



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VYUŽITÍ ŘAS PRO PRODUKCI BIOMASY A
BIOPRODUKTŮ**

USE OF ALGAE FOR PRODUCTION OF BIOMASS AND BIOPRODUCTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Slonek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Brummer, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Jaroslav Slonek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Brummer, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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 bakalářské práce:

Využití řas pro produkci biomasy a bioproduktů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řasy je možné využít za účelem akumulace a následného získání škrobu a lipidů nebo dalších bioproduktů, které je možné využít dále v různých odvětvích. Využití meziproduktů pro produkci biopaliv nové generace je příkladem takového využití. Okrem samotné biomasy je možné získat další i mnohem vzácnější produkty, jako antioxidanty, algináty, polysacharidy, karotenoidy apod. použitelné např. v kosmetice. Výhodou by bylo pro kultivaci využít odpadních produktů, např. odpadní vodu. Kultivace řas má specifické nároky na podmínky kultivace a konstrukci reaktorů.

Daná bakalářská práce by měla prozkoumat aktuální stav v poznání možností využití řas za účelem zisku zajímavých a hodnotných produktů, podmínky pro kultivace, možnost využití odpadních produktů pro kultivaci a použitelné konstrukční řešení pro kultivační reaktory.

Cíle bakalářské práce:

- Stručný úvod do problematiky využití řas pro produkci biomasy a bioproduktů.
- Rešerše využití produktů kultivace řas v různých odvětvích.
- Prozkoumání možnosti využít pro kultivaci odpadní produkty.
- Shrnutí technologických podmínek vhodných pro kultivaci řas.
- Použitelné konstrukční řešení pro kultivační reaktory.
- Zhodnocení rešeršně získaných poznatků a dat, diskuze obsahující nejslibnější ze směrů produkce biomasy a bioproduktů z řas.

Seznam doporučené literatury:

SINGH, R.N. a Shaishav SHARMA. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012, 16(4), 2347-2353. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.026. ISSN 13640321.

SINGH, S.P. a Priyanka SINGH. Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, 50, 431-444. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.024. ISSN 13640321.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce je zaměřena na seznámení se s využitím řas k produkci biomasy a bioproduktů.

Úvodní část práce je věnována taxonomickému rozdělení řas a základnímu shrnutí charakteristik jednotlivých skupin řas. Další část práce je věnována bioproduktům, které jsou získávány kultivací řas a jsou rozebrány možnosti dalšího zpracování těchto bioproduktů včetně jejich využití pro energetické účely. U kultivací je důraz kladen na moderní směry v této oblasti, tj. na možnost použití odpadních produktů v kultivačním procesu.

V další části práce jsou rozebrány technologické parametry kultivace, jejich vlivy na růst a složení biomasy a produkci žádaných produktů. V další kapitole jsou shrnuty používané typy kultivačních bioreaktorů, v nichž dochází v kontrolovaném prostředí k růstu biomasy. Poznatky získané a shromážděné při tvorbě práce jsou dále diskutovány a shrnuty v závěru práce.

ABSTRACT

Submitted bachelor thesis is focused on description of use of algae for biomass and bioproducts production.

The first part of the thesis is devoted to the taxonomic classification of algae and a basic summary of the characteristics of the different algal groups. The next part is aimed at bioproducts, which are obtained by algae cultivation and possibilities of further processing for energy purposes are also described. As for the cultivation, the emphasis is on modern methods in this area, i.e. on the possibility of using waste products in the culture process.

In the next part, technological parameters of cultivation are discussed, for instance effects of technological parameters on growth and composition of biomass and production of desired products. The next chapter summarizes types of used culture bioreactors in which the growth of biomass occurs in a controlled environment. The information obtained and collected in the thesis is further discussed and summarized in the conclusion.

KLÍČOVÁ SLOVA

Řasy, bioreaktor, biomasa, bioprodukty, kultivace

KEYWORDS

Algae, bioreactor, biomass, bioproducts, cultivation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLONEK, Jaroslav. *Využití řas na produkci biomasy a bioproduktů*. Brno, 2019, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Vladimír Brummer, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Využití řas pro produkci biomasy a bioproduktů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vladimíra Brummera, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 24.5.2019

.....
Jaroslav Slonek

PODĚKOVANÍ

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu práce Ing. Vladimíru Brummerovi, Ph.D. za jeho ochotu, připomínky a za čas věnovaný bakalářské práci. Rád bych poděkoval také rodině a přítelkyni za jejich podporu během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	DEFINICE A VYMEZENÍ POJMŮ.....	14
2.1	ŘASY.....	14
2.2	BIOMASA	14
2.3	BIOPRODUKTY	14
2.4	BIOREAKTORY	14
2.5	KULTIVACE.....	14
3	ŘASY	15
3.1	CHLOROPHYTA	16
3.2	CYANOBAKTERIE	16
3.3	GLAUCOPHYTA	17
3.4	RHODOPHYCEAE	17
3.5	CHAROPHYTA	18
3.6	HAPTOPHYTA	18
3.7	CRYPTOPHYTA	19
3.8	OCHROPHYTA	19
3.9	CHLORARACHNIOPHYCEAE	19
3.10	DINOPHYCEAE	20
3.11	EUGLENOPHYCEAE.....	20
4	PROBLEMATIKA VYUŽITÍ ŘAS PRO PRODUKCI BIOMASY A BIOPRODUKTŮ	21
4.1	PRODUKTY KULTIVACE ŘAS	21
4.1.1	<i>Bílkoviny.....</i>	<i>21</i>
4.1.2	<i>Lipidy.....</i>	<i>22</i>
4.1.3	<i>Sacharidy.....</i>	<i>23</i>
4.1.4	<i>Pigmenty.....</i>	<i>24</i>
4.1.5	<i>Vitamíny.....</i>	<i>25</i>
4.1.6	<i>Biopolymery.....</i>	<i>25</i>
4.2	ZPRACOVÁNÍ PRODUKTŮ KULTIVACE ŘAS.....	25
4.2.1	<i>Sklizení biomasy</i>	<i>25</i>
4.2.2	<i>Extrakce.....</i>	<i>26</i>
4.3	ENERGETICKÉ MOŽNOSTI VYUŽITÍ PRODUKTŮ KULTIVACE	27
4.3.1	<i>Termochemická konverze</i>	<i>27</i>
4.3.2	<i>Biochemická konverze</i>	<i>28</i>
4.3.3	<i>Transesterifikace</i>	<i>28</i>
4.3.4	<i>Fotosyntetický mikrobiální palivový článek</i>	<i>29</i>
4.4	VYUŽITÍ ODPADNÍCH PRODUKTŮ KE KULTIVACI.....	29
4.4.1	<i>Využití řas k čištění odpadních vod</i>	<i>29</i>
4.4.2	<i>Využití řas k čištění odpadních plynů</i>	<i>30</i>
5	TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY VHODNÉ PRO KULTIVACI ŘAS.....	34
5.1	TEPLOTA	35
5.2	PH.....	37
5.3	OXID UHLIČITÝ	37

5.4	SVĚTLO	38
5.5	SMYKOVÉ NAPĚTÍ	43
5.6	MÍCHÁNÍ	44
5.7	LIMITACE ZMĚNOU KULTIVAČNÍCH PODMÍNEK	44
6	KULTIVAČNÍ BIOREAKTORY	46
6.1	MÍCHANÉ BIOREAKTORY	47
6.2	PNEUMATICKY MÍCHANÉ TUBULÁRNÍ BIOREAKTORY	48
6.3	MEMBRÁNOVÉ BIOREAKTORY	49
6.4	BIOREAKTORY S PEVNÝM NOSIČEM A S FLUIDNÍM NOSIČEM	50
6.5	PANELOVÉ BIOREAKTORY	50
6.6	SPIRÁLOVITÉ BIOREAKTORY	51
7	VÝSLEDKY A DISKUZE	52
8	ZÁVĚR	55
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	64
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
12	SEZNAM TABULEK.....	66

1 ÚVOD

V současné době lidstvo čelí globálním změnám. Neustále rostoucí populace, množství spotřebované energie, znečištění životního prostředí, to jsou výzvy, kterým se nyní snažíme čelit a bude potřeba je vyřešit [1],[2].

Řasy jsou jedny z nejstarších organismů na světě a mají potenciál k vyřešení množství problémů, se kterými se v dnešní době potýkáme. Jejich buňky obsahují širokou škálu produktů, kterou lze využít pro různé účely [3]. Jsou zdrojem obnovitelné energie. Využitím energeticky bohatých produktů, získaných jejich kultivací, lze dosáhnout výroby biopaliv, jako je bionafta, vodík nebo bioetanol. Biopaliva, získaná zpracováním řas, se nazývají biopalivy třetí generace [4]. Ta mohou nahradit neobnovitelné zdroje energie, snížit naši závislost na ropných produktech a vytvořit tak udržitelnou cestu k zajištění energetických potřeb lidstva. Vedle této skutečnosti jsou řasy schopny v budoucnu zajistit potravinovou bezpečnost stále rostoucí populace [3],[4].

