2,86 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 1,81 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 0,222 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0,39 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 0,079 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 0,049 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

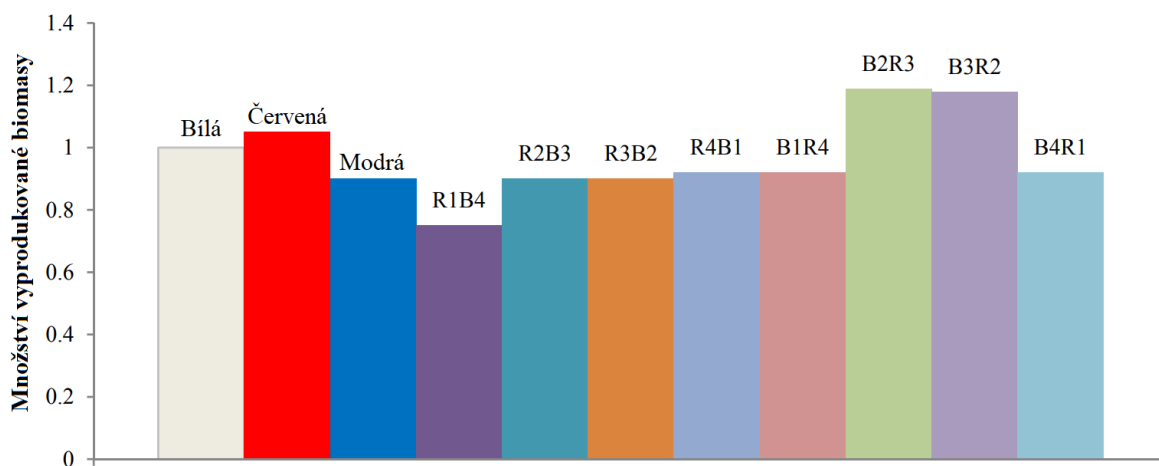
4.2.2 Světlo

Světlo je hnací silou fotosyntézy, přičemž patří mezi hlavní faktory určující rychlost fotosyntetické reakce a produktivity kultivačního systému. Buňky mikrořas ho využívají jako zdroj energie pro přeměnu anorganických sloučenin na organickou hmotu. Z tohoto důvodu můžeme světlo zařadit mezi nejdůležitější faktory ovlivňující růst mikrořas. Jeho vlastnosti můžeme popsat hned několika parametry. Mezi ty hlavní patří vlnová délka, intenzita záření a doba osvětlení (cyklus světlo-tma).

Buňky mikrořas využívají z celého světelného spektra pouze část záření, tzv. fotosynteticky aktivní záření. Vlnové délky tohoto spektra se pohybují mezi 400 a 700 nm, přičemž každý druh reaguje na různou vlnovou délku jinak. Např. mikrořasy druhu *Chlorella vulgaris* vykazují největší nárůst biomasy při červeném osvětlení ($\lambda = 630 - 650 \text{ nm}$), zatímco při osvětlení modrým světlem ($\lambda = 430 - 465 \text{ nm}$) nejmenší. V případě závislosti velikosti buněk na vlnové délce je to přesně naopak (Obr. 16). Tyto poznatky lze aplikovat při optimalizaci růstu (Obr. 17). [40], [44]



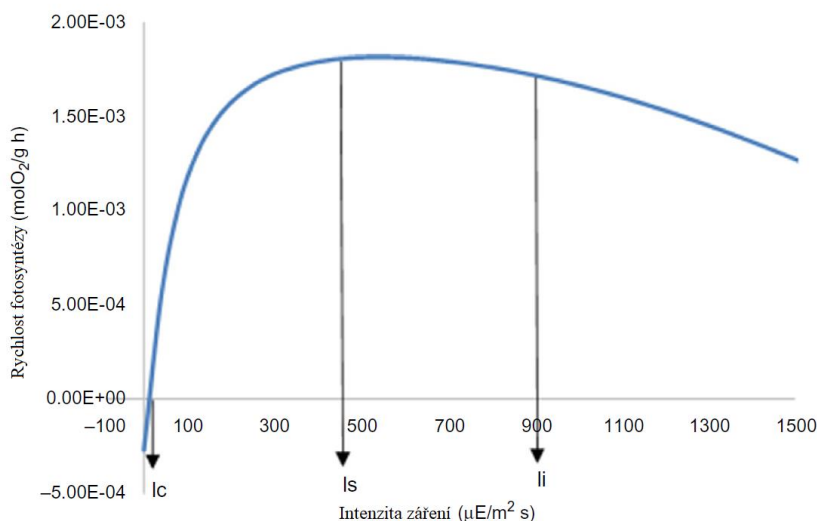
Obr. 16 Závislost vlnové délky osvětlení na velikost buněk mikrořas druhu *Chlorella vulgaris* [40]



Obr. 17 Vyprodukované množství biomasy *Chlorella vulgaris* při různých režimech osvětlení [44]

Pozn. Nejlepší výsledky vykazuje režim B2R3, tj. dva dny modrého osvětlení a poté 3 dny osvětlení červeného. Principem toho jevy je vytvoření velkých buněk při modrém osvětlení, které mají velký potenciál pro sekundární dělení pod červeným osvětlením. [44]

Co se týče vlivu intenzity záření na fotosyntézu, resp. na růst buněk mikrořas, většina druhů vykazuje typické chování, které je znázorněno níže (viz Obr. 18). Pro fotosyntézu je zapotřebí určitá minimální hodnota intenzity záření. Tento mezní stav, při kterém ještě dochází k nárůstu mikrořasové biomasy, je v Obr. 18 označen jako světelný kompenzační bod („light compensation value“ – I_c). Se zvyšující se intenzitou záření se rychlost fotosyntézy zvyšuje až do bodu, kdy je dosaženo maxima při saturační úrovni světla („light saturation value“ – I_s). Zvyšováním intenzity záření nad tuto hodnotu dochází k tzv. fotoinhibici, tj. snižování rychlosti růstu mikrořas („light inhibition“ – I_i). [45], [46]



Obr. 18 Závislost rychlosti fotosyntézy buněk mikrořas na intenzitě záření [46]

Pozn. Jednotka E (einstein) nemá standardní definici a není součástí soustavy SI. Pro převod do soustavy SI se používá jednoduchý převod: $1 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [47].

Pozn. Jednotka „lux“ je krajně nevhodná pro popis intenzity záření v případě aplikace pro růst fotosyntetizujících organismů (více viz „photosynthetically active radiation PAR“), v závislosti na vlnové délce světla kolísá [48].

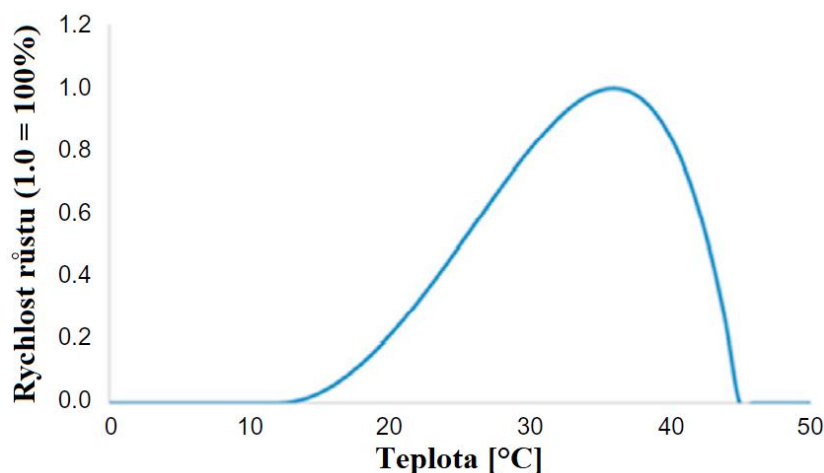
Každý druh mikrořas vyžaduje jinou intenzitu záření, ovšem většina z nich vykazuje stejné chování (které je popsáno výše). Obecně se tedy dá určit poloha jednotlivých bodů. Hodnota kompenzačního bodu se pohybuje v rozmezí $10\text{--}20 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, saturační úroveň světla v rozmezí $200\text{--}400 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a k fotoinhibici dochází při překročení hodnoty $900\text{--}1000 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [49], [50].

V otázce doby osvětlení se výzkumy neshodují. Některé např. doporučují nekontinuální strategii osvětlení (poměr světlo:tma 12:12, 16:8), protože tempo růstu zůstává vysoké, přičemž se snižují náklady na osvětlení [51]. Hlavním problémem zodpovězení této otázky je závislost veličiny na ostatních parametrech – druhu mikrořas, intenzitě osvětlení, vlnové délce osvětlení, účelu kultivace, typu bioreaktoru, složení kultivačního média atp.

Nalezení optimálního režimu osvětlení lze zařadit mezi komplexní problémy, které se v jednotlivých případech budou lišit.

4.2.3 Teplota

Dalším faktorem, který značně ovlivňuje fotosyntézu mikrořasových buněk, je teplota kultivačního média. Vliv teploty lze bezpochyby zařadit mezi hlavní faktory ovlivňující růst mikrořas. Každému druhu mikrořas vyhovuje jiná teplota, obecně však platí, že vychýlení o 10°C znamená zpomalení růstu o 50 % [46]. U citlivějších druhů může mít změna teploty ještě negativnější účinky. Kromě zpomalení růstu může zvýšení teploty nad tu optimální dokonce vést k usmrcení buněk mikrořas přehřátím (obvykle při překročení optimální hodnoty o 10°C) [46]. Znázornění vlivu teploty na rychlost růstu buněk můžeme vidět níže (viz Obr. 19).



Obr. 19 Závislost rychlosti růstu „teplomilného“ druhu mikrořasy na teplotě [46]

Pro zjednodušení můžeme rozdělit mikrořasy na „teplomilné“ a „studenomilné“. Optimální teplota kultivace se u „teplomilných“ druhů mikrořas pohybuje mezi 30 až 35 °C [50]. U „studenomilných“ druhů byla zjištěna optimální teplota kultivace v rozmezí 18 až 20 °C a maximální teplota, při níž může dojít k usmrcení buněk, se nachází mezi 25 až 30 °C [52]. Opět je však důležité zmínit, že každému druhu mikrořasy vyhovuje jiná teplota a každý druh jinak reaguje na její vychýlení od optimálních hodnot.

4.2.4 Hodnota pH/koncentrace CO₂

Hodnota pH patří mezi další relevantní faktor ovlivňující růst mikrořas. Kromě toho, že ovlivňuje fyziologický stav buněk, určuje také množství dostupného oxidu uhličitého pro buňky mikrořas [46]. Rozpouštění oxidu uhličitého ve vodě se řídí sérií chemických rovnic uvedených níže.

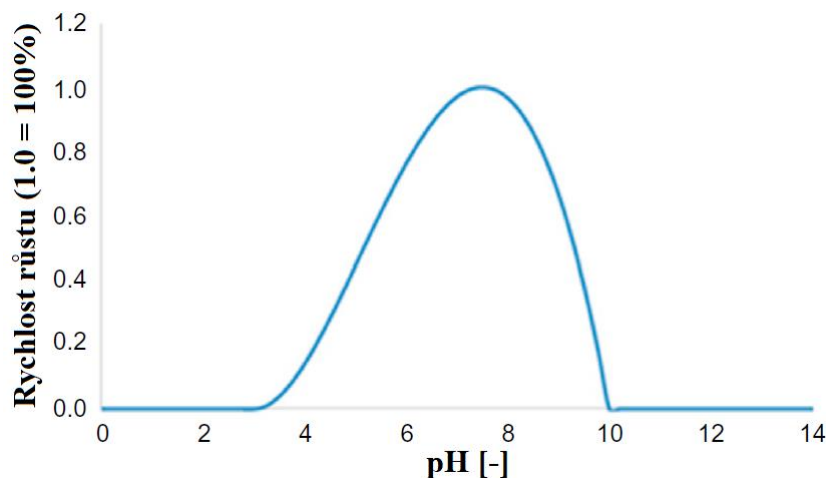


Pozn. Písmeno „g“ (gas) znamená, že se oxidu uhličitého nachází v plynné fázi (ve vzduchu). Písmena „aq“ (aqua) označují stav, kdy se oxid uhličitého nachází rozpouštěný ve vodě (v kultivačním médiu).

Pozn. Hodnota pH je definována jako záporně vzatý dekadický logaritmus aktivity oxoniových kationtů (H₃O⁺).

Z rovnic (3-6) vyplývá přímá vazba mezi hodnotou pH a množstvím rozpouštěného oxidu uhličitého v kultivačním médiu. V praxi se této vazby využívá pro regulaci hodnoty pH, a to vstřikováním oxidu uhličitého do kultivačního média ve formě plynu [46].

Co se týče citlivosti mikrořas na hodnotu pH, některé druhy se dokáží přizpůsobit extrémně kyselým ($\text{pH} < 3$) nebo zásaditým ($\text{pH} > 10$) hodnotám pH, optimum se však u většiny druhů nachází v rozsahu 7 až 8 (Obr. 20) [49], [50].

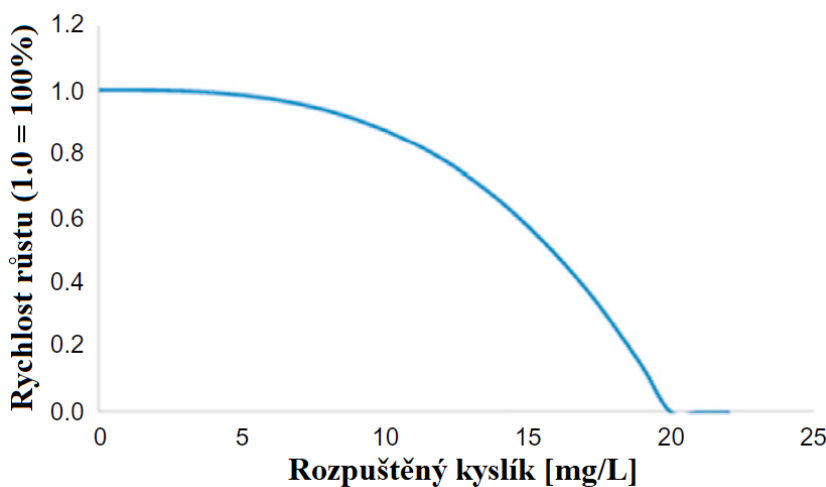


Obr. 20 Závislost rychlosti růstu mikrořas na hodnotě pH [46]

4.2.5 Rozpuštěný kyslík

Posledním z hlavních faktorů ovlivňujících růst mikrořas je množství kyslíku rozpuštěného v kultivačním médiu. Za standartních podmínek je dosaženo rovnovážného stavu mezi vzduchem a kultivačním médiem a v závislosti na teplotě se množství rozpuštěného kyslíku pohybuje okolo hodnoty $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [46].

Při fotosyntéze buněk mikrořas však kyslík vzniká jako odpadní produkt, čímž dochází k narušení rovnovážného stavu a jeho akumulaci v kultivačním médiu. Přebytek rozpuštěného kyslíku snižuje účinnost fotosyntézy. Při koncentraci $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, tj. 150% saturované hodnoty (koncentraci kyslíku při rovnovážném stavu), dochází k významnému snížení rychlosti fotosyntézy, při koncentraci $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, tj. 250% saturované hodnoty, dokonce fotosyntéza téměř neprobíhá (viz Obr. 21) [49], [50].



Obr. 21 Závislost rychlosti růstu mikrořas na koncentraci rozpuštěného kyslíku [46]

4.3 Typy bioreaktorů pro kultivaci mikrořas v průmyslovém měřítku

Bez ohledu na aplikaci mikrořasové biomasy je jádrem procesu kultivace bioreaktor. Ten musí být navržen tak, aby udržoval odpovídající kultivační podmínky daného druhu mikrořas, v závislosti na aplikaci dosahoval požadovaného množství a kvality mikrořasové biomasy. Na základě těchto parametrů lze vybrat vhodný typ bioreaktoru.

Typy bioreaktorů pro kultivaci mikrořas lze rozdělit do dvou základních skupin – otevřené a uzavřené. Otevřené kultivační systémy jsou obvykle méně efektivní, produkují mikrořasovou biomasu o nižší kvalitě (vysoká pravděpodobnost kontaminace např. jinými organismy či jinými druhy mikrořas), na druhou stranu investiční náklady se oproti uzavřeným systémům pohybují v řádově nižších částkách. Uzavřené systémy dosahují vyšší efektivity produkce, je řízeno více kultivačních parametrů (světlo, teplota atp.), takže lze dosáhnout kultivačních podmínek blízkých se těm optimálním. Zároveň díky minimálnímu riziku kontaminace lze produkovat biomasu o vysoké kvalitě.

Z otevřených bioreaktorů, které lze využít v průmyslovém měřítku, stojí za zmínku traťový systém kultivace a plošinový bioreaktor, z těch uzavřených je představitelem s největším potenciálem trubicový bioreaktor.