Lze využít jejich schopnosti tolerovat různorodá prostředí a začlenit jejich kultivaci do procesů čištění odpadních plynů a vod. Tímto způsobem je možné dosáhnout nejen snížení dopadů na životní prostředí a omezení globálních změn, ale také získat hodnotné produkty, které lze využít v dalších oblastech. Na základě kultivačních podmínek lze předpokládat konečné složení biomasy. V uzavřených kultivačních systémech je možné toto prostředí kontrolovat a zajistit, aby produkovaná biomasa odpovídala požadovanému složení. Produkty kultivace řas lze využít například v potravinářském, farmaceutickém nebo zemědělském průmyslu [1],[4],[3].

Z těchto důvodů je na kultivaci řas v posledních letech zaměřena velká míra pozornosti a je snahou využít veškerý potenciál, který nám mohou svými schopnostmi řasy nabídnout [3].

2 DEFINICE A VYMEZENÍ POJMŮ

2.1 Řasy

Řasy jsou heterogenní skupina jednobuněčných a mnohobuněčných eukaryotických fotosyntetizujících organismů. Neexistuje jednotné taxonomické rozdělení, které by obsahovalo všechny řasy. Různá taxonomická rozdělení se dokonce vyskytují společně v rámci jednotlivých podskupin řas. V přírodě lze nalézt vodní řasy ve sladkých, slaných i braktických vodách. Suchozemské řasy lze nalézt ve vlhkých půdách, na kmenech stromů nebo také na ledu či sněhu [5].

2.2 Biomasa

Biomasa se rozumí organická hmota v biosféře Země. Tvoří ji těla všech organismů. Biomasu lze dělit na fytomasu, dendromasu, cíleně pěstovanou (energetickou) biomasu, biopaliva, odpadní biomasu a biologicky rozložitelný odpad. Pro produkci energie a paliv je důležitá energeticky využitelná biomasa [6].

Podle vyhlášky č. 415/2012 Sb. je biomasa produkt, který je tvořen z rostlinného materiálu ze zemědělství nebo lesnictví a lze ho použít jako palivo za účelem získání energetického obsahu a níže uvedený odpad použitý jako palivo:

1. rostlinný odpad ze zemědělství nebo lesnictví
2. rostlinný odpad z potravinářského průmyslu, pokud se využije vyrobené teplo
3. rostlinný odpad z výroby čerstvé vlákniny a z výroby papíru z buničiny, pokud se spaluje v místě výroby a vzniklé teplo se využije
4. korkový odpad
5. dřevný odpad s výjimkou dřevného odpadu, který může obsahovat halogenované organické sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, zahrnující především takovéto dřevné odpady pocházející ze stavebnictví a z demolic [7]

2.3 Bioprodukty

Dle zákona č.242/2000 Sb. je bioproduktem surovina rostlinného nebo živočišného původu získaná ekologickým zemědělstvím podle předpisů EU. Jako ostatní bioprodukty označuje zákon ekologické krmivo nebo ekologický rozmnožovací materiál (osivo a sadba pěstovaných rostlin) [8].

2.4 Bioreaktory

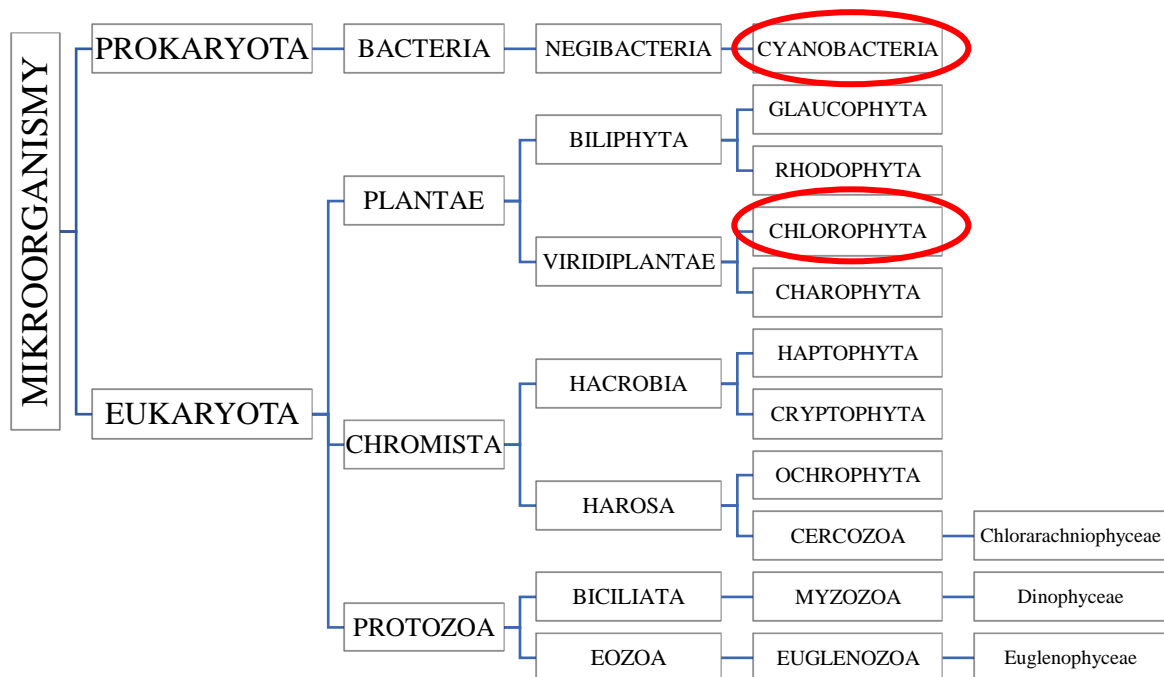
Reaktory, ve kterých probíhá chemická reakce v důsledku působení enzymů nebo častěji živých buněk (mikroorganismy, rostlinné buňky atd.). Nacházejí využití například při fermentačních výrobcích a čištění odpadních vod biologickou cestou. Dělí se na aerobní a anaerobní, ve kterých probíhají děje bez přístupu kyslíku, dále pak podle technického provedení na míchané a nemíchané, otevřené a uzavřené atd [9].

2.5 Kultivace

Kultivace je proces, při kterém dochází po inokulaci k růstu a množení mikroorganismů v kultivačním médiu za podmínek v kultivační nádobě [5].

3 ŘASY

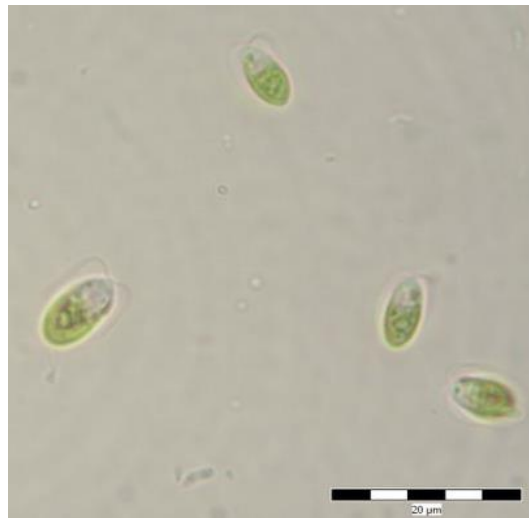
Řasy jsou skupinou organismů, která je schopná fotosyntézy [4]. Živé organismy rozdělujeme do tří domén: Bakterie, Archea, Eukarya. Do těchto domén organismy zařazujeme na základě analýzy sekvencí genu přepisovaného do 16S-rRNA prokaryotických organismů a 18S-rRNA eukaryotických organismů. Buňky řas jsou eukaryotní a všechny buňky eukaryot obsahují mitochondrie. Eukaryotické buňky obsahují také jádro, cytoplasmu a plasmatickou membránu. Jádro tvoří chromatin a je ohraničeno jadernou membránou. Počet druhů řas se odhaduje od 40 000 do 1 000 000. Mají jednoduchou stavbu těla. Mohou být jednobuněčné (mikrořasy) i mnohobuněčné (makrořasy) [4],[10]. Taxonomicky se rozlišují například podle barvy, která je dána odlišnými pigmenty. Dalšími způsoby, kterými lze řasy rozlišovat, jsou strukturní charakteristiky, složení membrán nebo molekuly používané k uchování energie. Existují různá rozdělení, která se od sebe liší na základě rozdílných kombinací vlastností. Počet skupin se tak může v různých zdrojích lišit. Jedno z možných rozdělení řas do skupin je zobrazeno níže, viz obr.1. Do označených skupin se řadí dva nejznámější rody: *Spirulina* (Cyanobacteria) a *Chlorella* (Chlorophyta) [11].