4.3.1 Traťový systém kultivace

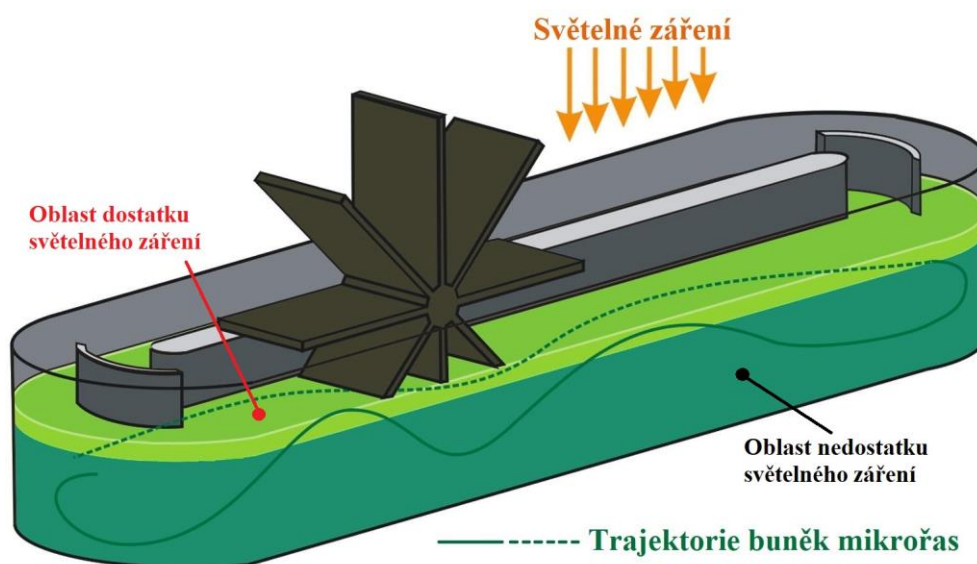
Traťový systém („raceway bioreactor“) je v současné době nejhojněji využívanou technologií kultivace mikrořas. Více než 90 % celosvětové produkce mikrořasové biomasy pochází právě z tohoto typu bioreaktoru [46]. Důvodem jsou nízké investiční náklady – ty se pohybují mezi 0,13 až 0,37 M€/ha v měřítku 100 ha projektu [53]. Mezi největší producenty patří USA, Čína, Thajsko, Chile nebo Izrael.

Tento typ bioreaktoru se obvykle sestává ze dvou rovnoběžných kanálů zakončených 180° zaoblením, které zajišťuje možnost cirkulace kultivačního média (viz Obr. 22). Rotací lopatkového kola je dosaženo neustálého proudění a promíchávání média. Jako podklad pro bioreaktor může sloužit zhuštěná zemina, beton, nebo vrstva polymerního materiálu. Hloubka kanálů se obvykle volí v rozmezí 0,2 až 0,4 metru, ve výjimečných případech (např. pro čištění odpadní vody) je volena hloubka větší, a to kvůli větší kapacitě bioreaktoru [46].

Při použití traťového systému kultivace můžeme dosáhnout koncentrace biomasy přibližně $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, obvykle se však pohybujeme pod touto hodnotou [46]. Příčinou je relativně velká hloubka a s ní spojená neoptimální dostupnost světla pro buňky mikrořas v průběhu jejich růstu (viz Obr. 23). Důsledkem nízké koncentrace je kromě vyšších nákladů na sklizeň mikrořasové biomasy také vyšší riziko kontaminace jinými organismy, což negativně ovlivňuje produktivitu systému. Ta se obvykle pohybuje v závislosti na druhu mikrořasy v rozmezí hodnot 9 až 21 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$ [54], [55].



Obr. 22 Letecký pohled na mikrořasový výrobní závod Qualitas Health v Novém Mexiku v USA [56]



Obr. 23 Světelné podmínky při kultivaci mikrořas v traťovém systému [57]

4.3.2 Plošinový (kaskádový) bioreaktor

Kaskádový bioreaktor („thin-layer bioreactor“) byl vyvinut na půdě Mikrobiologického ústavu Akademie věd České republiky v Třeboni [58]. Jeho konstrukci tvoří dvě hlavní části – osvětlená část, kde probíhá fotosyntéza mikrořas, a sběrná nádrž s čerpadlem, zajišťující cirkulaci kultivačního média. Osvětlená část se sestává z plošin (kaskád), které jsou mírně nakloněny (0,1 % až 1,0 %) pro usnadnění toku média (Obr. 24). Výška vodního sloupce na těchto plošinách se obvykle pohybuje pod hranicí 1 cm, čímž je zajištěna maximální dostupnost světla pro buňky mikrořas. [46]



Obr. 24 Plošinový (kaskádový) bioreaktor [59]

Mezi hlavní výhody tohoto typu bioreaktoru patří vysoká produktivita, která díky minimální hloubce a vysoké dostupnosti světla dosahuje hodnot až $55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$. Dále lze v plošinovém bioreaktoru dosahovat vysokých koncentrací mikrořasové biomasy, a to v rozmezí hodnot 40 až $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. [60]

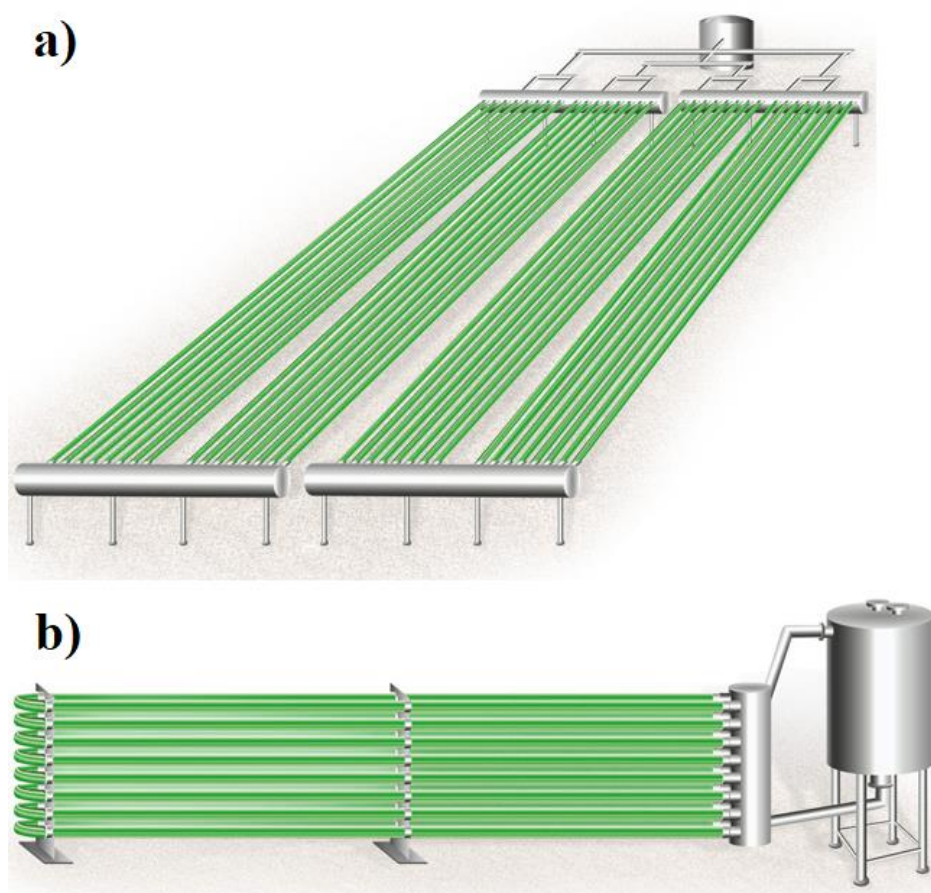
I přes velký potenciál tohoto typu bioreaktoru platí, že jeho konstrukce zatím nebyla optimalizována. Mezi hlavní problémy, které je nutno před uvedením do průmyslového měřítka vyřešit, patří omezené možnosti regulace pH a teploty, nebo nízká účinnost přenosu oxidu uhličitého do kultivačního média. [61]

4.3.3 Trubicový bioreaktor

Trubicový bioreaktor („tubular bioreactor“) je v současné době doporučovaným typem bioreaktoru pro produkci mikrořasové biomasy o vysoké kvalitě (např. pro farmaceutický, kosmetický nebo potravinářský průmysl) [62]. Investiční náklady se v měřítku 100 ha projektu dají vyčíslit na hodnotu přibližně 0,51 M€/ha, což je více než dvojnásobná částka v porovnání s traťovým systémem kultivace [53]. Projekty na výstavbu trubicových bioreaktorů v průmyslovém měřítku se objevily teprve nedávno, dokončené realizace můžeme najít např. v Německu, Francii, Portugalsku nebo v USA.

Průmyslové trubicové bioreaktory se sestávají ze dvou částí – skleněných trubic o malém průměru (max 10 cm), zajišťujících dostatečný přísun světla pro fotosyntézu, a sběrné nádrže, kde dochází k probublávání kultivačního média a přenosu plynů (přívod oxidu uhličitého a odvod kyslíku vznikajícího při fotosyntéze). Cirkulaci kultivačního média zajišťuje odstředivé čerpadlo. [46]

Skleněné trubice mohou být uspořádány vertikálně, mnohem častější konfigurací je však horizontální uspořádání. Horizontálně orientované trubice mohou být uspořádány v jedné („unilayer“) nebo ve více vrstvách („multilayer“) viz Obr. 25. Volba uspořádání závisí na mnoha faktorech, obecně se však dá říct, že se rozhodujeme mezi lepším poměrem objemu bioreaktoru na jednotku plochy (vícevrstvé uspořádání) nebo vyšší produktivitou díky lepší dostupnosti světla (jednovrstvé uspořádání).



Obr. 25 Dělení trubicových bioreaktorů s horizontálním uspořádáním trubic a) Jednovrstvé uspořádání („unilayer horizontal tubular bioreactor“) b) Vícevrstvé uspořádání („multilayer horizontal tubular bioreactor“) [59]

V trubicových bioreaktorech můžeme díky malému průměru skleněných trubic, tj. dobré dostupnosti světla dosáhnout vyšší koncentrace mikrořas než v případě traťového systému kultivace, a to v rozmezí 1,0 až 3,0 $g \cdot L^{-1}$ [46]. Vysoká koncentrace mikrořasové biomasy a uzavřená konstrukce bioreaktoru snižuje riziko kontaminace jinými organismy, což lze považovat za další výhodu tohoto typu bioreaktoru. Toho lze mimo jiné využít pro kultivaci méně odolných (a citlivějších) druhů mikrořas. Produktivita trubicových bioreaktorů se v závislosti na druhu mikrořasy pohybuje v rozmezí 8 až 50 $g \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$ [50], [63].

4.3.4 Deskový bioreaktor

Posledním typem bioreaktoru používaného k produkci mikrořasové biomasy v průmyslovém měřítku je deskový bioreaktor („flat panel bioreactor“). Jeho konstrukce se skládá ze dvou rovnoběžných rámců vzdálených od sebe 0,03 až 0,1 m. Výška konstrukce je obvykle menší než 1,8 m a doporučená délka jednoho bioreaktoru se pohybuje kolem 20 m. Plastová fólie umístěná mezi rámy tvoří uzavřený prostor, který je naplněn kultivačním médiem (Obr. 26). Vzhledem k objemu jednoho bioreaktoru (1 až 3 m³) se průmyslová zařízení produkující mikrořasy skládají z velkého počtu jednotlivých bioreaktorů. V současnosti mají největší zařízení využívající deskové bioreaktory rozlohu přibližně 1 ha. [64]

Mezi výhody patří hlavně nízké riziko kontaminace, snadná regulace kultivačních podmínek, jednoduchá konstrukce a vysoký poměr ozářené plochy na jednotku objemu. Produktivita se v závislosti na druhu mikrořasy pohybuje v rozmezí 5 až 35 g · m⁻² · den⁻¹. [46], [64]

Hlavním problémem tohoto typu bioreaktoru je biologické zanášení plastových fólií. Biomasa se přichytí na stěny bioreaktoru, čímž se sníží dostupnost světla. Čištění je natolik problematické, že se v praxi setkáváme s jednorázovým využitím plastových fólií, tj. jejich častou obměnou. Z tohoto důvodu se takto konstruované deskové bioreaktory využívají pro produkci mikrořasové biomasy v průmyslovém měřítku jen zřídka. [65]



Obr. 26 Deskový bioreaktor [46]

4.3.5 Charakteristické parametry jednotlivých typů mikrořasových bioreaktorů

V současné době existuje pro kultivaci mikrořas v průmyslovém měřítku několik typů bioreaktorů. Každý z nich má své silné a slabé stránky. Před výběrem bioreaktoru pro danou aplikaci je důležité zvážit, který typ se jeví jako nejvhodnější. To lze na základě několika parametrů, resp. jejich kombinace. V tabulce níže můžeme vidět charakteristické parametry jednotlivých bioreaktorů (Tab. 5).

Tab. 5 Srovnání charakteristických parametrů jednotlivých typů mikrořasových bioreaktorů [46], [53]

Parametr	Traťový systém kultivace	Plošinový bioreaktor	Trubicový bioreaktor	Deskový bioreaktor
Investiční náklady [M€/ha]	0,13 – 0,37	-	0,51	-
Produktivita [$g \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$]	9 – 21	až 55	8 – 50	5 – 35
Celkový objem jednoho bioreaktoru	Velký	Malý	Střední	Malý
Dostupnost světla pro mikrořasové buňky	Nízká	Vysoká	Střední	Střední
Koncentrace mikrořas [g/L]	1	40 – 50	1 – 3	-
Kvalita produkované biomasy	Nízká	Střední	Vysoká	Vysoká
Riziko kontaminace	Vysoké	Střední	Nízké	Nízké
Řízení kultivačních podmínek	Obtížné	Středně těžké	Snadné	Snadné
Ztráta vody vypařováním	Vysoká	Vysoká	Nízká	Nízká
Přívod plynu obohaceného o oxid uhličitý	Nelze	Lze, obtížně	Lze, snadno	Lze, snadno

Vzhledem k nízkým investičním nákladům patří traťový systém kultivace v současné době k nejrozšířenějšímu typu bioreaktoru. Z Tab. 5 však vyplývá, že oproti ostatním typům vykazuje mnoho nevýhod.

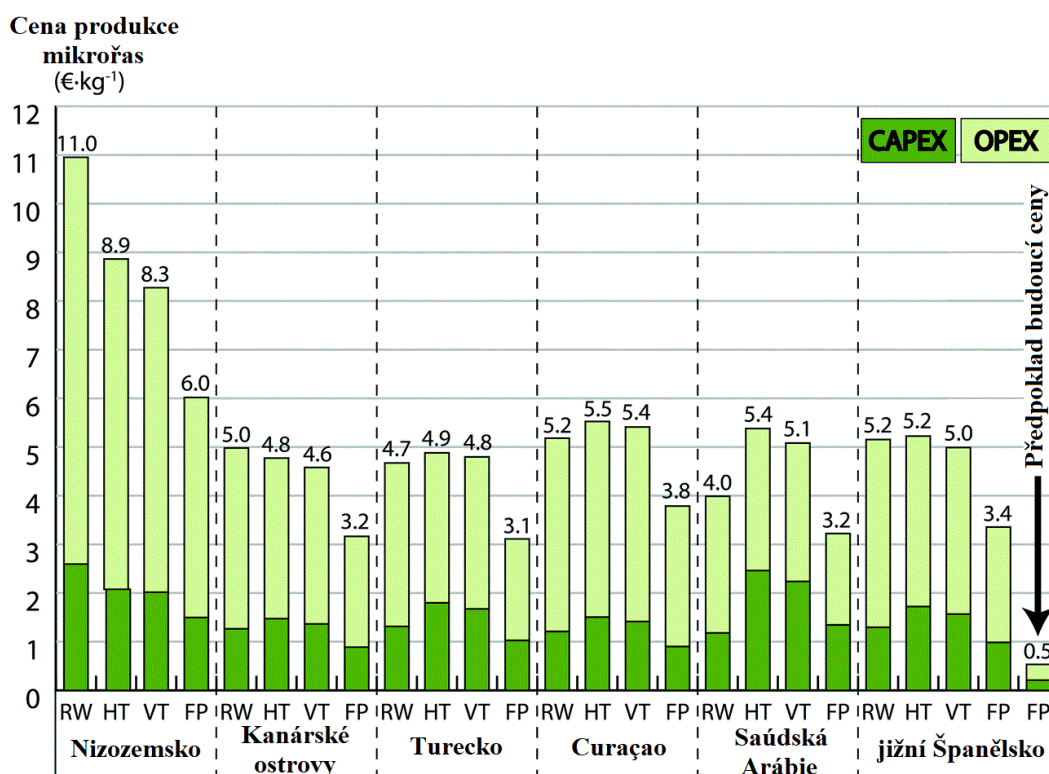
Z tohoto důvodu je čím dál více pozornosti věnováno vývoji ostatních typů bioreaktorů, které jsou sice dražší a náročnější na provoz, zato nabízí mnoho výhod oproti traťovému systému kultivace. Mezi ně patří vyšší produktivita na jednotku plochy, lepší dostupnost světla, vyšší koncentrace mikrořasových buněk v kultivačním médiu (čímž se zefektivňuje sklizeň biomasy), nebo nižší riziko kontaminace a vyšší kvalita produkované mikrořasové biomasy (důležitý parametr pro aplikaci ve farmaceutickém, potravinářském nebo kosmetickém průmyslu).

Dalším důležitým parametrem zejména pro průmyslové provozy, které chtějí snížit produkci emisního oxidu uhličitého, je možnost přívodu plynu obohaceného o oxid uhličitý (resp. spalin) do bioreaktoru. Z tohoto pohledu se jeví uzavřené systémy (trubicový a deskový bioreaktor) jako vhodné. Smysluplný záchyt v otevřeném systému není možný.

4.4 Hodnocení profitability produkce mikrořasové biomasy

Mikrořasová biomasa může být v průmyslovém měřítku produkována hned v několika typech bioreaktorů a po zpracování může být využita v mnoha průmyslových odvětvích (v závislosti na kvalitě). Ať už jsou podmínky a účel kultivace jakékoliv, pro všechny varianty platí, že se zvyšující se produkcí značně klesají výrobní náklady [53], [63], [66], [67].

Při produkci biomasy v množství 3,8 t/rok, resp. 200 t/rok lze dosáhnout výrobních nákladů 69 €/kg, resp. 12,6 €/kg (Acién a kol., 2012) [63]. Náklady dále klesají s rostoucí produkcí, a to až na 11 až 3,1 €/kg v případě kultivace ve 100 ha měřítku [67]. Rozptyl hodnot je dán zeměpisnou polohou výrobního závodu (kvůli příhodnějším teplotám pro kultivaci, množství slunečního záření atp.) a typem bioreaktoru (viz Obr. 27). V průběhu následující dekády se předpokládá pokles ceny produkce až na 0,5 €/kg, a to hlavně díky intenzivnímu výzkumu kultivačního procesu (viz podkapitola 4.5) [67].



Obr. 27 Předpokládané náklady na produkci mikrořasové biomasy (zahrnuje kultivaci i sklizeň) [67]

Legenda:

CAPEX ... „capital cost“ neboli investiční náklady

OPEX „operational costs“ neboli provozní náklady

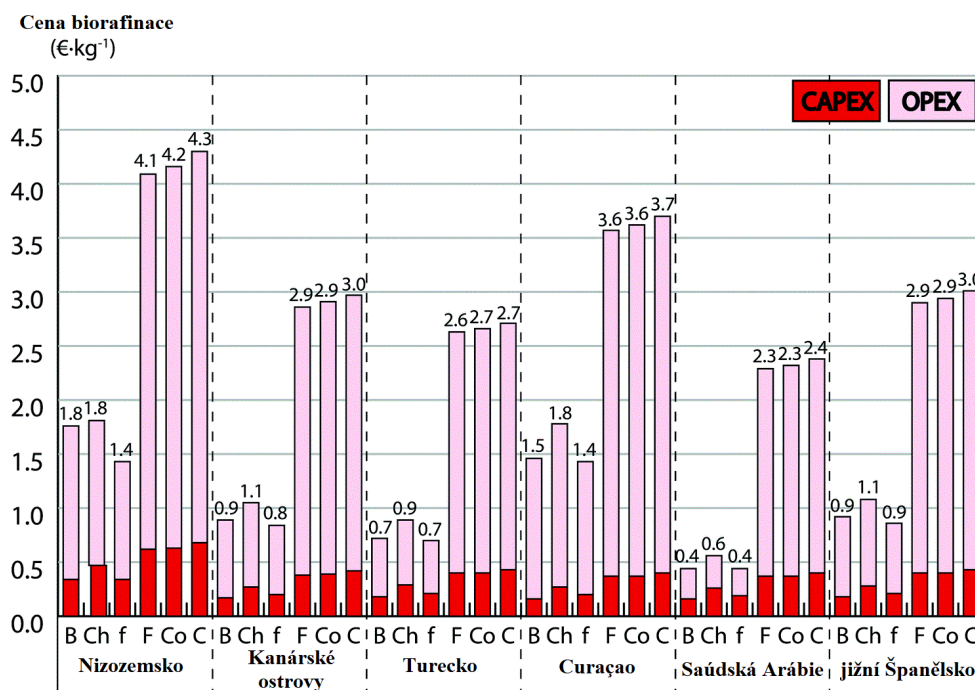
RW „raceway pond“ neboli traťový systém kultivace

HT „horizontal tubular photobioreactor“ neboli jednovrstvý horizontální trubicový bioreaktor

VT „vertically stacked horizontal tubular photobioreactor“ neboli vícevrstvý horizontální trubicový bioreaktor

FP „flat panels photobioreactor“ neboli deskový bioreaktor

Po kultivaci a sklizni může být mikrořasová biomasa přímo využita (viz Obr. 15), nebo přichází krok nazývaný jako biorafinace. Jedná se o zpracování biomasy za účelem zisku cenných látek obsažených v buňkách mikrořas. Po sklizni následuje sušení biomasy nebo extrakce cenných látek, např. lipidů (omega-3 mastné kyseliny), pigmentů atp. [68]. V současné době je tento proces v rané fázi vývoje a většina komerčních zařízení se specializuje na jediný produkt. V závislosti na způsobu zpracování se cena biorafinace pohybuje mezi 0,4 až 4,3 €/kg (viz Obr. 28).



Obr. 28 Předpokládané náklady na biorafinaci mikrořasové biomasy [67]

Legenda:

B Výroba biopaliv

Ch Výroba chemikálií

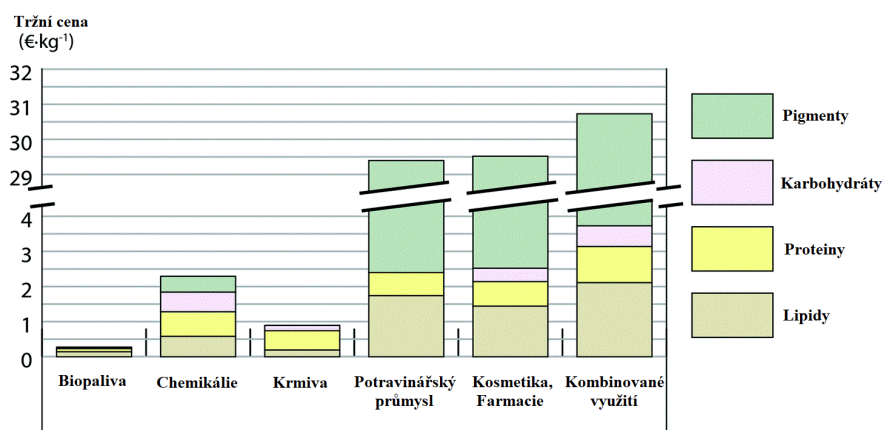
f Výroba krmiv

F Výroba potravinářských aditiv

Co Kosmetika a farmaceutický průmysl

C Kombinované využití biomasy v různých odvětvích průmyslu

Abychom mohli prozkoumat potenciál komercializace produkce mikrořas, musíme znát tržní hodnotu biomasy. Ta se odvíjí od toho, v jakém průmyslovém odvětví nachází uplatnění (Obr. 29). Nejnižší tržní hodnotu vykazuje mikrořasová biomasa v případě produkce biopaliv (0,3 €/kg), výroby krmiv (0,9 €/kg) a chemikálií (2 €/kg). Naopak využití v potravinářském, kosmetickém nebo farmaceutickém průmyslu se ukazuje jako potenciálně profitabilní, a to s tržní hodnotou kolem 30 €/kg. Obr. 29 zároveň naznačuje, proč jsou v současné době mikrořasy komercializovány výhradně na speciálních trzích – jednoznačně největší tržní hodnotu mají pigmenty obsažené v buňkách mikrořas. [67]



Obr. 29 Tržní hodnota mikrořasové biomasy a podíl jejích složek na celkové ceně [67]

Analýza nákladů na kultivaci, sklizeň biomasy, její biorafinaci a následný prodej umožňuje určit průmyslově profitabilní scénáře. Uvažovaná životnost bioreaktoru, zařízení pro biorafinaci a všech součástí je 15 let. [67]

Studie ukazují, že v případě produkce biomasy pro potravinářský průmysl, resp. kosmetický/farmaceutický průmysl se zaměřením na produkci pigmentů lze dosáhnout zisku. Konkrétní výsledky jsou shrnuty níže (Tab. 6). Kombinované využití mikrořasové biomasy v různých odvětvích vede k nejslibnějším výsledkům s čistým ziskem 7,6 €/kg. Naopak produkce biomasy pro výrobu biopaliv, chemikálií či krmiv se v současné době ukazuje jako neprofitabilní. Aby se tyto strategie staly profitabilní, musela by cena za kultivaci, sklizeň a biorafinaci klesnout pod 0,6 €/kg. [67]

Tab. 6 Profitabilita produkce mikrořasové biomasy ve vybraných průmyslových odvětvích [67]

Parametr	Potravinářský průmysl	Kosmetický či farmaceutický průmysl	Kombinované využití mikrořas
Odhadovaná počáteční investice (100 ha)	113 M€	113 M€	115 M€
Čistá současná hodnota NPV (životnost 15 let)	631 M€	633 M€	657 M€
Vnitřní míra výnosnosti IRR	61 %	61 %	62 %
Doba návratnosti	2 roky	2 roky	2 roky

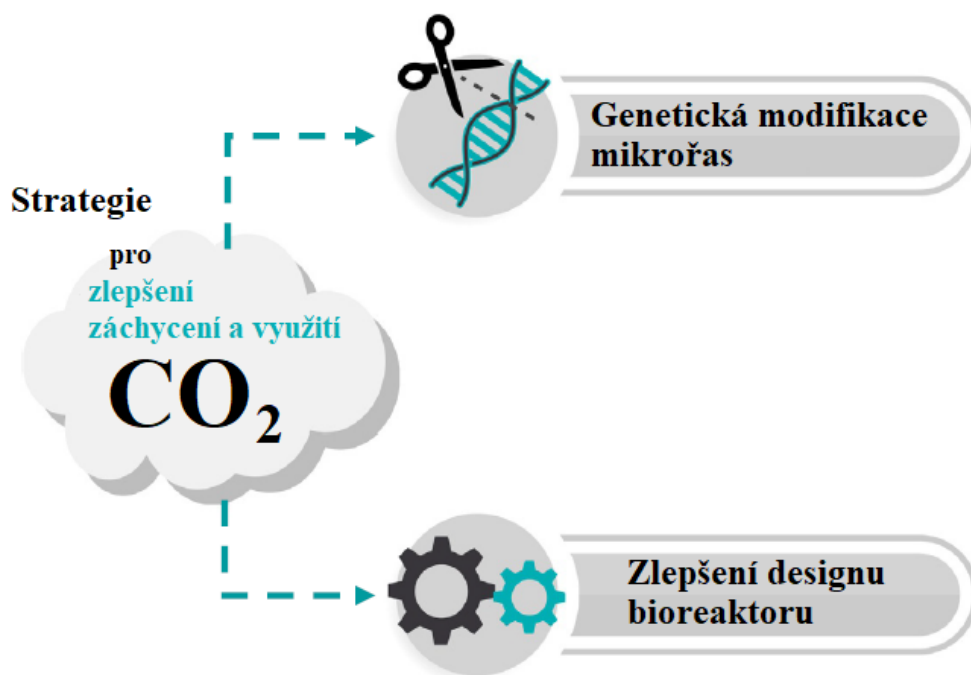
Pozn. Hodnota NPV („Net Present Value“) informuje, kolik finančních prostředků daná investice (projekt) ve zvolené době životnosti přinese. Je-li hodnota záporná, znamená to, že je projekt ztrátový.

Pozn. Hodnota IRR („Internal Rate of Return“) udává relativní výnos (rentabilitu), kterou projekt během své životnosti poskytuje. Číselně je rovna diskontní sazbě, při které je NPV rovna nule.

Pozn. Výpočet profitability byl zhotoven s použitím hodnot platných pro jižní Španělsko. Kvůli omezené velikosti trhu s přírodními pigmenty předpokládá studie prodej v tomto odvětví pouze z 21 % produkce, zbytek mikrořasové biomasy je využit v jiných, méně výnosných odvětvích.

4.5 Budoucnost mikrořasových bioreaktorů jakožto CCU technologie

Pro zvýšení efektivity zachytu oxidu uhličitého pomocí mikrořasových bioreaktorů a rozšíření kultivace mikrořas v průmyslovém měřítku je studováno několik možností zlepšení celého procesu. V současné době se mluví hlavně o dvou přístupech – genetické modifikaci mikrořas a zlepšení designu mikrořasových bioreaktorů (Obr. 30). [46]



Obr. 30 Vývojové směry v technologii zachycení a využití CO₂ pomocí mikrořasových bioreaktorů [46]

Technologie genetického inženýrství poskytují potenciál využití mikrořas jako prostředku pro zachycení oxidu uhličitého a syntézu široké škály produktů [69]. Vyžadují však dostupnost nástrojů pro sekvenování⁸ a genetickou úpravu mikrořasových buněk [70]. Tato oblast výzkumu je velmi progresivní a pokroky jsou vytvářeny stále rostoucím tempem. Je tedy pravděpodobné, že vývoj a aplikace geneticky modifikovaných buněk mikrořas bude v dohledné době úspěšný [69].

Co se týče designu mikrořasových bioreaktorů pro produkci v průmyslovém měřítku, hlavními směry vývoje jsou – vývoj technologií zlepšujících výkon současných bioreaktorů, rozšíření již existujících výrobních systémů a industrializace produkce mikrořas. Nové technologie umožňují optimalizaci řízení kultivačních podmínek, jejich přizpůsobení jednotlivým druhům mikrořas a snížení nákladů na výrobu.

Produkce mikrořas celosvětově roste, ale pouze vývoj ve zmíněných směrech povede k pokroku a dosažení nového hodnotného průmyslového odvětví založeného na produkci mikrořas. [46]

⁸ Termín sekvenování se v genetice a biochemii používá pro označení biochemických metod, kterými se zjišťuje pořadí nukleových bází [88].

4.6 Shrnutí

Jednou ze slibných technologií CCU je biologická konverze oxidu uhličitého využívající mikrořasové bioreaktory. Nejenže se mikrořasy vyznačují rychlým růstem, tj. velkou spotřebou oxidu uhličitého, ale po jejich zpracování lze mikrořasovou biomasu využít v mnoha průmyslových odvětvích.

Fotosyntézu a obecně růst mikrořas ovlivňuje mnoho faktorů. Ty se dají rozdělit do dvou skupin – fyzikální a nutriční (chemické). Do nutričních faktorů lze zařadit všechny látky, které buňky potřebují pro svou výživu (uhlík, dusík, fosfor atd.). Mezi fyzikální faktory patří dostatek světelného záření, teplota kultivačního média, pH atd. Jelikož jsou mikrořasy živé organismy, vyžadují pro svůj růst určité podmínky, které se pro každý druh mohou mírně lišit.

Tyto podmínky jsou udržovány pomocí kultivačního systému – bioreaktoru. Typů bioreaktorů existuje nepřeberné množství, v průmyslovém měřítku se jich však využívá pouze hrstka. Obecně je můžeme rozdělit do dvou skupin, a to na otevřené a uzavřené bioreaktory. Z otevřených je to traťový systém kultivace, který lze v současné době nazvat nejvyužívanějším typem bioreaktoru, a plošinový (kaskádový) bioreaktor. Z uzavřených se pro kultivaci v průmyslovém měřítku využívá trubicový a deskový bioreaktor.

Každý typ bioreaktoru nabízí jisté výhody a nevýhody. Otevřené bioreaktory bývají levnější a méně náročné na výstavbu, hrozí zde však riziko kontaminace mikrořasové biomasy, hůře se u nich regulují kultivační podmínky a nelze je efektivně využívat pro snižování emisí oxidu uhličitého. Čím dál větší uplatnění v průmyslovém měřítku proto nacházejí uzavřené bioreaktory, které nabízí vyšší kvalitu produkované biomasy a možnosti efektivně zpracovávat emise oxidu uhličitého.

Po samotné kultivaci mikrořas následuje zpracování biomasy, tzv. biorafinace. Mikrořasová biomasa nalézá uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích, ne ve všech lze ovšem vytvořit zisk. Ze studie této problematiky vyplývá, že produkce mikrořas pro výrobu biopaliv, krmiv či chemikálií není v současné době profitabilní. Naopak využití v potravinářském, kosmetickém nebo farmaceutickém průmyslu se ukazuje jako lukrativní. Je však důležité zdůraznit, že toto tvrzení platí pouze pro rozsáhlé kultivační systémy (100 ha). Nezávisle na typu bioreaktoru totiž platí, že se zvyšující se produkcí biomasy se značně snižují výrobní náklady.

Kultivace mikrořas v průmyslovém měřítku je stále ve fázi výzkumu, do budoucna se očekává snížení nákladů na produkci, a to hlavně díky genetické modifikaci mikrořas a zlepšení designu mikrořasových bioreaktorů.

5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ EMISNÍHO CO₂ VE VYBRANÉM PROVOZU

V souvislosti s cíli dohody jsou výrobní společnosti v Evropě nuceny hledat inovativní řešení mimo jiné v oblasti snižování produkovaných emisí. Mezi takové společnosti patří i společnost *LASSELSBERGER, s.r.o.*, která působí ve vysoce energeticky náročném sektoru – keramickém průmyslu. Následující podkapitoly se budou věnovat závodu nacházejícímu se v Chlumčanech (viz Obr. 31). Popíšeme si proces výroby a budou posouzeny možnosti využití produkovaných emisí.