Obr. 1 Rozdělení skupin řas [12]

3.1 Chlorophyta

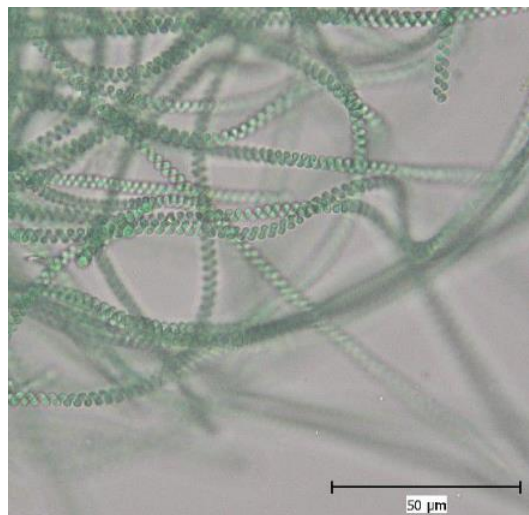
Zelené řasy (Chlorophyta) obsahují chlorofil *a*, chlorofil *b*, karoteny a xantofyly. Jejich zásobní látkou je škrob, který je umístěn v chloroplastu. Chybí jim fykobiliproteiny. Chloroplasty zelených řas jsou obalené dvěma membránami. Obsahují tylakoidy uspořádané v lamelách a pyrenoid - proteinové tělíčko s vysokým obsahem enzymu ribulóza-1,5bisfosfát (RUBISCO). RUBISCO je důležitý při vazbě oxidu uhličitého na cukr pentózu při fotosyntéze a vyskytuje se ve všech fotoautotrofních organizmech. Vyskytují se ve sladkých i slaných vodách a také v pevninském prostředí [10],[12],[13].



Obr. 2 *Dunaliella* sp. [14]

3.2 Cyanobakterie

Cyanobakterie (sinice) obsahují chlorofyl *a*, fykobiliny (fykoerytrin, fykocyanin a alofykocyanin) a také karotenoidy. Fykobiliny vstřebávají sluneční energii, přičemž fykoerytrin je neefektivnější při 550 nm, fykocyanin při vlnové délce světla 620 nm a alofykocyanin při vlnové délce 650 nm. Spojují se s bílkoviny a vznikají tak fykobiliproteiny, které tvoří fykobilizomy. Cyanobakterie jsou důležitou složkou pikoplanktonu. V létě může docházet k nadměrnému množení cyanobakterií a ty tak vytvářejí na hladinách vodních ploch tzv. vodní květ. Ten může být toxický pro zooplankton, ryby i zvířata, která vodu s vodním květem pijí. Jejich tylakoidy netvoří lamely a jsou jednotlivě a rovnoměrně rozmístěné v cytoplazmě [10],[11],[12].



Obr. 3 *Spirulina major* Kützing ex Gomont [14]

3.3 Glaucophyta

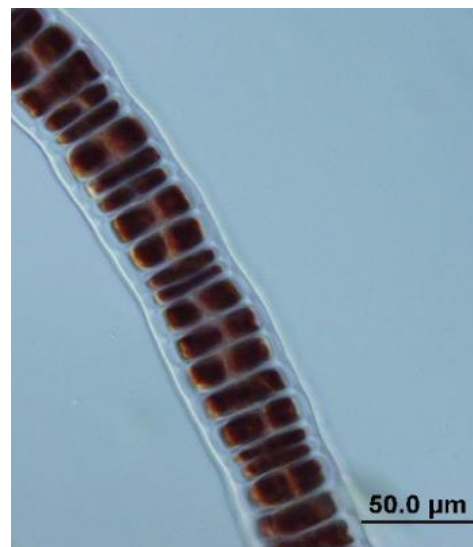
Glaucophyta obsahují chlorofyl *a*, karoteny, xantofyly, alofykocyanin, fykoerytrin a fykocyanin. Chloroplasty, umístěné v buňkách těchto řas, se nazývají cyanely a jsou obaleny peptidoglykanem. Zásobní látkou této skupiny řas je škrob. Buňky řas, které spadají do této skupiny, mají dva bičíky různé délky [10],[12].



Obr. 4 *Glaucocystis nostochinearum* ITZIGSOHN [14]

3.4 Rhodophyceae

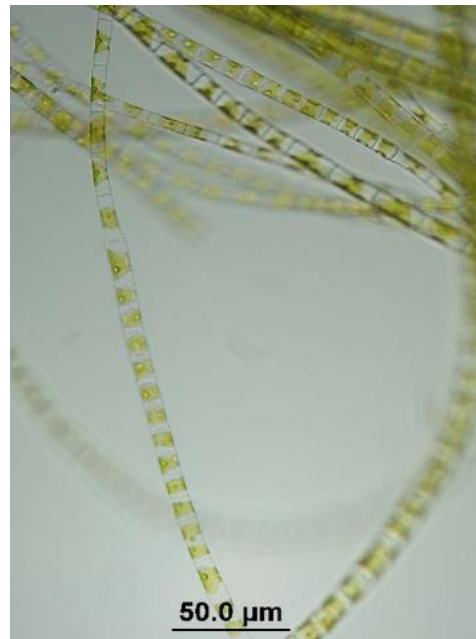
Červené řasy obsahují chlorofyl *a*, karoteny, xantofyly a fykobiliny (alofykocyanin, fykocyanin a fykoerytrin). Tylakoidy tvoří lamely, jsou vzhledem k sobě umístěny paralelně a v přibližně stejných vzdálenostech od sebe. Jako zásobní látka jim slouží škrob uložený v cytoplazmě. V buněčné stěně mají mikrofibrilární celulózu a amorfni polysacharidy. Jejich přirozeným prostředím je zejména mořská voda. Najdeme je ale i v extrémních podmínkách (*Cyanidium*, 55 – 60 °C, 2 – 3 pH). Produkují agar, karagenan a celulózu [10],[15],[16].



Obr. 5 *Bangia atropurpurea* (Mertens ex Roth) Agard [14]

3.5 Charophyta

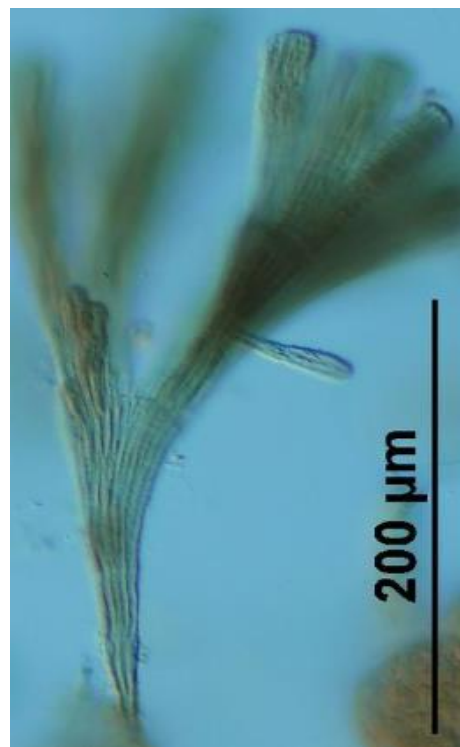
Charophyta obsahují chlorofyl *a*, *b*, karoteny a xantofyly. Postrádají fykobiliny. Povrch buněk a také bičíků je pokryt organickými šupinami. Obvykle žijí ve sladkovodním prostředí [12].



Obr. 6 *Klebsormidium* cf. *flaccidum* (Kützing) P. C. Silva, K. R. Mattox & W. H. Blackwell [14]

3.6 Haptophyta

Haptophyta obsahují chlorofyl *a*, chlorofyl *c*₁ a chlorofyl *c*₂. Jsou to jednobuněčné organismy a jejich chloroplasty jsou chráněny čtyřmi membránami. Tylakoidy jsou v chloroplastech ve shlucích po třech v lamelách. Jejich buňky jsou pokryty periplastem a tenkými šupinami. Mají dva bičíky a haptonema. Haptonema je podobné bičíku, ale chybí mu axonema. Zásobní látkou je chrysolaminarin. Přírodním prostředím většiny druhů je mořská voda [10],[11],[12].



Obr. 7 *Rhipidodendron* *splendidum* F. Stein [14]

3.7 Cryptophyta

Obsahují chlorofyl *a*, chlorofyl *c*₂, karoteny, xantofyly i fykobiliproteiny (fykocyanin a fykoerytrin). Jako zásobní látku používají škrob. Chloroplasty obsahují také pyrenoid. Jedná se o jednobuněčné bičíkaté organismy, které mají dorzálně-ventrální stavbu buňky. Jsou součástí planktonu a vyskytují se ve sladkovodním, mořském i braktickém prostředí [10],[12].