5.1 Představení společnosti

„Společnost LASSELSBERGER, s.r.o. je jediným výrobcem keramických obkladů a dlažeb v ČR a zároveň se řadí k největším evropským výrobcům obkladových materiálů. LASSELSBERGER, s.r.o. zachovává a rozvíjí tradici české značky RAKO již 138 let. (...) V současnosti ve společnosti pracuje 1600 lidí v pěti výrobních závodech: Chlumčany, Lubná u Rakovníka, Horní Bříza, Podbořany, Borovany.“ [71]



Obr. 31 Výrobní závody společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.*

5.2 Proces výroby keramických obkladů/dlažeb

Prvním krokem výrobního procesu je dovoz potřebných surovin. Mezi ně patří hlavně jíly, kaoliny a živce, které se těží v ložiscích. Většinu ložisek v ČR vlastní společnost *LASSELSBERGER, s.r.o.* Po dovozu se suroviny nejprve za sucha upravují rozdrůžováním či drcením (*drtič* viz Obr. 32), poté dochází k jejich smíšení a následnému homogenizování a vážení tak, aby bylo dosaženo žádaného složení. Podle dané receptury se rozlišují rozdílné váhové poměry pro dlaždice (glazované a neglazované) a pro obklady. Receptury dlaždic obsahují zvýšený podíl živců, v případě obkladů se jedná o zvýšený podíl vápenců nebo dolomitů. [72]

Navážená směs se dopravuje do *mlecího zařízení*, kde dochází k mokrému mletí, tj. do směsi je přidána voda a tzv. „ztekucovadla“ (většinou sodné fosfáty), které mají za úkol dosáhnout co nejmenšího podílu vody ve směsi. Obsah sušiny u takto připravené směsi se pohybuje kolem 65 %. Do mlecího bubnu jsou zároveň přidána umělá mlecí tělesa, a to s cílem intenzifikace procesu. [72]

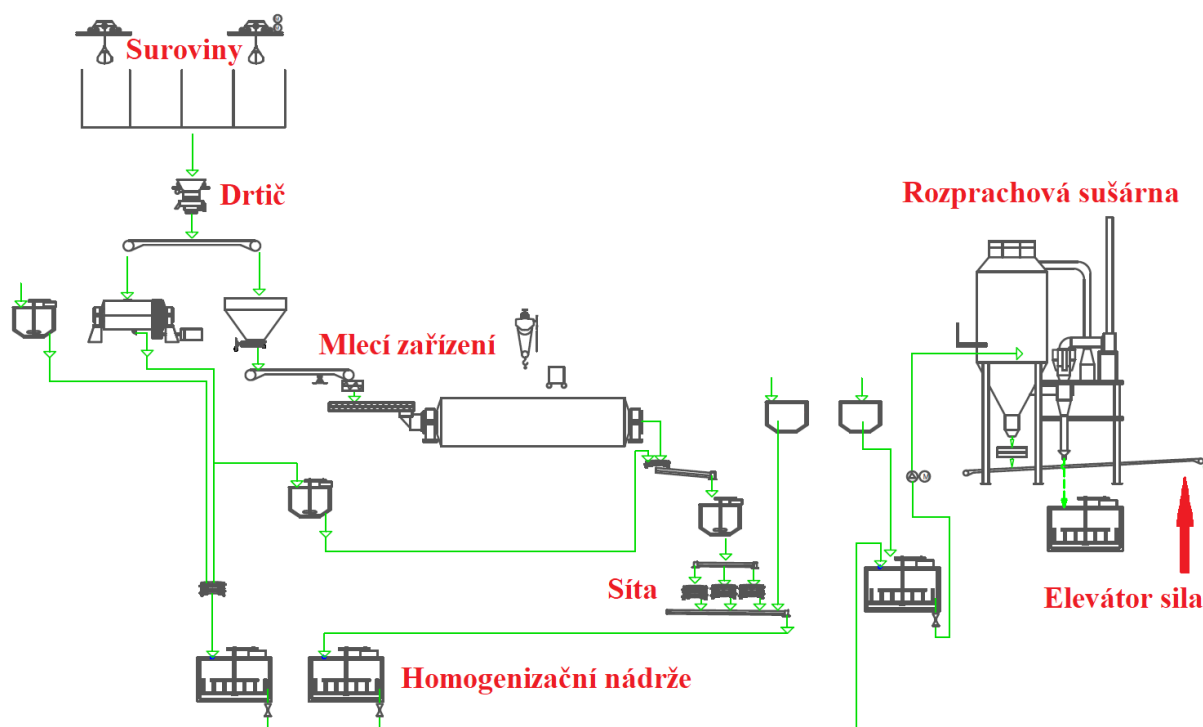
Z mlecího bubnu vystupuje směs jemně mletých surovin a vody nazývaná „keramická suspenze“. Keramická suspenze prochází přes řadu sít až do *homogenizačních nádrží*, kde se promíchává, čímž se dosahuje vyššího stupně homogenizace. Následně pokračuje do *rozprachové sušárny*. [72]

V rozprachové sušárně je keramická suspenze rozprášena tryskami, čímž jsou vytvořeny kapičky, které se dostávají do kontaktu s horkým sušícím médiem vznikajícím spalováním zemního plynu. Vypařením části vody obsažené v keramické suspenzi dochází ke vzniku granulátu o velikosti kolem 1 mm a vlhkosti 5 až 6 %. Ten dopadá na dno rozprachové sušárny. Poté putuje do *skladovacích sil* (*elevátor sila* viz Obr. 32), kde se nechá odležet, čímž dochází k vyrovnání vlhkosti jednotlivých částic. [72]

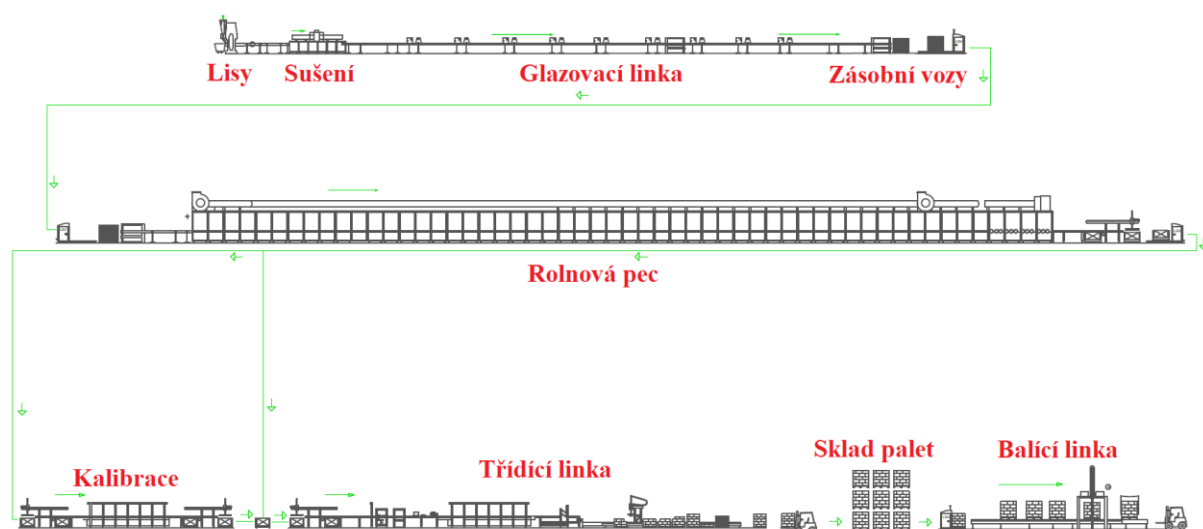
Granulát se následně dopravuje do *hydraulických lisů* (viz Obr. 33). Lisovací tlak se pohybuje kolem 26 MPa pro obklady a 35 až 42 MPa pro dlaždice. Lisování probíhá v několika fázích, kdy se nejprve materiál stlačí na ¼ celkového lisovacího tlaku, poté dochází k uvolnění lisu a nakonec je polotovar dolisován plným tlakem. [73]

Dalším krokem procesu je *sušení*, kdy se u vylisovaných polotovarů snižuje vlhkost pod 1 %. V případě glazovaných dlaždic výlisky pokračují na *glazovací linku* (v opačném případě se tento krok přeskočí), kde dochází k nanesení dvou tenkých vrstev na jejich povrch – podglazurovou vrstvu (nazývanou engoba) a vrstvu glazur. Po dokončení glazování pokračují dlaždice do *zásobních vozů*, které zajišťují plynulé zásobování vypalovací *rolnové pece* (ve vozech je vytvořena zásoba na minimálně 12 hodin provozu). [73]

Rolnová pec tvoří srdce keramické výroby. Obklady či dlažby jsou dopravovány v jedné vrstvě po řadě keramických válečků. Čas potřebný pro vypálení se pohybuje v rámci desítek minut (50 až 60 minut) a proces je kontinuální. Pec je potřeba vyhřát na teplotu 1150 až 1220 °C. S délkou 120 m a výkonem 3 miliony m² obkladů za rok tvoří rolnové pece dominantu výrobního závodu. Po vypálení putují obklady či dlažby přes *kalibrační zařízení* do části závodu, kde jsou tříděny a následně baleny (*třídící linka*, *balící linka* viz Obr. 33), čímž dostáváme finální produkt výroby, který je připraven pro expedici. [73]



Obr. 32 Proces výroby keramických obkladů/dlažeb – výroba granulátu



Obr. 33 Proces výroby keramických obkladů/dlažeb

Vzhledem k energetické náročnosti procesu produkuje výrobní závod v Chlumčanech i odpovídající množství emisí. Nejvíce jich vzniká v rozprachové sušárně a rolnové peci. V obou případech se jako topné médium používá zemní plyn, přičemž spaliny z rolnové pece mohou kvůli vypalování glazovaných dlaždic obsahovat nežádoucí látky (např. těžké kovy). Z tohoto důvodu budeme v následujících kapitolách uvažovat pouze o využití spalin z rozprachové sušárny.

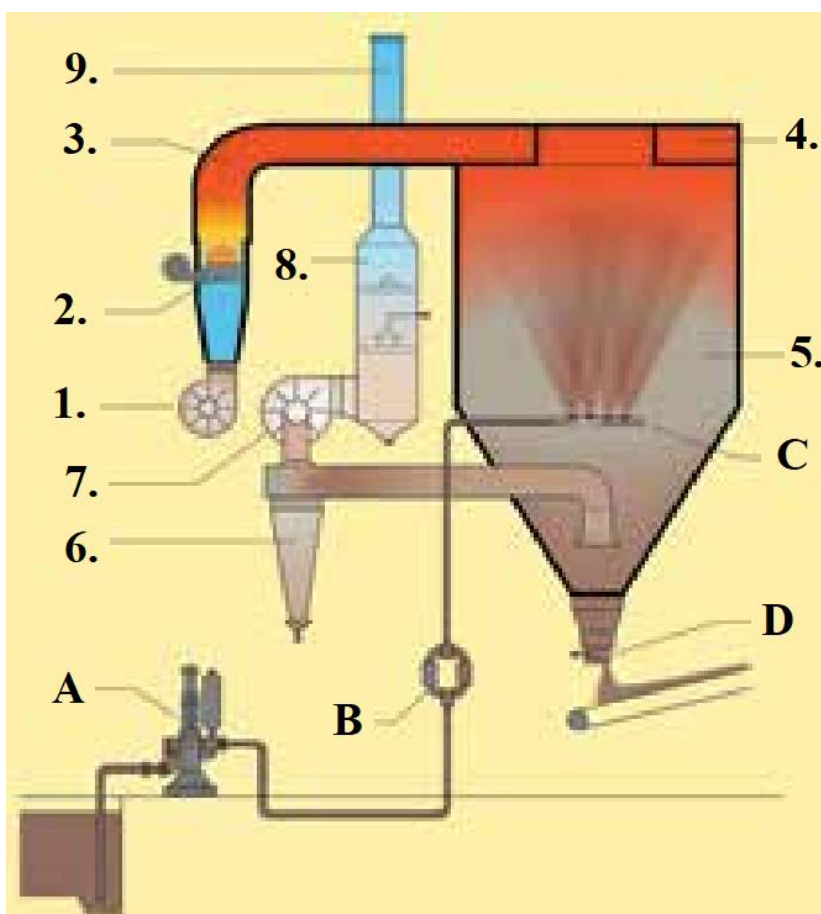
5.3 Rozprachová sušárna

Při přeměně keramické suspenze na granulát vzniká v rozprachové sušárně Chlumčanského závodu obrovské množství spalin. Konkrétně se jedná o 41 909 m³/h (viz Tab. 7), přičemž proces výroby je nepřetržitý, kontinuální. Pro pochopení problematiky bude nejprve popsána funkce rozprachové sušárny a následně posouzeny možnosti využití vznikajících spalin.

5.3.1 Popis funkce sušárny

V této podkapitole bude představena funkce Chlumčanské rozprachové sušárny, jejíž schéma můžeme vidět na Obr. 34, počítačový model reálného zařízení na Obr. 35.

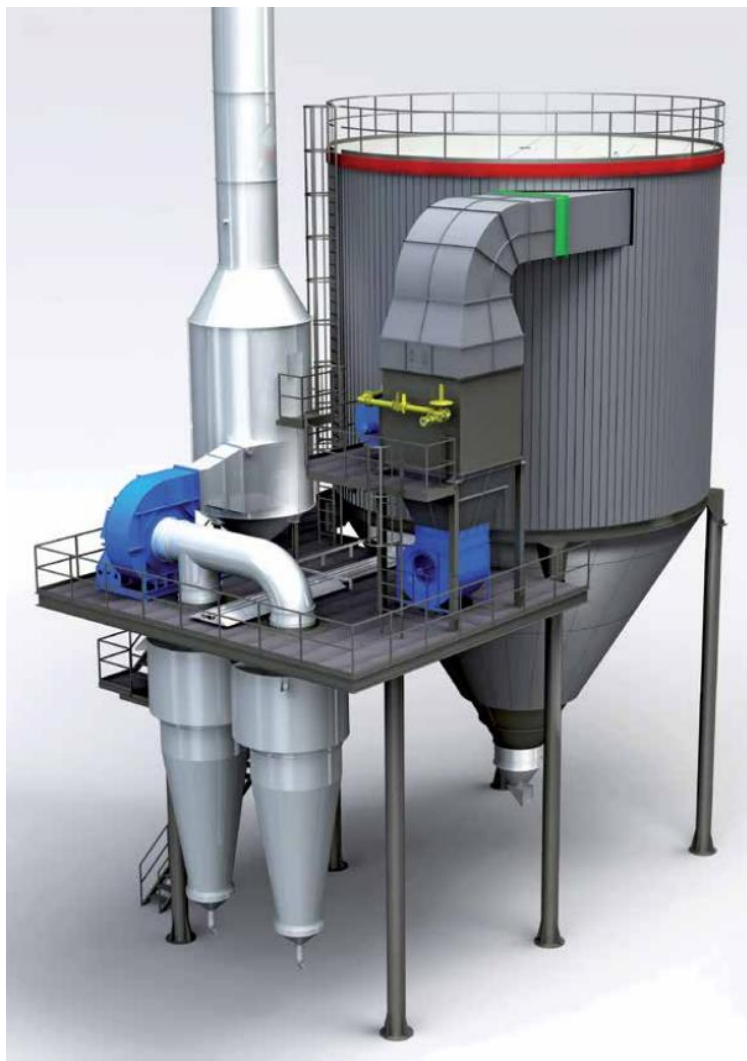
Sušící vzduch je přiváděn tlakovým ventilátorem (1.) do hořáku (2.), kde se ohřívá na cca 500 až 600 °C. Zemní plyn slouží jako topné médium hořáku, sušící médium je tedy směs horkého vzduchu a spalin. Směs dále pokračuje izolovaným ocelovým potrubím (3.) do prstencového distributoru (4.), který rovnoměrně rozdělí proud horkého vzduchu v sušící věži (5.), čímž dojde k vytvoření vzduchového víru. Tento vír zajišťuje homogenitu produktu (granulátu) a zabraňuje negativním jevům, jako například hromadění a ulpívání vlhké keramické suspenze na stěnách sušící věže. [74]



Obr. 34 Schéma rozprachové sušárny [74]

Druhým vstupujícím proudem je tedy keramická suspenze, kterou přivádí čerpadlo (A) přes filtry (B) do radiálně uspořádaných trysek (C). Keramická suspenze je rozprášena tryskami, čímž dochází k jejímu kontaktu s horkým sušícím vzduchem, který odebírá její vlhkost. Vysušením keramické suspenze na 5 až 6 % vzniká granulát, který dopadá dno sušící věže (D), odkud je přepravován pomocí dopravních pásů do skladovacích sil. [74]

Vzniklý vlhký vzduch putuje přes cyklony (6.), kde dochází k zachycení větších prachových částic, do hlavního ventilátoru (7.). Následně pokračuje přes filtry (8.), kde je dočištěn od jemnějších prachových částic, do komína sušárny (9.).



Obr. 35 Počítačový model rozprachové sušárny [74]

5.3.2 Možnosti využití emisí CO₂ z rozprachové sušárny

Vzhledem k množství produkovaných emisí a zvyšujícím se cenám emisních povolenek (Obr. 36) vyvstává otázka, zdali je ekonomické vypouštět odpadní proud spalin z rozprachové sušárny do okolí a platit emisní povolenky, nebo proud zpracovat některou z technologií CCS či CCU?



Obr. 36 Vývoj ceny emisních povolenek platný k datu 23.4.2022 [75]

Pozn. Z grafu je patrné, že se cena emisních povolenek za poslední 3 roky téměř zčtyřnásobila. Aktuální cena (platná k datu 23.4.2022) je 89 €/tunu.

K zodpovězení otázky musíme v první řadě stanovit parametry výstupního proudu rozprachové sušárny. Ty lze vyčíst např. z „Protokolu o autorizovaném měření emisí“ (viz Příloha č. 1), jehož výsledky jsou shrnuty níže (Tab. 7).

Tab. 7 Výsledky kontinuálního měření plynných emisí z rozprachové sušárny [Příloha č. 1]

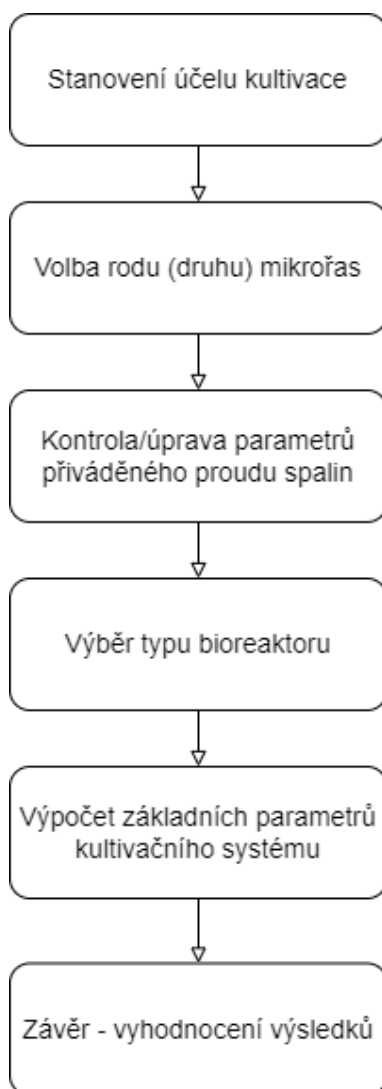
Měřená veličina	Průměrná hodnota	Jednotka
Vodní pára (H ₂ O)	19,33	[% obj.]
Kyslík (O ₂)	16,93	[% obj.]
Oxid uhličitý (CO ₂)	2,72	[% obj.]
Oxid uhelnatý (CO)	73,5	[mg/m ³]
Oxidy dusíku (NO ₂)	38,5	[mg/m ³]
Oxid siřičitý (SO ₂)	45,8	[mg/m ³]
Organické látky (jako VOC)	15,9	[mg/m ³]
Teplota výstupních spalin	109,9	[°C]
Barometrický tlak spalin	96,5	[kPa]
Objemový tok vlhkých spalin	41 909	[m ³ /h] při n.p.

V Tab. 7 vidíme, že výstupní proud z rozprachové sušárny obsahuje 2,72 % obj. oxidu uhličitého. Pro zjednodušení lze uvažovat chování všech složek směsi jako ideálního plynu (tj. 2.72 % obj. = 2,72 % mol.). Při porovnání koncentrace oxidu uhličitého s minimální vstupní koncentrací pro separační mechanismy (Tab. 1 str. 24), zjišťujeme, že v tomto případě nelze oxid uhličitý separovat ze směsi. Z toho vyplývá, že produkované emise nelze zpracovat žádnou z technologií CCS, protože ty ke své činnosti vyžadují oxid uhličitý o vyšší koncentraci.

Pokud chceme snížit náklady za emisní povolenky, můžeme ještě uvažovat o využití některé z technologií CCU. Z těch se s výhodou nabízí možnost biologické konverze oxidu uhličitého, tj. přímé fotosyntetické fixace v mikrořasovém bioreaktoru. Výstupní proud plynu lze přímo „pumpovat“ do bioreaktoru, oxid uhličitý tedy není potřeba separovat.

6 INTEGRACE MIKROŘASOVÉHO BIOREAKTORU DO VYBRANÉHO PROVOZU

Při návrhu integrace mikrořasového bioreaktoru do výrobního provozu v Chlumčanech se budeme řídit postupem uvedeným níže (Obr. 37).



Obr. 37 Postup integrace mikrořasového bioreaktoru do vybraného provozu

6.1 Stanovení účelu kultivace

V prvním kroku si určíme, za jakým účelem bude kultivace probíhat. V případě společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.* a jeho výrobního závodu v Chlumčanech se jedná o snížení emisí oxidu uhličitého z rozprachové sušárny.

Zajištěním dostupnosti několika dalších látek (dusíku, fosforu, draslíku atd.) a dodržáním potřebných kultivačních podmínek (viz podkapitola 4.2) dochází k nárůstu mikrořasové biomasy. Ta tedy vzniká jako vedlejší produkt procesu snižování emisí oxidu uhličitého.

Produkovaná mikrořasová biomasa patří mezi cenné komodity a po zpracování může být prodána a využita v závislosti na její čistotě v různých průmyslových sektorech (viz podkapitola 4.4). Proces snižování emisí oxidu uhličitého z rozprachové sušárny by bez zpracování a následného prodeje mikrořasové biomasy nedával ekonomický smysl.

Emise produkované rozprachovou sušárnou vznikají spalováním zemního plynu a jejich složení můžeme vidět v Tab. 7 (str. 56). Kaštánek a kol. (2010) potvrzují, že emise vznikající při spalování zemního plynu mohou být použity pro kultivaci mikrořasové biomasy o vysoké kvalitě. Toxikologické rozborů ukazují, že nedochází k významnému hromadění těžkých kovů, a dokonce biomasa vyhovuje přísným požadavkům EU pro maximální limity kontaminujících látek v potravinách. [76]

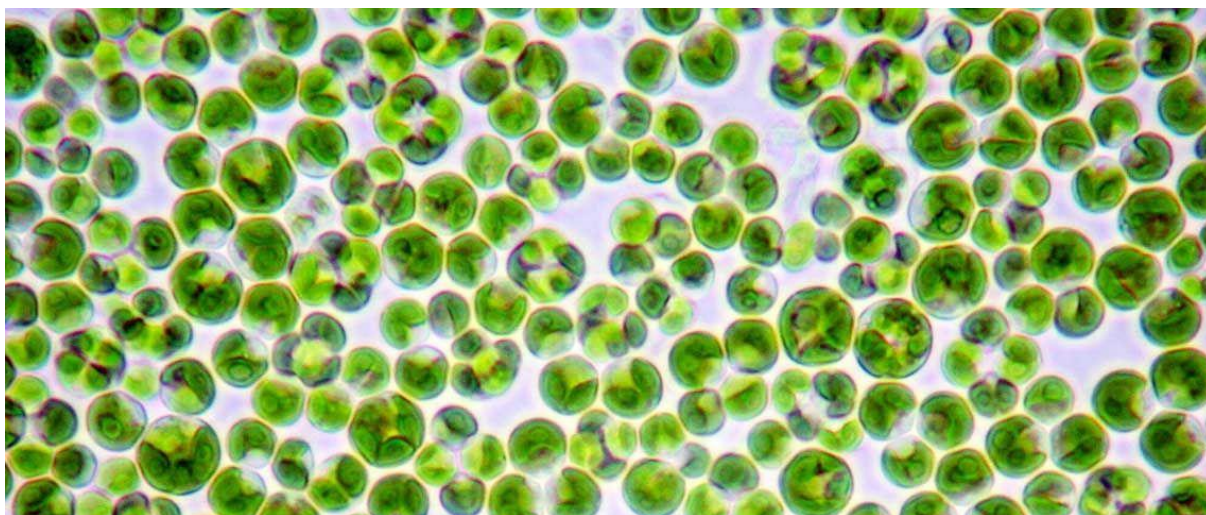
Pokud budeme předpokládat analogii mezi emisemi uváděnými ve studii (Kaštánek a kol., 2010) a emisemi produkovanými rozprachovou sušárnou, můžeme uvažovat o přímém využití takto vznikající biomasy pro potravinářský, kosmetický nebo farmaceutický průmysl [76].

6.2 Volba vhodného rodu mikrořas

S ohledem na účely kultivace hledáme takový rod mikrořas, který se vyznačuje rychlým růstem, odpovídá svými požadavky podmínkám ČR (teplota, sladkovodní mikrořasa atp.) a je relativně odolný vůči výkyvům kultivačních podmínek od optimálních hodnot.

Chlorella je rod sladkovodních jednobuněčných zelených mikrořas charakteristický relativní nenáročností kultivace, vysokou růstovou rychlostí a vysokým obsahem bílkovin dalších cenných složek [77]. Kulovité buňky *Chlorelly* o průměru 2 až 10 mikrometrů se rozmnožují nepohlavně a ke zdvojnásobení hmoty biomasy dojde při dodržení optimálních podmínek přibližně za 19 hodin [78]. Rod *Chlorella* tedy odpovídá zmíněným požadavkům. Zároveň se mikrořasy tohoto rodu v současné době hojně využívají v komerčním měřítku. Z těch nejčastěji produkovaných jsou to – *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa* nebo „Třeboňská *Chlorella*“ *Chlorella sp.*

Co se týče složení, mikrořasovou biomasu obvykle tvoří 51 % až 58 % bílkovin, 12 % až 17 % sacharidů, 14 % až 22 % lipidů a další velmi cenné látky [79]. Cennými látkami jsou myšleny hlavně pigmenty, antioxidanty, provitamíny, vitamíny a CGF („Chlorella Growth Factor“) [77]. Konkrétní složení biomasy závisí především na podmínkách, ve kterých jsou mikrořasy kultivovány. Změnou kultivačních podmínek můžeme tedy částečně přizpůsobit složení buněk.



Obr. 38 Ilustrativní snímek buněk mikrořas rodu *Chlorella* [80]

6.3 Kontrola/úprava parametrů přiváděného proudu spalin

Dalším krokem postupu je kontrola/úprava přiváděného proudu spalin. V Tab. 7 (str. 56) vidíme, že přiváděná směs obsahuje relativně málo kyslíku (v porovnání se vzduchem), což lze považovat za pozitivní, protože se tím snižuje riziko zpomalení fotosyntézy (viz podkapitola 4.2.5). Koncentrace oxidu uhličitého odpovídá optimálnímu rozsahu (podkapitola 4.2.1), takže tyto parametry přiváděného proudu není potřeba upravovat.

Oxidy síry (SO_x) a dusíku (NO_x) se negativně projevují při kultivaci mikrořas díky svému vlivu na hodnotu pH, kterou snižují [81]. Vysoké koncentrace SO_x mohou být dokonce pro buňky mikrořas toxické [82]. Z tohoto důvodu je potřeba porovnat koncentrace oxidů v přiváděném proudu spalin s maximálními přípustnými hodnotami. Z Tab. 8 můžeme vyčíst, že koncentrace SO_x a NO_x v přiváděné směsi jsou nižší než maximální přípustné hodnoty, které buňky mikrořas rodu *Chlorella* tolerují. Nebude tedy docházet ke zpomalení růstu, odumírání buněk ani přílišnému snížení pH.

Tab. 8 Porovnání koncentrace SO_2 a NO_2 v přiváděném proudu s maximálními přípustnými hodnotami [83]

Koncentrace	SO_2 [ppm]	SO_2 [mg/m^3]	NO_2 [ppm]	NO_2 [mg/m^3]
V přiváděném proudu	16	45,8	19	38,5
Tolerováno	87	248,7	78	160,1

Posledním dostupným parametrem přiváděného proudu, který může negativně ovlivnit kultivaci mikrořas, je teplota spalin. Z Tab. 7 (str. 56) víme, že teplota spalin vystupující z rozprachové sušárny, má hodnotu 109,9 °C. Z podkapitoly 4.2.3 vyplývá, že optimální teplota kultivačního média se u „teplomilných“ rodů mikrořas (kam lze zařadit i rod *Chlorella*) pohybuje mezi 30 až 35 °C a každé vychýlení od těchto hodnot vede ke zpomalení růstu [50]. Je tedy jasné, že přiváděný proud spalin musí být schlazen, takže bude nezbytná integrace výměníku tepla.

Volbu výměníku tepla komplikuje fakt, že vodní páry obsažené ve spalinách budou při chlazení ze 109,9 °C na cca 30 °C kondenzovat (viz rovnice (8)). Je tedy potřeba počítat s odvodem zkondenzované vody a komplikovaným výpočtem přenosu tepla kvůli dvoufázovému režimu toku ve výměníku. Množství oxidu uhličitého a dalších látek ve spalinách to však nijak neovlivní, nepatrně se pouze zvýší jejich koncentrace. Toto zvýšení je však zanedbatelné, proto budeme v následujících podkapitolách počítat s hodnotami uvedenými v Tab. 7.

K ověření tvrzení o kondenzaci vodní páry při chlazení spalin nejdříve zjistíme parciální tlak vodní páry ve spalinách (pro zjednodušení uvažujeme chování složek spalin jako ideálního plynu) [84]. Hodnoty vstupních veličin extrahujeme z Tab. 7. Následně vypočítáme teplotu rosného bodu z Antoineovy rovnice [85].

$$p_{H_2O} = p \cdot \frac{\Phi'}{100} = 96,5 \cdot \frac{19,33}{100} = 18,65 \text{ kPa} \quad (7)$$

Kde:

p_{H_2O} Parciální tlak vodní páry ve spalinách [kPa]

p Celkový (barometrický) tlak spalin [kPa]

Φ' Objemový zlomek vodní páry ve spalinách (m³/m³) [%]

$$t_{RB} = -\frac{B}{\log(p_{H_2O})-A} - C = -\frac{1730,63}{\log(18,65)-7,196210} - 233,426 = 58,6 \text{ °C} \quad (8)$$

Kde:

t_{RB} Teplota rosného bodu [°C]

p_{H_2O} Parciální tlak vodní páry ve spalinách [kPa]

A Konstanta Antoineovy rovnice [-]

B Konstanta Antoineovy rovnice [-]

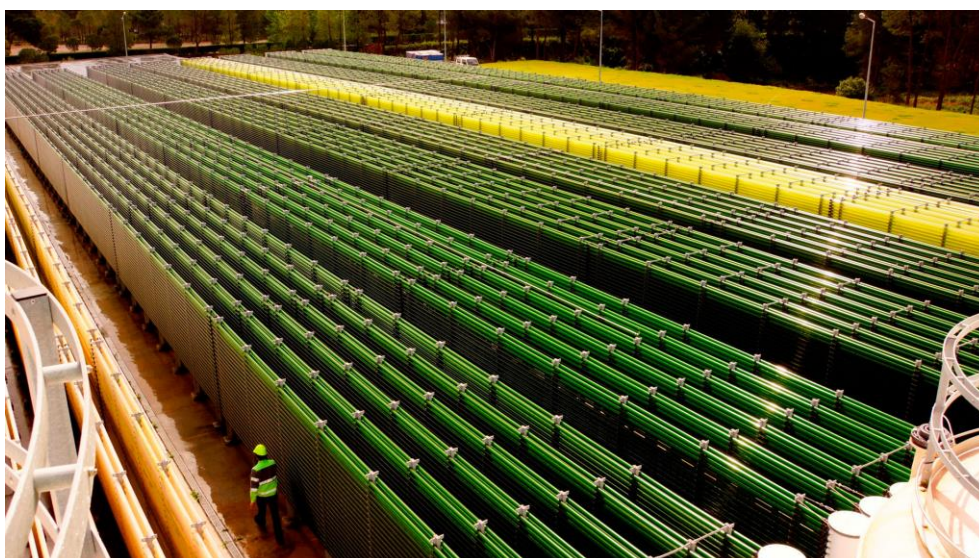
C Konstanta Antoineovy rovnice [-]

6.4 Výběr typu bioreaktoru

V podkapitole 4.3 byly představeny základní typy bioreaktorů vhodných pro průmyslovou produkci mikrořas. Srovnání charakteristických parametrů jednotlivých typů mikrořasových bioreaktorů můžeme vidět v Tab. 5 (str. 45). Vzhledem k účelu kultivace (snížení emisí oxidu uhličitého z rozprachové sušárny) připadají v úvahu pouze uzavřené bioreaktory (trubicový a deskový). Z těch vybereme a dále budeme počítat s trubicovým bioreaktorem (na základě doporučení dostupné literatury) [46], [62].