Obr. 8 *Cryptomonas* sp.
Ehrenberg [14]

3.8 Ochrophyta

Chloroplasty obsahují většinou chlorofyly *a*, *c*₁, *c*₂ a *c*₃ a mají čtyři membrány. V chloroplastech jsou tylakoidy uskupeny po třech v lamelách. Hlavní zásobní látkou je chrysolaminarin. Tyto řasy žijí většinou ve slané vodě. Protože karotenoidy obsažené v buňkách převažují nad chlorofyly, mají buňky zlatavou barvu [10],[12].



Obr. 9 *Synura uvella* Ehrenberg
[14]

3.9 Chlorarachniophyceae

Obsahují chlorofyl *a*, chlorofyl *b*. Chybí jim fykobiliny i karoteny. Chloroplasty mají opět čtyři membrány a obsahují pyrenoid. Tylakoidy mohou být seskupeny až po třech, ale mohou se vyskytovat také jednotlivě. Zásobní látkou je paramylon [12].

3.10 Dinophyceae

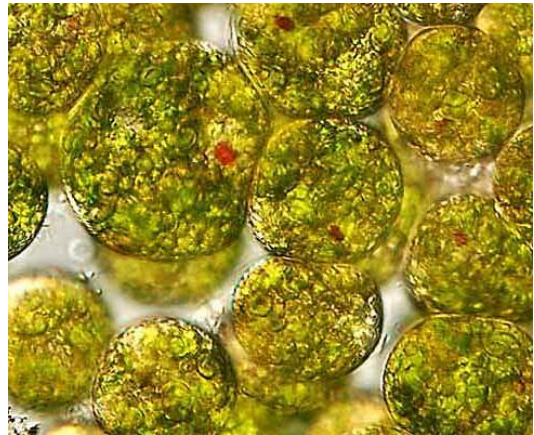
Dinophyceae obsahují chlorofyl *a*, *c₁* a *c₂*. Postrádají fykobiliny a obsahují β -karoten a xantofyly. Chloroplasty jsou pokryty třemi obalnými membránami a obsahují pyrenoid. Tylakoidy těchto řas jsou uspořádány po třech v lamelách. Zásobní látkou je škrob. Mají dva bičíky, které se od sebe vzájemně liší. Delší bičík slouží k pohybu buňky a kratší bičík se spirálně vlní. Žijí v mořském i sladkovodním prostředí a jsou důležitou součástí mikrop planktonu [10],[12].



Obr. 10 *Prorocentrum micans*
Ehrenberg [14]

3.11 Euglenophyceae

Euglenophyta obsahují chlorofyl *a*, chlorofyl *b*, karoteny a xantofyly. V chloroplastu mají pyrenoid. Povrch chloroplastu je pokrytý třemi membránami. Tylakoidy jsou uspořádány v lamelách po třech. Jako zásobní látku využívají chryzolaminaran, který je uložen v cytoplazmě. Existují také druhy, které nemají chloroplasty a živí se chemoheterotrofně. Euglenophyta žijí zejména ve sladkovodním prostředí, ale mohou se vyskytovat i v mořské vodě [10],[12].



Obr. 11 *Euglena* sp. [17]

4 PROBLEMATIKA VYUŽITÍ ŘAS PRO PRODUKCI BIOMASY A BIOPRODUKTŮ

Kultivací řas je možné získat širokou škálu bioproduktů, které lze využít v mnoha odvětvích [1]. Transformačními procesy lze z biomasy také získat produkty s přidanou energetickou hodnotou [3]. K získání bioproduktů je potřeba zvolit vhodné způsoby zpracování, které se volí podle kultivovaného druhu a požadovaného bioproduktu [18]. Je možné využít také potřeby buněk a zapojit je do čistících procesů, kdy je docíleno snížení kultivačních nákladů, získání bioproduktů a vyčištěného odpadního produktu [19].

4.1 Produkty kultivace řas

Mezi důležité produkty, které lze získat za pomoci kultivace řas, patří pigmenty, polynenasycené mastné kyseliny, antioxidanty, sacharidy, bílkoviny, vitamíny, přírodní barviva nebo farmaceutika. Aktuální ceny biomasy vybraných druhů řas a některých produktů jsou uvedeny v tab. 1 [12],[20]. Řasy jsou vzhledem k vysokému obsahu oleje potenciálním zdrojem paliva substituujícího ropné produkty [3],[16]. Následné produkty se z řas získávají procesem pro úpravu biomasy, tzv. biorafinací [1].

Tab. 1 Aktuální ceny produktů kultivace řas [21]

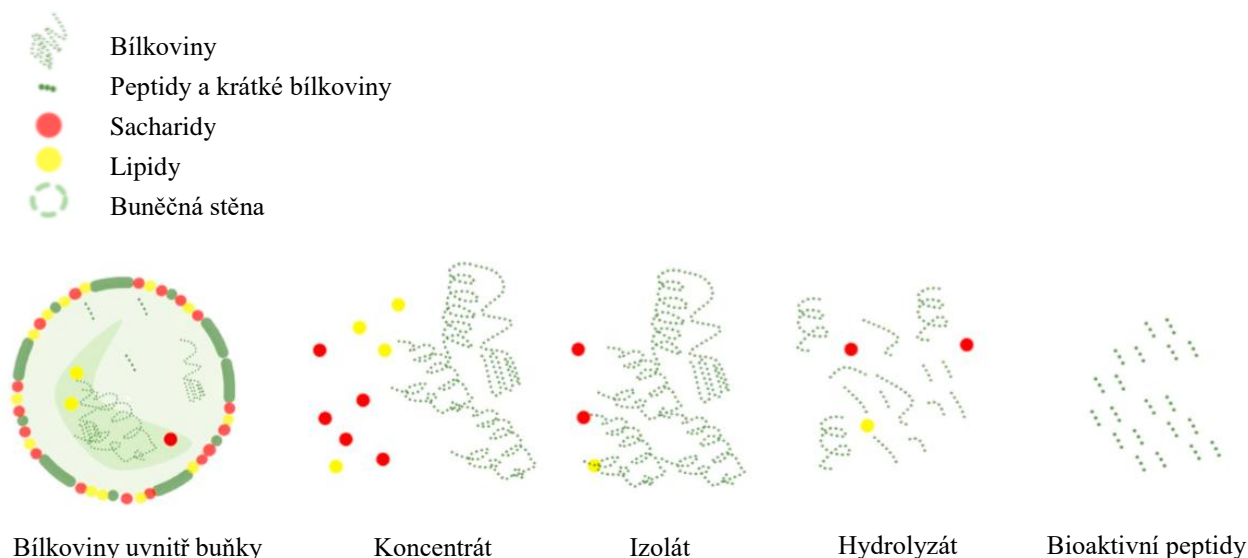
Produkt	Výrobní cena [Kč/kg]	Prodejní cena [Kč/kg]
<i>Spirulina</i> (biomasa)	46	183
<i>Chlorella</i> (biomasa)	114	434
β-karoten	2 400	18 059
Astaxantin	12 619	57 150
Fykocyanin	1052	12 527

Ke kultivaci řas nejsou potřebné herbicidy či pesticidy, jako je tomu u běžných olejnatých plodin. Při změně podmínek můžeme ovlivnit výsledné složení biomasy, protože tím ovlivňujeme metabolismus řas [16].

4.1.1 Bílkoviny

Jsou to dlouhé řetězce polymerizovaných aminokyselin. Bílkoviny představují více než 80 % vázaného dusíku obsaženého v řasách. Každá buňka produkuje tisíce různých bílkovin. Aminokyseliny se dále dělí podle jejich vedlejších řetězců, které jsou alifatické, kyselé, aromatické, sírové, alkoholové, zásadité a cyklické [16].

V závislosti na stupni zpracování lze proteinové produkty řas rozdělit na bílkoviny obsažené v buňkách, koncentrované bílkoviny, izoláty, hydrolyzáty a bioaktivní peptidy. Bílkoviny v buňkách jsou chráněny buněčnou stěnou a membránou. Pro maximální využití těchto bílkovin je proto důležité prolomit ochranu buněk a získat přístup k intracelulárním bílkovinám. Koncentráty a izoláty bílkovin vznikají koncentrací a čištěním extrahovaných bílkovin z buněk řas. Hydrolyzáty bílkovin vznikají enzymatickou hydrolýzou bílkovin. Tento proces dokáže rozložit bílkoviny na menší peptidy. Bioaktivní peptidy mají 3 až 40 aminokyselin a jsou izolovány z hydrolyzátů [22].



Obr. 12 Rozdělení proteinových produktů řas [22]

Řasa, která je v současné době hojně kultivována a dobře známá, je *Athrospira*, lépe známá jako *Spirulina*. Má vysoký obsah bílkovin (60 – 71% vysušené biomasy). Je také bohatým zdrojem vitamínů ze skupiny B a karotenů. Buněčná stěna této řasy je dostatečně tenká na to, aby byly buňky stravitelné lidským organismem. Proto se tento druh používá jako doplněk stravy a lze ho sehnat ve formě tablet, prášku nebo vloček. Používá se také jako doplněk v oblasti akvaristiky a chovu drůbeže. Na bílkoviny jsou bohaté také druhy *Anabeana*, *Chlorella*, *Euglena* a *Dunaliella* [1],[23].

Mezi možnosti použití bílkoviny patří krmiva pro zvířata, hnojiva, průmyslové enzymy nebo bioplasty [1].

Tab. 2 Obsah bílkovin různých druhů řas [1]

Druh řasy	Obsah bílkovin [hm. % suché biomasy]
<i>Spirulina platensis</i>	46 – 63
<i>Euglena gracilis</i>	39 – 61
<i>Chlorella vulgaris</i>	51 – 58
<i>Dunaliella salina</i>	57
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48
<i>Prymnesium parvum</i>	28 – 45
<i>Porphyridium cruentum</i>	8 – 39
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 – 18

4.1.2 Lipidy

Lipidy jsou heterogenní skupinou sloučenin, které obsahují deriváty mastných kyselin (triacylglyceridy, glycerolfosfolipidy), množství aromatických a uhlovodíkových sloučenin (steroly, karotenoidy, terpeny, vosky). Jejich společným znakem je špatná rozpustnost ve vodě a dobrá rozpustnost v nepolárních rozpouštědlech, jako je např. benzen nebo chloroform. Mezi lipidy patří tuky, vosy a oleje a další příbuzné sloučeniny. Rozdělují se na jednoduché lipidy (estery mastných kyselin s alkoholy), složené lipidy (kromě mastné kyseliny a alkoholu

obsahují i další skupiny, patří sem např. fosfolipidy) a třetí skupinou jsou prekurzory a odvozené lipidy (do této skupiny patří např. glycerol nebo steroidy) [24],[25].

Lipidy jsou jednou z hlavních složek mikrořas. Jejich množství je závislé na druhu řasy a kultivačních podmínkách. Jsou umístěny zejména v cytoplazmě (v malém množství i v chloroplastech) a slouží k ukládání energie a uhlíku. Lipidy mohou být rozděleny na polární a nepolární. Polární lipidy jsou součástí buněčných membrán a organel. Nepolární lipidy slouží k ukládání energie a jsou shromažďovány v buňkách ve formě triacylglycerolů [26],[27],[24]. Nepolární lipidy (neutrální lipidy) jsou pokryty vrstvou fosfolipidů a bílkovin. Bílkoviny v této krycí vrstvě umožňují lipidovým organelám ovládat ukládání lipidů, jejich tvorbu a pohyb. Dále jim tyto bílkoviny umožňují reagovat s jinými organelami a ukládat či rozkládat bílkoviny [24].

K jejich akumulaci často dochází, pokud jsou buňky vystaveny stresovým podmínkám. Lze je limitovat nízkou hladinou dusíku, nedostatečným přísunem živin, vysokou intenzitou světla nebo záměrnými změnami pH. Nejběžnější a nejefektivnější je omezování přísunu dusíku. Během trvání nedostatku dusíku se bílkoviny přemění na látky s vysokou energetickou hodnotou [4],[28].

Lipidy můžeme použít pro výrobu oleje. Jsou využitelné pro farmaceutický a kosmetický průmysl [16].

Tab. 3 Obsah lipidů u různých druhů řas [1]

Druh řasy	Obsah lipidů [hm. % suché biomasy]
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	16 – 40
<i>Prymnesium parvum</i>	22 - 38
<i>Chlorella vulgaris</i>	14 – 22
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	21
<i>Euglena gracilis</i>	14 – 20
<i>Porphyridium cruentum</i>	9 – 14
<i>Spirulina platensis</i>	4 – 9
<i>Dunaliella salina</i>	6

4.1.3 Sacharidy

Sacharidy jsou aldehydy nebo ketony polyhydroxyalkoholů. Rozlišují se na monosacharidy (glukóza, ribóza), disacharidy (sacharóza, laktóza), oligosacharidy (maltotrióza) a polysacharidy (škrob, glykogen). Nejrozšířenějším sacharidem je glukóza. Podílejí se na struktuře organismů i jejich metabolických procesech [25]. Mohou se hromadit v plastidech (jako škrob) nebo být hlavní složkou buněčné stěny. Jejich hromadění v buňkách je způsobeno fixací oxidu uhličitého při fotosyntéze. Při fixaci se produkuje glukóza a další cukry přes metabolickou dráhu, známou jako Calvinův cyklus. Nejčastěji jsou v řasách lipidy přítomny v podobě škrobu, glukózy, celulózy a ve formě polysacharidů [1].

Škrob je nejběžnější polyglukan, který slouží řasám k ukládání uhlíku a energie. Škrob obsahuje dva různé α -polyglukany (amylózu (lineární struktura) a amylopektin (větvená struktura)). Škroby jsou umístěny v chloroplastech a poskytují energii pro procesy buněčného cyklu. Různé druhy řas produkují odlišné typy polyglukanů (chrysolaminarin produkují rozsivky, škrob zase produkují červené řasy). Většinou zelených řas slouží škrob jako hlavní

rezerva a lipidy jako sekundární. Aby bylo dosaženo nejvyšších výnosů, je potřeba omezit ty buněčné procesy, které spotřebují při svém průběhu nejvíce energie [24].

Polysacharidy získané z řas mají široké možnosti použití (v kosmetice, potravinářství, textilním průmyslu, v lubrikantech nebo zahušťovadlech, v klinických léčích a stabilizátorech). Polysacharid sulfátovaný ve vodě má široké možnosti použití ve farmakologii. Lze ho použít jako antioxidační, protinádorové, antivirové, antikoagulační, protiinflamační a imunomodulační přípravek. Polysacharid získaný z *Poryphyridium* sp. je významný z hlediska protizánětlivé léčby kůže, protože dokáže zabránit pohybu a adhezii polymorfonukleárních leukocytů [1]. Významným polysacharidem je také agar, který je součástí buněčné stěny mořských červených řas a je složený z agarózy a agaropektinu. Největší význam má agar jako želatinové médium pro kultivaci v laboratořích a agaróza se používá v potravinářství, kde se uplatňuje díky své schopnosti zadržovat vodu. K získání agaru se kultivují řasy rodu *Gracilaria* a *Gelidium* [29].

Tab. 4 Obsah sacharidů různých druhů řas [1]

Druh řasy	Obsah sacharidů [hm. % suché biomasy]
<i>Porphyridium cruentum</i>	40 – 57
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	21 – 52
<i>Prymnesium parvum</i>	25 – 33
<i>Dunaliella salina</i>	32
<i>Euglena gracilis</i>	14 – 18
<i>Chlorella vulgaris</i>	12 – 17
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	17
<i>Spirulina platensis</i>	8 – 14

4.1.4 Pigmenty

Pigmenty absorbují sluneční energii. Hlavními skupinami pigmentů jsou chlorofyly, karotenoidy a fykobiliny. Pod karotenoidy patří karoteny a xantofyly. Nejběžnější fykobiliny jsou například alofykocyanin nebo fykocyanobilin [30].

Karotenoidy chrání buňku před fotooxidací. Bylo zjištěno, že pigmenty získané z řas mají preventivní účinky na vznik nádorů. Chlorofyl se získává primárně z řasy *Chlorella* sp., protože podíl chlorofylu na celkové suché hmotnosti biomasy je 7 % (např. *Spirulina* obsahuje jen 1,4 %). Dále obsahují astaxantin, který je pro nás významný svými schopnostmi léčit chronická onemocnění, rakovinu, cukrovku, kožní onemocnění nebo onemocnění jater. Nejvyšší procentuální obsah astaxantinu má řasa *Haematococcus pluvialis* (1,5 až 3 %). Další pigmenty, jako je lutein nebo zeaxantin jsou využitelné ve farmacii. Pigmenty, produkované řasami, mohou být využity také jako potravinová barviva [1],[3],[29].

Volné radikály mají negativní dopad na lidské zdraví a způsobují poškození buněk. Karotenoidy jsou schopny tomuto procesu zabránit. Říká se jim proto také antioxidanty. Je známo více než 400 druhů karotenoidů, z nichž je nejznámější β -karoten. V lidském organismu slouží jako prekurzor tvorby vitamínu A. K produkci β -karotenu se využívá *Dunaliella salina*, která obsahuje z řas nejvyšší procentuální podíl karotenoidů (více než 10 % suché hmotnosti biomasy). β -karoten má schopnost chránit kůži před sluncem, funguje jako prevence proti srdečním chorobám, podporuje imunitní systém a požívá se také jako potravinářské barvivo. Dalším známým karotenoidem je kantaxantin [23],[29].

Fykoerytrin (červený) a phykocyanin (modrý) se používají jako barviva v potravinách (např. žvýkačky, sladkosti, mléčné produkty nebo wasabi) a kosmetických produktech (např. rtěnky) [23].