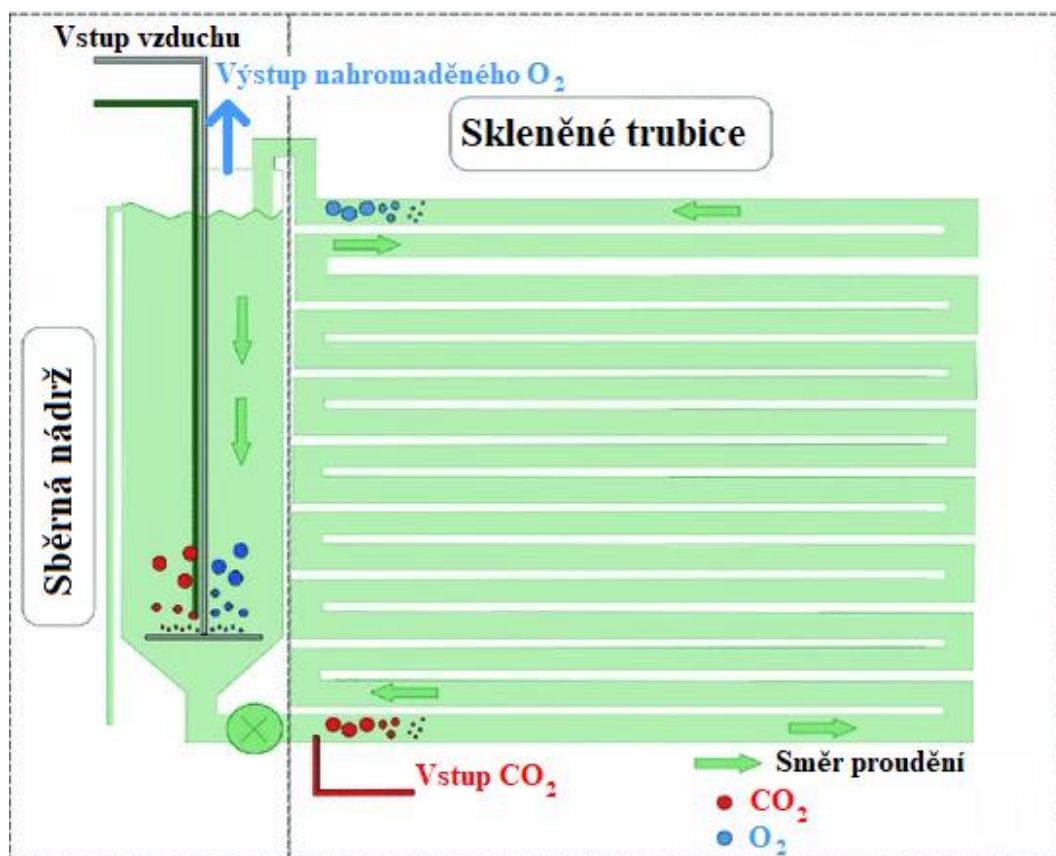
Horizontální vícevrstvé uspořádání trubic („multilayer horizontal tubular bioreactor“ viz podkapitola 4.3.3) se v porovnání s jednovrstvým jeví v případě výrobního závodu v Chlumčanech jako výhodnější, protože je potřeba zpracovat velké množství plynu a tento typ bioreaktoru dosahuje lepšího poměru objemu na jednotku plochy.

Rychlost proudění kultivačního média by se měla pohybovat mezi 0,4 a 1 m/s. Hlavním omezujícím faktorem objemu osvětlené části bioreaktoru (skleněných trubic) je akumulace kyslíku produkovaného při fotosyntéze. V závislosti na konstrukci bioreaktoru a rychlosti proudění se doporučuje maximální délka trubic mezi 100 až 400 metry. Průmyslová zařízení se potom sestávají ze souboru několika bioreaktorů (Obr. 39). [46]



Obr. 39 Soubor trubicových bioreaktorů v Portugalském Pataias o celkovém objemu 1300 m³ [86]

Do bioreaktoru se kromě emisního plynu z rozprachové sušárny přivádí vzduch, který slouží ke snížení množství kyslíku rozpuštěného v kultivačním médiu vznikajícího při fotosyntéze buněk mikrořas. Konkrétně se proud vzduchu přivádí do sběrné nádrže, která je konstruována tak, aby maximalizovala desorpci nahromaděného kyslíku z kultivačního média. Emisní plyn z rozprachové sušárny se vstřikuje do osvětlené části bioreaktoru, kde zajišťuje dostatečný přísun oxidu uhličitého pro fotosyntézu buněk mikrořas (Obr. 40).



Obr. 40 Schéma výměny plynů v trubicovém bioreaktoru [87]

6.5 Výpočet základních parametrů kultivačního systému

Rozprachová sušárna ve výrobním závodě společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.* v Chlumčanech produkuje obrovské množství emisního plynu, konkrétně se jedná o 41 909 m³/h (viz Tab. 7, str. 56). Otázkou je, jsou-li mikrořasové bioreaktory skutečně schopny pojmout a zachytit takové množství plynu?

6.5.1 Varianta 1 – velkokapacitní bioreaktor o objemu 2000 m³

V současné době existuje pouze omezený počet zařízení soustředících se na produkci mikrořasové biomasy v uzavřených bioreaktorech. Největší z nich dosahují celkového objemu 2000 m³ [66]. Z této hodnoty budeme ve variantě 1 vycházet. V dostupné literatuře můžeme najít informaci o hodnotě produktivity výroby mikrořasové biomasy k_{pr} , které dosahuje bioreaktor s horizontálním vícevrstevným uspořádáním trubice při dodržení optimálních kultivačních podmínek [53]. Dále víme, že pro produkci 1 kg mikrořasové biomasy potřebujeme přibližně 2 kg oxidu uhličitého [66]. V prvním kroku si tedy vypočítáme odpovídající množství produkovaného množství biomasy a spotřebovaného množství oxidu uhličitého.

$$m_{\check{R}AS_1} = k_{pr} \cdot V_{B_1} = 0,021 \cdot 2000 = 42 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \approx 367,92 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (9)$$

Kde:

$m_{\check{R}AS_1}$ Produkováno množství mikrořasové biomasy [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

k_{pr} Koeficient produktivity produkce biomasy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$]

V_{B_1} Celkový objem kultivačního systému [m^3]

$$m_{CO2_1} = k_{př} \cdot m_{\check{R}AS_1} = 2 \cdot 42 = 84 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \approx 735,84 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (10)$$

Kde:

m_{CO2_1} Spotřebované množství čistého oxidu uhličitého [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

$k_{př}$ Koeficient pro převod množství biomasy na množství CO_2 [-]

$m_{\check{R}AS_1}$ Produkováno množství mikrořasové biomasy [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

Ze získaných hodnot vyplývá, že v bioreaktorech o celkovém objemu 2000 m^3 jsme schopni zpracovat 84 kg čistého oxidu uhličitého za hodinu. Tento výsledek porovnáme s množstvím produkovaného plynu v rozprachové sušárně v Chlumčanech. K tomu si nejprve musíme určit množství čistého oxidu uhličitého ve výstupní směsi ze sušárny, poté pro výpočet využijeme stavovou rovnici. Pro zjednodušení budeme předpokládat chování oxidu uhličitého jako ideálního plynu.

$$V_{CO2} = V_E \cdot \frac{\Phi_{CO2}}{100} = 41909 \cdot \frac{2,72}{100} = 1140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (11)$$

Kde:

V_{CO2} Objemový tok čistého oxidu uhličitého [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

V_E Celkový objemový tok spalín z rozprachové sušárny [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

Φ_{CO2} Objemový zlomek oxidu uhličitého ve směsi [%]

$$m_{CO2} = \frac{p \cdot V_{CO2} \cdot M_{CO2}}{R \cdot T} = \frac{101325 \cdot 1140 \cdot 0,044}{8,314 \cdot 273,15} = 2238 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (12)$$

Kde:

m_{CO2} Sušárnou produkované množství čistého oxidu uhličitého [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

p Tlak odpovídající normálním podmínkám [Pa]

V_{CO2} Objemový tok čistého oxidu uhličitého [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

M_{CO2} Molární hmotnost oxidu uhličitého [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$]

R Molární plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]

T Teplota odpovídající normálním podmínkám [K]

$$m_{pom} = \frac{m_{CO_2,1}}{m_{CO_2}} \cdot 100 = \frac{84}{2238} \cdot 100 = 3,75 \% \quad (13)$$

Kde:

m_{pom} Spotřebované množství CO₂/Sušárnou produkované množství CO₂ [%]

$m_{CO_2,1}$ Spotřebované množství čistého oxidu uhličitého [kg · h⁻¹]

m_{CO_2} Sušárnou produkované množství čistého oxidu uhličitého [kg · h⁻¹]

Z výsledku vyplývá, že i při úvaze výstavby jednoho z největších celků produkujícího mikrořasovou biomasu v uzavřených bioreaktorech na světě, bychom zpracovali pouze cca 3,75 % emisí produkovaných rozprachovou sušárnou. Pro doplnění představy o velikosti takového zařízení dopočítáme plochu potřebnou pro výstavbu. Hodnotu pro převod z objemu kultivačního systému na plochu jsme získali z literatury (hodnota platí pro trubicový bioreaktor s horizontálním vícevrstevným uspořádáním trubic) [53]. Dosažené výsledky a nejdůležitější parametry jsou shrnuty níže (Tab. 9).

$$S_{B,1} = \frac{V_{B,1}}{k_p} = \frac{2000}{0,0448} = 44643 \text{ m}^2 \approx 4,46 \text{ ha} \quad (14)$$

Kde:

$S_{B,1}$ Plocha potřebná pro výstavbu kultivačního systému [m²]

$V_{B,1}$ Celkový objem kultivačního systému [m³]

k_p Koeficient převodu objemu bioreaktoru na plochu [m]

Tab. 9 Základní parametry kultivačního systému – varianta 1

Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka
Celkový objem kultivačního systému	$V_{B,1}$	2000	[m ³]
Plocha potřebná pro výstavbu kultivačního systému	$S_{B,1}$	4,46	[ha]
Produkované množství mikrořasové biomasy	$m_{\text{RAS},1}$	367,92	[t · rok ⁻¹]
Spotřebované množství oxidu uhličitého	$m_{CO_2,1}$	735,84	[t · rok ⁻¹]
Spotřebované množství CO ₂ /Sušárnou produkované množství CO ₂	m_{pom}	3,75	[%]

Pozn. Výpočet základních parametrů odpovídá kultivaci mikrořas v trubicovém bioreaktoru s horizontálním vícevrstevným uspořádáním trubic.

6.5.2 Varianta 2 – bioreaktor pro kompletní využití CO₂

Výpočet základních parametrů kultivačního systému v případě varianty 1 nám ukázal, že i kdybychom budeme uvažovat celosvětově největší kultivační systém využívající uzavřené mikrořasové bioreaktory (objem 2000 m³, rozloha 4,46 ha), bude spotřebováno pouze 3,75 % emisí produkovaných rozprachovou sušárnou. V případě varianty 2 vypočítáme, jak by musel být kultivační systém velký, aby spotřeboval 100 % emisí oxidu uhličitého. Je důležité zdůraznit, že o takto rozsáhlém systému lze v současné době uvažovat pouze na teoretické úrovni.

Z rovnice (12) známe množství produkovaného emisního plynu. Použitím koeficientu pro převod množství biomasy na množství oxidu uhličitého zjistíme, kolik mikrořasové biomasy bude vyprodukováno.

$$m_{CO_2} = 2238 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \approx 19604,88 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (12)$$

$$m_{\text{RAS}_2} = \frac{m_{CO_2}}{k_{pr}} = \frac{2238}{2} = 1119 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \approx 9802,44 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1} \quad (15)$$

Kde:

m_{CO_2} Spotřebované množství čistého oxidu uhličitého [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

m_{RAS_2} Produkované množství mikrořasové biomasy [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

k_{pr} Koeficient pro převod množství biomasy na množství CO₂ [-]

Nyní můžeme přejít k výpočtu objemu mikrořasových bioreaktorů a plochy potřebné pro výstavbu takového kultivačního systému.

$$V_{B_2} = \frac{m_{\text{RAS}_2}}{k_{pr}} = \frac{1119}{0,021} = 53286 \text{ m}^3 \quad (16)$$

Kde:

V_{B_2} Celkový objem kultivačního systému [m^3]

m_{RAS_2} Produkované množství mikrořasové biomasy [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

k_{pr} Koeficient produktivity produkce biomasy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$]

$$S_{B_2} = \frac{V_{B_2}}{k_p} = \frac{53286}{0,0448} = 1189420 \text{ m}^2 \approx 118,94 \text{ ha} \quad (17)$$

Kde:

S_{B_2} Plocha potřebná pro výstavbu kultivačního systému [m^2]

V_{B_2} Celkový objem kultivačního systému [m^3]

k_p Koeficient převodu objemu bioreaktoru na plochu [m]

Velikost takového kultivačního systému přibližně odpovídá parametrům extrémně rozsáhlého systému zmiňovaného v lit. [67] viz podkapitola 4.4 (Hodnocení profitability produkce mikrořasové biomasy). Díky tomu se můžeme pokusit zhodnotit finanční výhodnost systému vzhledem k účelu kultivace (snížení emisí oxidu uhličitého). Nejprve zjistíme, kolik finančních prostředků bychom ušetřili za emisní povolenky (Obr. 36, str. 56). Poté přejdeme k porovnání ušetřených finančních prostředků za celou dobu životnosti zařízení vůči odhadovaným investičním nákladům (viz Tab. 6, str. 48). Uvažovaná životnost zařízení je 15 let.

$$I_E = m_{CO_2} \cdot I_{EP} = 19604,88 \cdot 89 = 1744834 \text{ €/rok} = 1,74 \text{ M€/rok} \quad (18)$$

Kde:

I_E Roční úspora finančních prostředků na emisních povolenkách [€/rok]

m_{CO_2} ... Spotřebované množství čistého oxidu uhličitého [$t \cdot \text{rok}^{-1}$]

I_{EP} Cena emisní povolenky [€/t_{CO2}]

$$I_I = \frac{S_{B,2}}{S_{100}} \cdot I_{I,100} = \frac{118,94}{100} \cdot 113 = 134 \text{ M€} \quad (19)$$

Kde:

I_I Odhadovaná počáteční investice zařízení [M€]

S_{100} Plocha 100 ha zařízení [ha]

$I_{I,100}$ Odhadovaná počáteční investice 100 ha zařízení [M€]

$$I_P = \frac{I_E \cdot \check{Z}}{I_I} \cdot 100 = \frac{1,74 \cdot 15}{134} \cdot 100 = 19,5 \% \quad (20)$$

Kde:

I_P Poměr ušetřených finančních prostředků za dobu životnosti zařízení vůči odhadované počáteční investici [%]

I_{EP} Cena emisní povolenky [€/t_{CO2}]

$\check{Z}$ Životnost zařízení [rok]

I_I Odhadovaná počáteční investice [M€]

V posledním kroku shrneme dosažené výsledky (Tab. 10). Je potřeba poznamenat, že výpočty jsou velmi zjednodušené a pouze orientační. Do výpočtu nejsou zahrnuty provozní náklady. Také nepočítáme s využitím a zhodnocením vyprodukované mikrořasové biomasy. Dosažený výsledek slouží pouze jako ukazatel ziskovosti vzhledem k uvažovanému primárnímu účelu kultivace – snížení emisí oxidu uhličitého. Poměr ušetřených finančních prostředků a odhadované počáteční investice ukazuje, že za životnost 15 let se firmě vrátí pouze 19,5 % investovaných finančních prostředků.

Tab. 10 Základní parametry kultivačního systému – varianta 2

Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka
Celkový objem kultivačního systému	V_{B1}	53286	$[m^3]$
Plocha potřebná pro výstavbu kultivačního systému	$S_{B,1}$	118,94	$[ha]$
Produkované množství mikrořasové biomasy	$m_{RAS,2}$	9802,44	$[t \cdot rok^{-1}]$
Spotřebované množství oxidu uhličitého	m_{CO2}	19604,88	$[t \cdot rok^{-1}]$
Roční úspora finančních prostředků na emisních povolenkách	I_E	1,74	$[M€/rok]$
Odhadovaná počáteční investice zařízení	I_I	134	$[M€]$
Ušetřené finanční prostředky/investiční náklady	I_P	19,5	$[\%]$

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo posoudit možnosti redukce emisí oxidu uhličitého v keramickém výrobním závodě v Chlumčanech, resp. zhodnotit, zda lze pro podmínky daného provozu využít mikrořasové bioreaktory.

Za tímto účelem byla v teoretické části práce provedena rešerše současného stavu poznání v oblasti zachycování, ukládání a využití oxidu uhličitého. Následně práce představila potenciál mikrořas, jejich požadavky pro růst a typy bioreaktorů, které se používají k jejich kultivaci v průmyslovém měřítku. Nakonec byly porovnány výhody a nevýhody jednotlivých typů bioreaktorů a čtenáři byla nastíněna problematika kultivace mikrořas z ekonomického hlediska. Byly analyzovány profitabilní scénáře kultivace a nákladovost provozu mikrořasových bioreaktorů. Teoretická část diplomové práce tak připravila podklady pro část praktickou, kde byl řešen hlavní cíl práce.

Závod společnosti *LASSELSBERGER, s.r.o.* se zabývá výrobou keramických obkladů a dlažeb. Během energeticky náročného výrobního procesu vzniká velké množství emisí oxidů uhličitého, za který společnost zaplatí ročně asi 1,74 M€, a to ve formě emisních povolenek.