4.1.5 Vitamíny

Řasy jsou potenciálním zdrojem široké škály vitaminů a stopových prvků. Schopnost produkce vitaminů je ovlivněna koncentrací dusíku v kultivačním médiu. Byly provedeny studie, které dokazují, že řasy obsahují vysoké podíly vitaminů A, E, B a kyseliny listové. Například u řasy *Dunaliella tertiolecta* byla prokázána produkce vitaminů B₂, B₁₂, E a provitaminu A. Řasa *Tetraselmis suecica* vynikala obsahem vitaminů B₁, B₃, B₅, B₆ a C. Řasy rodu *Chlorella* byly klasifikovány jako bohatý zdroj vitaminu B₇ a téměř pětina druhů tohoto rodu obsahuje vysoký podíl vitaminu B₁₂. U cyanobakterií byla také při nižších hodnotách koncentrace dusíku zjištěna nižší produkce vitaminu B₁₂ než při takové koncentraci, která zajišťuje buňkám jeho dostatek [2],[3].

4.1.6 Biopolymery

Řasy jsou také potenciálním zdrojem biopolymerů. K tomuto účelu se kultivují řasy rodu *Phormidium*, *Chlamydomonas*, *Chlorella* a *Scenedesmus*. Biopolymery jsou produkovány jako vedlejší produkt při výrobě biopaliv. Mezi možné výrobky patří plasty založené na celulóze nebo biopolyetylen. V současné době existuje snaha nahradit běžné plasty rozložitelnými materiály, jako jsou například alifatické polyestery, polysacharidy a kopolymery [29].

4.2 Zpracování produktů kultivace řas

Aby bylo možné řasové produkty využít, je třeba, aby byla biomasa zpracována. Nejpodstatnějšími částmi tohoto procesu je sklizení řas a extrakce produktů [18].

4.2.1 Sklizení biomasy

Sklizením se rozumí oddělení řas od média, ve kterém byly kultivovány. Metoda, která bude vybrána pro sklizení, je závislá na vlastnostech buněk sklizené řasy, hustotě a velikosti buněk a na požadovaném výsledném produktu. Existuje několik druhů metod, které lze ke sklizni použít. Lze je klasifikovat jako metody mechanické, chemické, biologické a elektrické. Bylo prokázáno, že ke sklizni biomasy jsou mechanické metody ze zmiňovaných typů metod nejúčinnější. Kombinací mechanických metod s jinými metodami lze dále dosáhnout vyšší efektivity. Porovnání jednotlivých metod, používaných pro sklizeň biomasy, je uvedeno v tab. 5 [31].

Tab. 5 Metody sklizení biomasy z řas [31]

Sklízeční metoda	Výhody	Nevýhody
Koagulace/flokulace	rychlost, jednoduchost, použitelná pro velké objemy, nízká energetická náročnost	drahé chemikálie, vysoce závislá na pH, náročnost oddělení koagulantu od biomasy, možnost kontaminace
Flotace	použitelná pro velké objemy, nízké nároky na prostor, rychlost	nutné použití surfaktantů
Elektrické procesy	vhodná pro všechny druhy řas, nejsou potřeba žádné chemikálie	potřeba kovových elektrod, možnost kontaminace, vysoké nároky na energii
Filtrace	nízká spotřeba energie, vysoká efektivita, nejsou potřeba žádné chemikálie, nízké smykové napětí, recyklace vody	vysoká časová náročnost, vysoká spotřeba energie, náklady na provoz spojené se znečišťováním membrán
Centrifugace	rychlost, efektivita, vhodná pro všechny druhy řas	vysoká energetická náročnost, vysoké provozní náklady, vysoká cena pro velké objemy

4.2.2 Extrakce

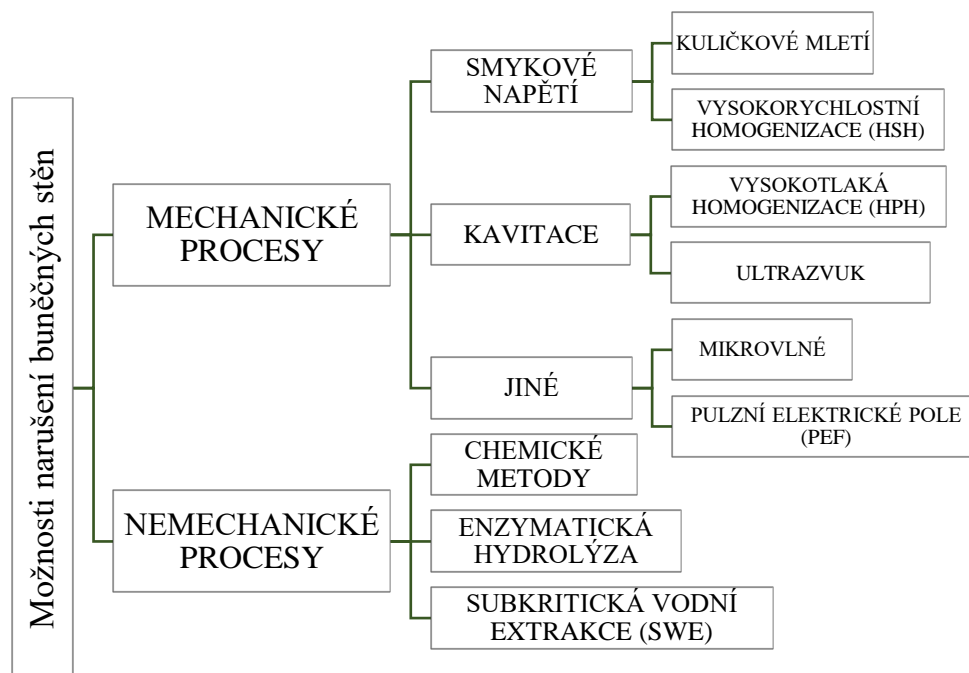
Extrakce následuje po sklizení a odvodnění biomasy. Probíhat může dvěma způsoby. Prvním je extrakce provedená ze suché biomasy (suchý proces) a druhým způsobem je extrakce z koncentrované biomasy bez vysušení (vlhký proces). V každém případě je nezbytné organické rozpouštědlo [32].

Jednou z hlavních složek řas, která je pomocí extrakce z buněk získávána, jsou lipidy. Ty jsou rozpustné v organických rozpouštědlech. Polární lipidy jsou během extrakce rozpuštěny polárními rozpouštědly a neutrální lipidy jsou rozpuštěny nepolárními rozpouštědly. Používá se celá řada rozpouštědel, ale nejpoužívanější je metanol, chloroform a hexan. Aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti extrakce, používají se směsi polárních a nepolárních rozpouštědel, jako je například směs chloroformu a metanolu v poměru 1:2 (Blighova-Dyerova metoda) nebo 2:1 (Folchova metoda). Rozpouštědla pronikají do buňky, vážou na sebe lipidy a následně difundují z buňky ven. Jakmile jsou lipidy extrahovány z buněk, jsou oddělovány od rozpouštědla pomocí destilace nebo odpařování rozpouštědla. Tento postup se označuje jako přímá extrakce. Ke zvýšení efektivity extrakce se používají metody porušování buněk. Při použití těchto metod mluvíme o extrakci asistované porušováním buněk. Tím se dosáhne vyšší účinnosti extrakce a sníží se potřebný objem použitého rozpouštědla. Metody používané k tomuto účelu a jejich rozdělení je uvedeno na obr. 13 [32].

Zjištění výsledků narušovacích procesů se provádí analýzou koncentrace buněčných látek, jako jsou proteiny nebo enzymy. Zjištěná koncentrace intracelulárních látek je definována jako:

$$A = \frac{c - c_0}{c_{max} - c_0} \cdot 100, \quad (1)$$

kde c je koncentrace měřené látky, c_0 je počáteční koncentrace látky a c_{max} představuje maximální možnou koncentraci této látky [33].



Obr. 13 Klasifikace metod používaných k narušení buněk [34]

Extrakce se zaměřením na jeden specifický bioprodukt však ve většině případů znamená ztrátu ostatních, které biomasa obsahuje. Pro získání více bioproduktů je třeba volit metody, které nebudou svou činností bioprodukty poškozovat. Z metod dezintegrace buněk má v tomto ohledu potenciál metoda pulzního elektrického pole nebo ultrazvuk. V oblasti extrakce se k tomuto účelu výzkumy zaměřují na možnost využití iontových kapalin [18].