Prvním krokem praktické části byl rozbor výrobního procesu a zdroje oxidu uhličitého. Emise ve výrobním závodě v Chlumčanech vznikají spalováním zemního plynu v rozprachové sušárně. Analogický proces již byl studován a lze tedy uvažovat využití emisí Chlumčanského závodu pro produkci vysoce kvalitní mikrořasové biomasy (tj. pro potravinářský, kosmetický či farmaceutický průmysl). Jako vhodným rodem mikrořas se pro tyto účely ukazuje rod *Chlorella*. Dále bylo zjištěno, že koncentrace jednotlivých složek emisí odpovídá požadavkům buněk mikrořas. Teplota je jediným parametrem proudu plynu, který nevyhovuje požadavkům buněk, je tedy potřeba ho upravit. Toho lze dosáhnout integrací vhodného výměníku tepla. Následně byl na základě syntézy rešeršní části diplomové práce s požadavky vybraného provozu vybrán vhodný typ bioreaktoru, a to trubicový bioreaktor s horizontálním vícevrstevným uspořádáním trubic. Pro tento typ bioreaktoru byly provedeny výpočty základních parametrů kultivačního systému, přičemž byly uvažovány dvě varianty řešení.

První z nich počítá s výstavbou kultivačního systému o velikosti srovnatelné s aktuálně největšími provozovanými zařízeními na světě, druhá hypotetická varianta uvažuje kultivační systém dostatečně velký na to, aby spotřeboval veškerý oxid uhličitý produkovaný výrobním procesem. Výsledky první varianty ukazují, že i kdyby byl postaven jeden z největších kultivačních systémů využívající uzavřené bioreaktory na světě (objem 2000 m³), mikrořasy by spotřebovaly pouze 3,75 % produkovaných emisí. Z tohoto pohledu se využití mikrořasových bioreaktorů pro účely redukce emisí oxidu uhličitého v současné době jednoznačně ukazuje jako neefektivní.

Druhá z variant uvažuje s výstavbou kultivačního systému, který by byl schopen spotřebovat veškeré produkované emise. I když se jeho velikost může zdát až absurdní (53286 m³ kultivačního média, 118,94 ha zastavěné plochy) a o výstavbě bioreaktoru takových rozměrů můžeme uvažovat pouze na teoretické úrovni, lze i z této varianty vyvodit dílčí závěry. Výsledky ukazují, že při uvažované životnosti 15 let pokryjí ušetřené finanční prostředky za emisní povolenky přibližně 19,5 % odhadované počáteční investice.

Z obou variant řešení vyplývá, že mikrořasové bioreaktory nelze v současné době využít jako samostatnou technologii pro redukci emisí oxidu uhličitého. Je potřeba na ně nahlížet jako na technologii, jejímž primárním účelem je produkce biomasy, a využití emisního oxidu uhličitého jako zdroje uhlíku pro buňky mikrořas brát spíše jako doplněk, který sníží nákladovost celého procesu a zvýší ziskovost.

V některých případech, kdy je kultivační systém dostatečně velký a je produkována biomasa o vysoké kvalitě, se tato technologie ukazuje jako lukrativní. Díky intenzivní výzkumné činnosti v této oblasti se do konce desetiletí očekává značné snížení provozních nákladů, takže se technologie mikrořasových bioreaktorů může stát dostupnější a profitabilní i v sektorech, ve kterých má v současné době ztrátový charakter (produkce biopaliv, krmiv a chemikálií). Mnoho zásadních otázek týkajících se této technologie však stále zůstává nezodpovězených.

Technologie mikrořasových bioreaktorů je bezpochyby rozsáhlým multidisciplinárním tématem. Diplomová práce nastínila aktuální stav a budoucí směřování této technologie. Poskytuje základ pro budoucí výzkumnou činnost jak rešeršního, tak experimentálního rázu, a to v oblastech algologie (výběr vhodného druhu mikrořas, stanovení optimálních podmínek kultivace), procesního inženýrství a automatizace (dosažení a regulace optimálních kultivačních podmínek, energetické a materiálové bilance bioreaktoru jako celku, zefektivňování a automatizace celého procesu) a ekonomie (nalezení optimální velikosti bioreaktoru z hlediska ziskovosti, hodnocení profitability kultivačního systému, stanovení ziskových kultivačních strategií). Spolupráce výzkumných týmů z různých vědních oblastí tedy bude pro další vývoj mikrořasových bioreaktorů nezbytná.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEREITER, Bernhard, Sarah EGGLESTON, Jochen SCHMITT, Christoph NEHRBASS-AHLES, Thomas STOCKER, Hubertus FISCHER, Sepp KIPFSTUHL a Jerome CHAPPELLAZ. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present. *Geophysical Research Letters* [online]. 2015, **42**(2), 542-549 [cit. 2021-08-08]. ISSN 00948276. Dostupné z: doi:10.1002/2014GL061957
- [2] Atmospheric CO₂ concentration. In: *Our World in Data* [online]. England and Wales: Global Change Data Lab [cit. 2021-08-19]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/co2-concentration-long-term>
- [3] STOCKER, T.F., D. QIN, M. TIGNOR, J. S.K. ALLEN, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX a P.M. MIDGLEY (EDS.). *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013 [cit. 2021-08-19]. ISBN 978-1-107-05799-1. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- [4] BRADFORD, Alina a Stephanie PAPPAS. Effects of Global Warming. In: *LIVE SCIENCE* [online]. New York: Future US, Inc., 2017 [cit. 2021-08-19]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/37057-global-warming-effects.html>
- [5] MORICE, Colin, John KENNEDY, Nick RAYNER a Phil JONES. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2012, **117**(8), - [cit. 2021-08-19]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/2011JD017187
- [6] Average temperature anomaly, Global. In: *Our World in Data* [online]. England and Wales: Global Change Data Lab [cit. 2021-08-18]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly?country=~Global>
- [7] Climate and Frozen Ground. In: *National Snow and Ice Data Center* [online]. National Snow and Ice Data Center, 2021 [cit. 2021-08-19]. Dostupné z: <https://nsidc.org/cryosphere/frozenground/climate.html>
- [8] Lidé a oceán. In: *United Nations Information Centre Prague* [online]. Praha: Informační centrum OSN [cit. 2021-08-19]. Dostupné z: <https://www.osn.cz/lide-a-ocean/>

- [9] OSKIN, Becky. Global Warming Will Bring More US Lightning Strikes. In: *LIVE SCIENCE* [online]. New York: Future US, Inc., 2014 [cit. 2021-08-19]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/48751-global-warming-more-us-lightning.html>
- [10] RITCHIE, Hannah. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?. In: *Our World in Data* [online]. 2020 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector#direct-industrial-processes-5-2>
- [11] Pařížská dohoda. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2020 [cit. 2021-08-25]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda
- [12] Pařížská dohoda. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/parizska_dohoda/\\$FILE/OEOK-Cesky_preklad_dohody-20160419.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/parizska_dohoda/$FILE/OEOK-Cesky_preklad_dohody-20160419.pdf)
- [13] SDĚLENÍ KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU, EVROPSKÉ RADĚ, RADĚ, EVROPSKÉMU HOSPODÁŘSKÉMU A SOCIÁLNÍMU VÝBORU A VÝBORU REGIONŮ: Zelená dohoda pro Evropu. In: *EUR-Lex Přístup k Právu Evropské unie* [online]. Brusel: Evropská komise, 2019, s. 25 [cit. 2021-08-25]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0010.02/DOC_1&format=PDF
- [14] Capture. In: *GLOBAL CCS INSTITUTE* [online]. Global CSS Institute, 2018 [cit. 2021-09-05]. Dostupné z: <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/capture/>
- [15] METZ, Bert, Ogunlade DAVIDSON, Heleen CONINCK, Manuela LOOS a Leo MEYER (EDS.). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage* [online]. The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge, ENGLAND: Cambridge University Press, 2005 [cit. 2021-09-05]. ISBN 13 978-0-521-68551-1. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- [16] MARKEWITZ, Peter, Wilhelm KUCKSHINRICHS, Walter LEITNER, Jochen LINSEN, Petra ZAPP, Richard BONGARTZ, Andrea SCHREIBER a Thomas MÜLLER. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. *Energy & Environmental Science* [online]. 2012, 5(6) [cit. 2021-09-05]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/c2ee03403d
- [17] RAHMAN, Farahiyah, Md AZIZ, R. SAIDUR, Wan BAKAR, M.R HAININ, Ramadhansyah PUTRAJAYA a Norhidayah HASSAN. Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 71, 112-126 [cit. 2021-09-05]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.01.011

- [18] BECHNÍK, Bronislav. CCS = Separace CO₂ a jeho ukládání v geologických formacích. In: *Tzbinfo* [online]. 2008 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/4986-ccs-separace-co2-a-jeho-ukladani-v-geologickych-formacich>
- [19] CUÉLLAR-FRANCA, Rosa a Adisa AZAPAGIC. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization* [online]. 2015, **9**, 82-102 [cit. 2021-09-16]. ISSN 22129820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001
- [20] PENNLINE, Henry, David LUEBKE, Kenneth JONES, Christina MYERS, Badie MORSI, Yannick HEINTZ a Jeffery ILCONICH. Progress in carbon dioxide capture and separation research for gasification-based power generation point sources. *Fuel Processing Technology* [online]. 2008, **89**(9), 897-907 [cit. 2021-09-05]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2008.02.002
- [21] GIBBINS, Jon a Hannah CHALMERS. Carbon capture and storage. *Energy Policy* [online]. 2008, **36**(12), 4317-4322 [cit. 2021-09-05]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2008.09.058
- [22] About CCUS. In: *IEA - International Energy Agency* [online]. IEA - International Energy Agency, 2021 [cit. 2021-09-06]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- [23] SONG, Chunfeng, Qingling LIU, Shuai DENG, Hailong LI a Yutaka KITAMURA. Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **101**, 265-278 [cit. 2022-04-02]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.11.018
- [24] MILTNER, Martin, Alexander MAKARUK a Michael HARASEK. Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **161**, 1329-1337 [cit. 2022-04-02]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.045
- [25] PALATÝ, Zdeněk a Bohumil BERNAUER. *Membránové procesy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [26] ŠÍPEK, Milan, ed. *Membránové dělení plynů a par*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014. ISBN 978-80-7080-864-1.
- [27] KOLÁČNÝ, Josef. *Membránová separace CO₂ z emisních plynů* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89608/F2-DP-2020-Kolacny-Josef-DP%20Kolacny%20Josef_final.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Krátký Lukáš.

- [28] WITKOWSKI, Andrzej, Mirosław MAJKUT a Sebastian RULIK. Analysis of pipeline transportation systems for carbon dioxide sequestration. *Archives of Thermodynamics* [online]. 2014, **35**(1), 117-140 [cit. 2021-09-06]. ISSN 2083-6023. Dostupné z: doi:10.2478/aoter-2014-0008
- [29] Storage - Core sample. In: *GLOBAL CCS INSTITUTE* [online]. Global CCS Institute, 2018 [cit. 2021-09-07]. Dostupné z: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/11/10_CO2-Storage-geological-1.jpg
- [30] Storage - Overview. In: *GLOBAL CCS INSTITUTE* [online]. Global CSS Institute, 2018 [cit. 2021-09-07]. Dostupné z: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/11/9_The-CO2-Storage-overview-1.jpg
- [31] Carbon Capture. In: *CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS* [online]. [cit. 2021-09-07]. Dostupné z: <https://www.c2es.org/content/carbon-capture/>
- [32] Storage. In: *GLOBAL CCS INSTITUTE* [online]. Global CSS Institute, 2018 [cit. 2021-09-07]. Dostupné z: <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/storage/>
- [33] OSPAR Decision 2007/01 to Prohibit the Storage of Carbon Dioxide Streams in the Water Column or on the Sea-bed. In: *OSPAR COMMISSION* [online]. Londýn: OSPAR Commission, 2007 [cit. 2021-09-07]. Dostupné z: <https://www.ospar.org/documents?v=32641>
- [34] BUI, Mai, Claire ADJIMAN, André BARDOW et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science* [online]. 2018, **11**(5), 1062-1176 [cit. 2021-09-17]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/C7EE02342A
- [35] YU, Kai Man Kerry, Igor CURCIC, Joseph GABRIEL a Shik Chi Edman TSANG. Recent Advances in CO₂ Capture and Utilization. *ChemSusChem* [online]. 2008, **1**(11), 893-899 [cit. 2021-09-10]. ISSN 18645631. Dostupné z: doi:10.1002/cssc.200800169
- [36] BAENA-MORENO, Francisco, Mónica RODRÍGUEZ-GALÁN, Fernando VEGA, Bernabé ALONSO-FARIÑAS, Luis VILCHES ARENAS a Benito NAVARRETE. Carbon capture and utilization technologies: a literature review and recent advances. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* [online]. 2019, **41**(12), 1403-1433 [cit. 2021-09-16]. ISSN 1556-7036. Dostupné z: doi:10.1080/15567036.2018.1548518
- [37] KHAN, Muhammad, Jin SHIN a Jong KIM. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories* [online]. 2018, **17**(1) [cit. 2021-11-17]. ISSN 1475-2859. Dostupné z: doi:10.1186/s12934-018-0879-x

- [38] CHISTI, Yusuf. Society and Microalgae. *Microalgae in Health and Disease Prevention* [online]. Elsevier, 2018, s. 11-21 [cit. 2021-12-09]. ISBN 9780128114056. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811405-6.00002-5
- [39] RICHMOND, Amos, ed. *Handbook of Microalgal Culture* [online]. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2003 [cit. 2022-04-08]. ISBN 9780470995280. Dostupné z: doi:10.1002/9780470995280
- [40] GOLZARY, A., S. DALIRY, A. HALLAJISANI, J. MOHAMMADI ROSHANDEH a H. NOURI. Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth. *Global J. Environ. Sci. Manage* [online]. 2017, **32**, 217-230 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: doi:10.22034/gjesm.2017.03.02.010
- [41] MORALES, Marcia, Juan CABELLO a Sergio REVAH. Gas Balances and Growth in Algal Cultures. PROKOP, Aleš, Rakesh K. BAJPAI a Mark E. ZAPPI, ed., Aleš PROKOP, Rakesh BAJPAI, Mark ZAPPI. *Algal Biorefineries* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 263-314 [cit. 2022-03-07]. ISBN 978-3-319-20199-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-20200-6_8
- [42] HONG, Ji, Oh KIM, Seung-Woo JO, Hyeon KIM, Mi JEONG, Kyung PARK, Kyoung LEE a Ho-Sung YOON. Biochemical Composition of a Korean Domestic Microalga *Chlorella vulgaris* KNUA027. *Microbiology and Biotechnology Letters* [online]. 2016, **44**(3), 400-407 [cit. 2022-03-07]. ISSN 1598-642X. Dostupné z: doi:10.4014/mbl.1512.12008
- [43] RAMANNA, Luveshan, Abhishek GULDHE, Ismail RAWAT a Faizal BUX. The optimization of biomass and lipid yields of *Chlorella sorokiniana* when using wastewater supplemented with different nitrogen sources. *Bioresource Technology* [online]. 2014, **168**, 127-135 [cit. 2022-03-07]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2014.03.064
- [44] KIM, Dae, Changsu LEE, Seung-Moon PARK a Yoon-E CHOI. Manipulation of light wavelength at appropriate growth stage to enhance biomass productivity and fatty acid methyl ester yield using *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology* [online]. 2014, **159**, 240-248 [cit. 2022-03-10]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2014.02.078
- [45] HLADKÝ, Luděk. Osvětlení z pohledu rostlin. *SVĚTLO časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2010, **2010**(4), 42-44 [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41827.pdf>

- [46] *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products* [online]. 1st Edition. 125 London Wall, London EC2Y 5AS, United Kingdom 525 B Street, Suite 1650, San Diego, CA 92101, United States 50 Hampshire Street, 5th Floor, Cambridge, MA 02139, United States The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, United Kingdom: Academic Press, 2020 [cit. 2021-11-17]. ISBN 978-0-12-818536-0. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-microalgae-based-processes-and-products/jacob-lopes/978-0-12-818536-0>
- [47] Einstein (unit). In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_\(unit\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_(unit))
- [48] Conversion - PPFD to Lux. In: *Apogee Instruments* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/>
- [49] COSTACHE, T., F. ACIÉN FERNÁNDEZ, M. MORALES, J. FERNÁNDEZ-SEVILLA, I. STAMATIN a E. MOLINA. Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online]. 2013, **97**(17), 7627-7637 [cit. 2021-12-10]. ISSN 0175-7598. Dostupné z: doi:10.1007/s00253-013-5035-2
- [50] IPPOLITI, Davide, Cintia GÓMEZ, María DEL MAR MORALES-AMARAL, Rossella PISTOCCHI, J.M. FERNÁNDEZ-SEVILLA a F. ACIÉN. Modeling of photosynthesis and respiration rate for *Isochrysis galbana* (T-Iso) and its influence on the production of this strain. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **203**, 71-79 [cit. 2021-12-03]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2015.12.050
- [51] RICHMOND, Amos. Biological Principles of Mass Cultivation of Photoautotrophic Microalgae. RICHMOND, Amos a Qiang HU, ed., Amos RICHMOND, Qiang HU. *Handbook of Microalgal Culture* [online]. Oxford, UK: John Wiley & Sons, 2013, s. 169-204 [cit. 2022-03-10]. ISBN 9781118567166. Dostupné z: doi:10.1002/9781118567166.ch11
- [52] GRIMAUD, Ghjuvan, Francis MAIRET a Olivier BERNARD. Modelling thermal adaptation in microalgae: an adaptive dynamics point of view. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2014, **47**(3), 4376-4381 [cit. 2021-12-10]. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.3182/20140824-6-ZA-1003.00982
- [53] NORSEKER, Niels-Henrik, Maria BARBOSA, Marian VERMUË a René WIJFFELS. Microalgal production — A close look at the economics. *Biotechnology Advances* [online]. 2011, **29**(1), 24-27 [cit. 2022-03-20]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2010.08.005

- [54] VONSHAK, A. a R. GUY. Photoadaptation, photoinhibition and productivity in the blue-green alga, *Spirulina platensis* grown outdoors. *Plant, Cell and Environment* [online]. 1992, **15**(5), 613-616 [cit. 2021-11-17]. ISSN 0140-7791. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-3040.1992.tb01496.x
- [55] CHIARAMONTI, David, Matteo PRUSSI, David CASINI, Mario TREDICI, Liliana RODOLFI, Niccolò BASSI, Graziella ZITTELLI a Paolo BONDIOLI. Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. *Applied Energy* [online]. 2013, **102**, 101-111 [cit. 2021-11-17]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.07.040
- [56] JACKSON, Lisa. Pond-cultivated algae: Slimy superhero for aquafeeds?. In: *Global Aquaculture Alliance* [online]. 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/pond-cultivated-algae-slimy-superhero-aquafeeds/>
- [57] CHEN, Zhijie, Xinru ZHANG, Zeyi JIANG, Xuehui CHEN, Hongzhou HE a Xinxin ZHANG. Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **219**, 387-391 [cit. 2021-11-17]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2016.07.108
- [58] ŠETLÍK, Ivan, Vladimír ŠUST a Ivan MÁLEK. Dual purpose open circulation units for large scale culture of algae in temperate zones. I. Basic design considerations and scheme of a pilot plant. *Algological Studies/Archiv für Hydrobiologie, Supplement Volumes* [online]. 1970, 111-164 [cit. 2022-04-11].
- [59] Technological platforms. In: *A4f algae for future* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://a4f.pt/en/tecnologic-plataforms>
- [60] MASOJÍDEK, Jiří a Ondřej PRÁŠIL. The development of microalgal biotechnology in the Czech Republic. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* [online]. 2010, **37**(12), 1307-1317 [cit. 2021-12-03]. ISSN 1367-5435. Dostupné z: doi:10.1007/s10295-010-0802-x
- [61] BARCELÓ-VILLALOBOS, M., C. SERRANO, A. ZURANO, L. GARCÍA, S. MALDONADO, J. PEÑA a F.G. FERNÁNDEZ. Variations of culture parameters in a pilot-scale thin-layer reactor and their influence on the performance of *Scenedesmus almeriensis* culture. *Bioresource Technology Reports* [online]. 2019, **6**, 190-197 [cit. 2021-12-03]. ISSN 2589014X. Dostupné z: doi:10.1016/j.biteb.2019.03.007

- [62] TORZILLO, Giuseppe a Graziella CHINI ZITTELLI. Tubular Photobioreactors. PROKOP, Aleš, Rakesh K. BAJPAI a Mark E. ZAPPI, ed., Aleš PROKOP, Rakesh BAJPAI, Mark ZAPPI. *Algal Biorefineries* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 187-212 [cit. 2021-12-03]. ISBN 978-3-319-20199-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-20200-6_5
- [63] ACIÉN, F.G., J.M. FERNÁNDEZ, J.J. MAGÁN a E. MOLINA. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances* [online]. 2012, **30**(6), 1344-1353 [cit. 2021-12-03]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2012.02.005
- [64] TREDICI, M.R., N. BASSI, M. PRUSSI, N. BIONDI, L. RODOLFI, G. CHINI ZITTELLI a G. SAMPIETRO. Energy balance of algal biomass production in a 1-ha “Green Wall Panel” plant: How to produce algal biomass in a closed reactor achieving a high Net Energy Ratio. *Applied Energy* [online]. 2015, **154**, 1103-1111 [cit. 2022-04-12]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.086
- [65] RODOLFI, Liliana, Graziella CHINI ZITTELLI, Niccolò BASSI, Giulia PADOVANI, Natascia BIONDI, Gimena BONINI a Mario TREDICI. Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering* [online]. 2009, **102**(1), 100-112 [cit. 2022-04-12]. ISSN 00063592. Dostupné z: doi:10.1002/bit.22033
- [66] FERNÁNDEZ, F., Alberto REIS, René WIJFFELS, Maria BARBOSA, Vitor VERDELHO a Bernardo LLAMAS. The role of microalgae in the bioeconomy. *New Biotechnology* [online]. 2021, **61**, 99-107 [cit. 2022-03-05]. ISSN 18716784. Dostupné z: doi:10.1016/j.nbt.2020.11.011
- [67] RUIZ, J., G. OLIVIERI, J. DE VREE et al. Towards industrial products from microalgae. *Energy & Environmental Science*. Royal Society of Chemistry, 2016, (910), 3036-3043. ISSN 17545692. Dostupné z: doi:10.1039/c6ee01493c
- [68] CUELLAR-BERMUDEZ, Sara, Iris AGUILAR-HERNANDEZ, Diana CARDENAS-CHAVEZ, Nancy ORNELAS-SOTO, Miguel ROMERO-OGAWA a Roberto PARRA-SALDIVAR. Extraction and purification of high-value metabolites from microalgae: essential lipids, astaxanthin and phycobiliproteins. *Microbial Biotechnology* [online]. 2015, **8**(2), 190-209 [cit. 2022-04-12]. ISSN 1751-7915. Dostupné z: doi:10.1111/1751-7915.12167
- [69] SLOCOMBE, Stephen a John BENEMANN. *Microalgal Production for Biomass and High-Value Products* [online]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016 [cit. 2021-12-22]. ISBN 978-1-4822-1970-8. Dostupné z: doi:10.1201/b19464

- [70] WOBBE, Lutz a Claire REMACLE. Improving the sunlight-to-biomass conversion efficiency in microalgal biofactories. *Journal of Biotechnology* [online]. 2015, **201**, 28-42 [cit. 2021-12-22]. ISSN 01681656. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbiotec.2014.08.021
- [71] Představení společnosti. In: *RAKO Brand of lasselsbergergroup* [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.rako.cz/cs/o-nas/predstaveni-spolecnosti/soucasnost-1>
- [72] JAK SE RODÍ KERAMIKA - 1.DÍL. In: *OBKLADY.CZ* [online]. 2010 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <http://www.obklady.cz/top10/10-JAK-SE-RODI-KERAMIKA/33-JAK-SE-RODI-KERAMIKA---1DIL>
- [73] JAK SE RODÍ KERAMIKA- 2.DÍL. In: *OBKLADY.CZ* [online]. 2010 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <http://www.obklady.cz/top10/10-JAK-SE-RODI-KERAMIKA/34-JAK-SE-RODI-KERAMIKA--2DIL>
- [74] ATM Series. In: *SACMI* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: [https://sacmi.com/SacmiCorporate/media/ceramics/Catalogues/ATM-Sacmi-\(EN-IT-ES\).pdf](https://sacmi.com/SacmiCorporate/media/ceramics/Catalogues/ATM-Sacmi-(EN-IT-ES).pdf)
- [75] EU Carbon Permits. In: *TRADING ECONOMICS* [online]. 2022 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- [76] KAŠTÁNEK, František, Stanislav ŠABATA, Olga ŠOLCOVÁ, Yvette MALÉTEROVÁ, Petr KAŠTÁNEK, Irena BRÁNYIKOVÁ, Karel KUTHAN a Vilém ZACHLEDER. In-field experimental verification of cultivation of microalgae *Chlorella* sp. using the flue gas from a cogeneration unit as a source of carbon dioxide. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* [online]. 2010, **28**(11), 961-966 [cit. 2022-03-05]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X10375866
- [77] KOTRBÁČEK, Václav, Jaroslav DOUBEK a Jiří DOUCHA. The chlorococcalean alga *Chlorella* in animal nutrition: a review. *Journal of Applied Phycology* [online]. 2015, **27**(6), 2173-2180 [cit. 2022-03-06]. ISSN 0921-8971. Dostupné z: doi:10.1007/s10811-014-0516-y
- [78] YAMAMOTO, Maki, Mariko FUJISHITA, Aiko HIRATA a Shigeyuki KAWANO. Regeneration and maturation of daughter cell walls in the autospore-forming green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae). *Journal of Plant Research* [online]. 2004, **117**(4) [cit. 2022-03-06]. ISSN 0918-9440. Dostupné z: doi:10.1007/s10265-004-0154-6
- [79] PANAHI, Yunes, Ahmad YARI KHOSROUSHAHI, Amirhossein SAHEBKAR a Hamid HEIDARI. Impact of Cultivation Condition and Media Content on *Chlorella vulgaris* Composition. *Advanced Pharmaceutical Bulletin* [online]. 2019, **9**(2), 182-194 [cit. 2022-03-06]. ISSN 2228-5881. Dostupné z: doi:10.15171/apb.2019.022

- [80] What Is Chlorella And What Is It Good For?. In: *HEALTH IS WEALTH* [online]. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.sunchlorellausa.com/blog/healthy-tips-4/what-is-chlorella-and-what-is-it-good-for-197>
- [81] KUMAR, Kanhaiya, Debopam BANERJEE a Debabrata DAS. Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by Chlorella sorokiniana. *Bioresource Technology* [online]. 2014, **152**, 225-233 [cit. 2022-03-11]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2013.10.098
- [82] YANG, Suling, Jun WANG, Wei CONG, Zhaoling CAI a Fan OUYANG. Effects of bisulfite and sulfite on the microalga Botryococcus braunii. *Enzyme and Microbial Technology* [online]. 2004, **35**(1), 46-50 [cit. 2022-03-11]. ISSN 01410229. Dostupné z: doi:10.1016/j.enzmictec.2004.03.014
- [83] CHIU, Sheng-Yi, Chien-Ya KAO, Tzu-Ting HUANG, Chia-Jung LIN, Seow-Chin ONG, Chun-Da CHEN, Jo-Shu CHANG a Chih-Sheng LIN. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using Chlorella sp. cultures. *Bioresource Technology* [online]. 2011, **102**(19), 9135-9142 [cit. 2022-03-11]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2011.06.091
- [84] Stanovení vodní páry v odpadních plynech proudících potrubím. In: *DOCPLAYER* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, 2007 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16579338-Stanoveni-vodni-pary-v-odpadnich-plynech-proudicich-potrubim.html>
- [85] *Konstanty Antoineovy rovnice* [online]. In: . [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/tab/antoine.html>
- [86] ALGAFARM SECIL / ALLMICROALGAE. In: *A4f algae for future* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://a4f.pt/en/projects/algafarm>
- [87] FERNÁNDEZ, I., J. GUZMÁN, M. BERENGUEL a F. ACIÉN. Dynamic Modeling of Microalgal Production in Photobioreactors. TRIPATHI, Bhumi Nath a Dhananjay KUMAR, ed., Bhumi TRIPATHI, Dhananjay KUMAR. *Prospects and Challenges in Algal Biotechnology* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2017, s. 49-87 [cit. 2022-04-15]. ISBN 978-981-10-1949-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-1950-0_2
- [88] Sekvenování DNA. In: *WIKIPEDIE* [online]. 2021 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sekvenov%C3%A1n%C3%AD_DNA

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Odhadovaný vývoj koncentrace CO ₂ v atmosféře [1], [2]	14
Obr. 2 Roční globální difference průměrné teploty (vztaheno k průměrné teplotě z let 1961-1990) [5], [6]	15
Obr. 3 Globální zdroje emisí CO ₂ [10].....	17
Obr. 4 Cíle a jednotlivé prvky Zelené dohody pro Evropu [13]	18
Obr. 5 Schematické znázornění technologie zachycení CO ₂ po procesu konverze [18].....	21
Obr. 6 Schematické znázornění technologie zachycení CO ₂ při spalování v kyslíkové atmosféře [18]	22
Obr. 7 Schematické znázornění technologie zachycení CO ₂ před procesem spalování [18]..	23
Obr. 8 Porovnání oblastí použití membránových technologií s aminovou absorpcí [26]	24
Obr. 9 Fázový diagram oxidu uhličitého [28]	25
Obr. 10 Cena přepravy CO ₂ v závislosti na dopravní vzdálenosti [15].....	26
Obr. 11 Schéma vhodného geologického úložiště CO ₂ [29]	27
Obr. 12 Možnosti geologického uložení CO ₂ [30].....	28
Obr. 13 Způsoby uložení oxidu uhličitého do oceánu [15]	30
Obr. 14 Životní cyklus oxidu uhličitého při využití technologie CCU [34]	31
Obr. 15 Možnosti využití mikrořasové biomasy [37].....	33
Obr. 16 Závislost vlnové délky osvětlení na velikost buněk mikrořas druhu <i>Chlorella vulgaris</i> [40]	36
Obr. 17 Vyprodukované množství biomasy <i>Chlorella vulgaris</i> při různých režimech osvětlení [44]	36
Obr. 18 Závislost rychlosti fotosyntézy buněk mikrořas na intenzitě záření [46]	37
Obr. 19 Závislost rychlosti růstu „teplomilného“ druhu mikrořasy na teplotě [46].....	38
Obr. 20 Závislost rychlosti růstu mikrořas na hodnotě pH [46].....	39
Obr. 21 Závislost rychlosti růstu mikrořas na koncentraci rozpuštěného kyslíku [46]	39
Obr. 22 Letecký pohled na mikrořasový výrobní závod Qualitas Health v Novém Mexiku v USA [56]	41
Obr. 23 Světelné podmínky při kultivaci mikrořas v traťovém systému [57].....	41
Obr. 24 Plošinový (kaskádový) bioreaktor [59]	42
Obr. 25 Dělení trubicových bioreaktorů s horizontálním uspořádáním trubic a) Jednovrstvé uspořádání („unilayer horizontal tubular bioreactor“) b) Vícevrstvé uspořádání („multilayer horizontal tubular bioreactor“) [59].....	43
Obr. 26 Deskový bioreaktor [46]	44

Obr. 27 Předpokládané náklady na produkci mikrořasové biomasy (zahrnuje kultivaci i sklizeň) [67]	46
Obr. 28 Předpokládané náklady na biorařinaci mikrořasové biomasy [67]	47
Obr. 29 Tržní hodnota mikrořasové biomasy a podíl jejich složek na celkové ceně [67].....	48
Obr. 30 Vývojové směry v technologii zachycení a využití CO ₂ pomocí mikrořasových bioreaktorů [46]	49
Obr. 31 Výrobní závody společnosti LASSELSBERGER, s.r.o.....	51
Obr. 32 Proces výroby keramických obkladů/dlažeb – výroba granulátu	53
Obr. 33 Proces výroby keramických obkladů/dlažeb	53
Obr. 34 Schéma rozprachové sušárny [74]	54
Obr. 35 Počítačový model rozprachové sušárny [74].....	55
Obr. 36 Vývoj ceny emisních povolenek platný k datu 23.4.2022 [75]	56
Obr. 37 Postup integrace mikrořasového bioreaktoru do vybraného provozu	58
Obr. 38 Ilustrativní snímek buněk mikrořas rodu Chlorella [80]	60
Obr. 39 Soubor trubicových bioreaktorů v Portugalském Pataias o celkovém objemu 1300 m ³ [86]	62
Obr. 40 Schéma výměny plynů v trubicovém bioreaktoru [87]	63

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní procesní charakteristiky jednotlivých separačních mechanismů [23], [24], [26], [27]	24
Tab. 2 Odhadovaná kapacita geologických úložišť CO ₂ [16].....	28
Tab. 3 Podíl složky CO ₂ uložené v oceánu (vzhledem k celku) pro 100 let nepřetržitého vstřikování (počínaje rokem 2000) ve třech různých hloubkách (založeno na datech ze sedmi modelových studií) [15].....	29
Tab. 4 Složení kultivačního média BG-11 [42].....	35
Tab. 5 Srovnání charakteristických parametrů jednotlivých typů mikrořasových bioreaktorů [46], [53].....	45
Tab. 6 Profitabilita produkce mikrořasové biomasy ve vybraných průmyslových odvětvích [67]	48
Tab. 7 Výsledky kontinuálního měření plynných emisí z rozprachové sušárny [Příloha č. 1].....	56
Tab. 8 Porovnání koncentrace SO ₂ a NO ₂ v přiváděném proudu s maximálními přípustnými hodnotami [83]	60
Tab. 9 Základní parametry kultivačního systému – varianta 1	65
Tab. 10 Základní parametry kultivačního systému – varianta 2	68

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Protokol_o_autorizovaném_měření_emisí_LASSELSBERGER.pdf