4.3 Energetické možnosti využití produktů kultivace

Produkty, které získáme kultivací řas, lze dále využít k produkci biopaliv. K tomuto účelu můžeme rozdělit technologie zpracování biomasy na:

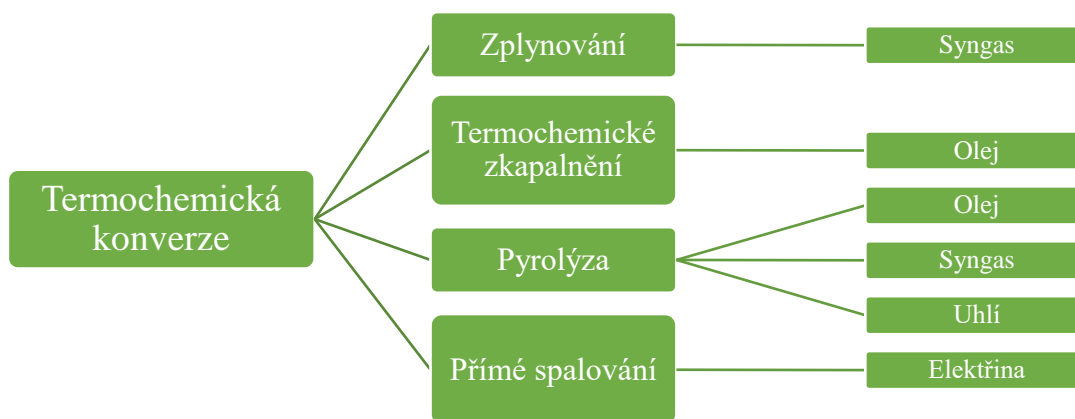
- termochemickou konverzi,
- biochemickou konverzi,
- transesterifikaci,
- fotosyntetický mikrobiální palivový článek [3]

Při výběru vhodné metody je třeba zohlednit objem biomasy, ekonomičnost metody a požadovaný výsledný produkt [3].

4.3.1 Termochemická konverze

Termochemická konverze zahrnuje zplynování, pyrolýzu, termální zkapalnění nebo spalování, jak je uvedeno na obr. 14. Při těchto procesech se využívá tepla k rozkladu organické hmoty. Při zplynování vzniká syngas [3].

Bioplyn se skládá z několika plynů. Hlavní složkou bioplynu je CO_2 a CH_4 . Během zplynování dojde za vysokých teplot (800 až 1000 °C) k částečné oxidaci biomasy. Při reakci kyslíku, páry a biomasy pak vzniká plyn, který je známý jako syngas (skládá se z CO , H_2 , CO_2 , N a CH_4). Syngas se potom dále spaluje nebo je využit v turbínách a motorech jako palivo. Termochemické zkapalnění probíhá za teplot od 300 do 350 °C a tlacích od 5 do 20 MPa [1],[35].



Obr. 14 Rozdělení metod termochemické konverze [35]

4.3.2 Biochemická konverze

Biochemická konverze zahrnuje anaerobní digesci, alkoholovou fermentaci a fotobiologickou výrobu vodíku. Její rozdělení je uvedeno na obr. 15. Při anaerobní digesci se přeměňuje organický odpad na bioplyn. Alkoholovou fermentací se vlivem působení enzymatických látek získá z biomasy etanol. Fotobiologická výroba vodíku představuje proces, během kterého dojde za pomoci řas k přeměně vody na vodíkové ionty a kyslík. Řasy jsou kultivovány v běžných podmínkách a poté jsou umístěny do anaerobního prostředí. To vyvolá produkci vodíku. Vodík a kyslík jsou produkovány současně. Dalším krokem v produkci vodíku je proto jeho separace od kyslíku [3].



Obr. 15 Rozdělení metod biochemické konverze [35]

4.3.3 Transesterifikace

Transesterifikace je proces, při kterém dochází k reakci triglyceridů s alkoholem. Surový olej z řas má vysokou viskozitu, která není vhodná pro použití v běžných motorech, proto se konvertuje na složky s nižší molekulovou hmotností ve formě alkylesterů mastných kyselin. Používá se kyselý katalyzátor (kyselina chlorovodíková, kyselina sírová), ale přeměna triglyceridů na metylestery je pomalá. Je vhodný pro transesterifikaci olejů s vysokým obsahem volných mastných kyselin. Při využití alkalického katalyzátoru (hydroxid draselný, hydroxid sodný) je transesterifikace asi 4000 krát rychlejší [1],[27],[36]. Vedle již zmíněného kyselého a zásaditého katalyzátoru se používá také katalyzátor heterogenní nebo biologický (např. lipáza). Proces transesterifikace se může provést také za úplné absence katalyzátoru. Děje se tak za teplot v rozmezí 200 až 350 °C a při tlacích 20 až 50 MPa. Tato metoda se ale pro řasy

často nepoužívá [28],[36]. Transesterifikace je závislá na molárním poměru alkoholu a oleje, druhu použitého alkoholu, na druhu a množství použitého katalyzátoru, na teplotě a čistotě reagujících látek a na reakční době [1].

Produktem tohoto procesu je nafta. Jiné postupy, jako je pyrolýza, produkují bionaftu s horší kvalitou. Řasy během svého růstu spotřebují stejné množství uhlíku, které se pak spalováním nafty vyloučí do prostoru. Proto o naftě z řas říkáme, že je uhlíkově neutrální. Parametry, podle kterých se určuje kvalita a vlastnosti bionafty, jsou určovány na základě obsahu metylesterů mastných kyselin. V porovnání s olejem z fosilních zdrojů má olej z řas nižší viskozitu a vyšší hustotu. [1].

4.3.4 Fotosyntetický mikrobiální palivový článek

Fotosyntetický mikrobiální palivový článek je bioelektrochemické zařízení. Dokáže produkovat elektřinu pomocí biodegradace organické hmoty v anaerobních podmínkách. Skládá se z katody a anody, které jsou od sebe odděleny protonovou membránou. Bakterie v anodě oxidují organické látky a produkují elektrony. Zároveň mohou transformovat živiny v médiu na další produkty, jako například vodík. Řasy jsou jedním z použitelných substrátů v anodické části palivového článku. Přesunem elektronů na katodu přes vnější okruh vzniká elektrická energie. Řasy v katodické části produkují kyslík a představují levnější a udržitelnější variantu než jiné metody řešení, jako je použití chemikálií nebo vzduchové katody. Tato technologie má potenciál při tvorbě energie a k úpravě odpadních vod [3],[37].

4.4 Využití odpadních produktů ke kultivaci

Odpadními produkty rozumíme odpadní vody a plyny. Potřeby metabolismu řas lze využít k odstranění nežádoucích látek z vody nebo plynu a získat tak produkty, které plynou z kultivace řas. Také se tak dosáhne čistší vody, vypouštěné z čistíren odpadních vod a plynů, vypouštěných z elektráren. Z odpadních produktů se tak díky možnosti jejich dalšího využití stává namísto neúčinného odpadu hodnotná surovina [38].

4.4.1 Využití řas k čištění odpadních vod

Za odpadní vodu se považuje taková voda, která použitím změnila své vlastnosti (teplota, pH, složení). Mezi odpadní vody patří například vody z obydlených objektů, průmyslových objektů nebo zdravotnických zařízení. Hlavními skupinami odpadních vod jsou odpadní vody průmyslové (použité ve výrobě, zemědělství) a městské (splaškové). K čištění odpadních vod slouží čistící systémy (čistírny odpadních vod (ČOV)). V nich probíhá čištění odpadních vod pomocí kombinace procesů mechanických (jako je cezení nebo usazování), chemických (např. číření a srážení) a biologických (aktivační proces nebo stabilizační nádrže). Mechanické čištění slouží k odstranění nerozpustných nečistot, které by mohly způsobit poškození dalších zařízení, která spadají do čistícího procesu. Do této kategorie patří například česle, lapáky písku a šterku nebo usazovací nádrž. Při biologickém čištění je využíváno schopností mikroorganismů využít rozložitelné organické látky. Tyto látky jsou tak odstraněny z odpadní vody a mikroorganismy je poté možné od vody oddělit. Nejtypičtějším biologickým čištěním je aktivační proces, při kterém dochází k tvorbě aktivovaného kalu. Ten obsahuje bakterie, houby, plísně, vířníky apod. Chemické čištění bývá využíváno k eliminaci fosforečnanů a dusičnanů [39],[40],[41].

Řasy jsou schopny z vody efektivně odstraňovat dusík i fosfor a proto mohou představovat alternativu k chemickému odstraňování těchto prvků. Jsou výhodné také z hlediska

odstraňování těžkých kovů nebo produkce kyslíku, který využívají další organismy a tím zvyšují efektivitu čistícího procesu [38],[42].

Je zapotřebí vybrat takové druhy řas, které budou schopny rychlého růstu. Výběrem vhodných kultivačních kultur se dosáhne vyšších výnosů, sníží se náklady na produkci biomasy a zvýší se ekonomičnost celého procesu. Navíc se při výběru otevřených kultivačních systémů sníží riziko kontaminace, protože rychle rostoucí řasy nedovolí růst dalším organismům [43].

Při využití řas pro čištění odpadních vod využívají řasy živiny v těchto vodách ke svému růstu. Řasy produkují během fotosyntézy kyslík, který podporuje aerobní rozklad organické hmoty. V závislosti na různých vlastnostech řas se použijí odlišné druhy v různých podmínkách [1]. Kvůli obsahu těžkých kovů v odpadních vodách by měly vybrané druhy řas splňovat podmínku odolnosti k přítomnosti těchto prvků. K tomuto účelu byly testovány řasy rodu *Chlorella* a bylo zjištěno, že dokáží přežít v prostředí s obsahem těžkých kovů. Řasy rodu *Chlorella* dokáží z vody účinně odstraňovat dusičnany, fosforečnany, sodík, hořčík, vápník a draslík. U řasy *Chlorella vulgaris* byla zjištěna 86 % efektivita odstraňování anorganického dusíku a 78 % efektivita odstraňování anorganického fosforu. Mezi další potenciálně využitelné druhy v této oblasti patří řasy rodu *Scenedesmus*, *Phormidium*, *Chlamydomonas*, *Spirulina* a *Botryococcus*. Dále bylo také zjištěno, že podmínky, ve kterých jsou řasy schopné růstu, jsou nevhodné pro koliformní bakterie. Tyto bakterie slouží jako indikátor fekálního znečištění a patří mezi ně například *Salmonella*. Experimentálně bylo dosaženo téměř 90 % redukce koliformních bakterií ve stabilizační nádrži po 12 dnech [43],[44].

V čistícím procesu tedy mohou řasy plnit důležitou funkci, protože jejich využitím se dosáhne dvojího efektu – řasy poslouží pro získání čistějšího životního prostředí a zároveň se dosáhne produkce biomasy, což vede k získání produktů následným zpracováním [1]. Řasy díky produkci kyslíku podporují procesy rozkladu organické hmoty, což je dalším velkou výhodou při jejich použití během čištění. Pokud nejsou do procesu zapojeny, je třeba kyslík uměle dodávat a náklady na energii tohoto prokysličování potom činí 45 až 75 % celkové spotřeby energií čistíren odpadních vod [45].

4.4.2 Využití řas k čištění odpadních plynů

Z elektráren a továren se do ovzduší dostává velké množství CO₂. Tento plyn zůstává v atmosféře až 200 let a proto je snahou toto množství omezit a snížit tak dopad emisí CO₂ na životní prostředí. Hlavními producenty CO₂ jsou průmyslová odvětví, zabývající se produkcí cementu, železa a oceli nebo zpracováním zemního plynu a spalováním za účelem výroby elektrické energie. Mikrořasy dokáží vázat CO₂ z atmosféry, z odpadních plynů a rozpustných uhličitánů. Jeden kilogram suché hmotnosti řas spotřebuje okolo 1,8 kg CO₂ [1],[46],[47]. V tab. 6 jsou uvedeny některé vybrané druhy řas spolu s jejich schopností vázat CO₂. Atmosférickým oxidem uhličitým (procentuální zastoupení v atmosféře 0,038 %) se nedaří dosáhnout maximálního možného růstu buněk, ale odpadní plyny obsahují vyšší podíl CO₂, který činí v závislosti na typu paliva 5 % až 20 % nebo i více CO₂. Tyto plyny by tak mohly posloužit jako levný zdroj uhlíku pro kultivaci řas [43],[47],[48]. S rostoucí koncentrací CO₂ roste také produktivita biomasy. Avšak po dosažení určité hranice koncentrace produktivita naopak klesá. Při rychlosti provzdušňování 0,25 litrů plynu na litr média za minutu má *Chlorella* optimální koncentraci CO₂ v plynu 2 %. Při zvýšení této koncentrace na 10 % je růst řasy minimální. Pokles produktivity lze vysvětlit tak, že příliš vysoká koncentrace CO₂ snižuje schopnost buněk tento plyn vázat a zároveň se snižuje také pH. Proto je snahou najít takové druhy řas, které budou tolerovat vysoké koncentrace CO₂ [46].

Mezi problémy při kultivaci s využitím odpadních plynů patří kromě vysokých koncentrací CO₂ také vysoké teploty. Řasa *Chlorella sorokiniana* UTEX–1230 se vyznačuje schopností růst i při teplotě 42 °C a růst je limitován za koncentrace CO₂ nad 20 %. Optimální podmínky této řasy zahrnují teplotu 40 °C a koncentraci CO₂ 10 %. Řasy *Chlorella* H-84 a *Chlorella* A-2 vykazují také vysokou toleranci na vysoké teploty i koncentrace CO₂. Vykazují nejvyšší rychlost růstu za teploty 40 °C a koncentrace CO₂ 20 % [49],[50]. *Chlorella* sp. T-1 vykazuje nejlepší růst za teploty 35 °C, přičemž významný pokles rychlosti růstu nastane při teplotě 45 °C. Nejvýhodnější koncentrace CO₂ je potom 10 % s tím, že zvyšování této koncentrace na 50 % nemá významný dopad na rychlost růstu [51].

Tab. 6 Schopnost fixace CO₂ vybraných druhů řas [50]

Typ použitého bioreaktoru	Objem [l]	Druh řasy	Obsah CO ₂ v plynu [%]	Teplota [°C]	pH	Intenzita světla	Fixace CO ₂	
							[g.l ⁻¹ .d ⁻¹]	[%]
Otevřený kultivační systém	8 l	<i>Spirulina platensis</i>	10	30	10	30*	-	39
Bublinová kolona	0,8 l	<i>Chlorella</i> sp.	15	26	-	300*	17,2	16
	1,6 l	<i>Chlorella</i>	0,2	-	9	40* – 50*	1,53	74
	8 l	<i>vulgaris</i>	5	30	7,2	3500**	0,252	-
	8 l	<i>Spirulina platensis</i>	5	30	9	3500**	0,319	-
Pneumaticky míchaný bioreaktor	4 l	<i>Chlorella</i> sp.	10	26	-	300*	-	63

*[μmol.m⁻².s⁻¹]; **[lux]

Dalším problémem je kromě vysokých teplot a koncentrací CO₂ také přítomnost NO_x, SO_x a dalších nečistot. Vysoké teploty odpadního plynu lze řešit vhodným výběrem druhů řas, které tolerují vysoké teploty. Některé druhy řas dokáží růst i při teplotách okolo 60 °C. NO_x (odpadní plyn obsahuje zejména NO a NO₂) v odpadních plynech je řasami použit jako zdroj dusíku. Pokud je ale jeho koncentrace příliš vysoká, dochází k poklesu rychlosti růstu a se zvyšující se koncentrací může docházet i k poklesu objemu biomasy. Přítomnost SO_x snižuje hodnotu pH v důsledku tvorby siřných kyselin [46],[47],[48].

Vedle obsahu těchto látek obsahují odpadní plyny také dalších téměř 140 různých složek. Mezi nimi jsou například těžké kovy nebo halogenové kyseliny. Z těžkých kovů, obsažených v odpadních plynech, má největší význam rtuť. Ta má negativní dopad na růst řas již při nízkých koncentracích, kdy snižuje v buňkách obsah chlorofylu. Existují ale také druhy, které dokáží rtuť v určitých koncentracích tolerovat a z plynu odstraňovat. Řasy dokáží vázat řadu těžkých kovů, jako je měď, kobalt, nikl, zinek nebo olovo, viz tab. 7 [47]. Schopnost řas, pohlcovat těžké kovy, závisí na koncentraci daného kovu. S rostoucí koncentrací těžkého kovu klesá účinnost a také množství odstraněných iontů. Vyšší účinnosti se tedy dosáhne při nižších koncentracích. Například *Chlorella vulgaris* je schopna odstranit 69 % Ni (II) za koncentrace

2,5 mg.l⁻¹, ale při jejím čtyřnásobném zvýšení kleslo odstraněné množství na 37 %. Koncentrace biomasy také významně ovlivňuje množství odstraněných iontů a to tak, že s rostoucí koncentrací biomasy roste množství odstraněných iontů. Dále je biosorpce ovlivněna také koncentrací jiných kovů, hodnotou pH, teplotou a druhem řasy [52].

Tab. 7 Schopnost biosorpce řas [52],[53]

Druh řasy	Těžký kov	Odstraněné množství [mg.g ⁻¹]
<i>Scenedesmus incrassatulus</i>	Cr (VI)	4,40
<i>Scenedesmus obliquus (ACO1598)</i>	Zn (II)	429,6
<i>Chlorella miniata</i>	Cr(III)	41,12
	Ni (II)	1,37
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cu (II)	89,19
	Ni(II)	23,47
	U (VI)	26,60
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Pb (II)	96,30
	Cd (II)	42,60
	Hg (II)	72,2
	Cr (VI)	18,20
<i>Planothidium lanceolatum</i>	Zn (II)	118,66
<i>Pseudochlorococcum typicum</i>	Hg (II)	15,13
	Pb (II)	4,49
<i>Spirulina platensis</i>	Cd (II)	44,56
	Cu (II)	0,85

Tolerance řas na obsah NO_x a SO_x je různá v závislosti na druhu. Například *Chlorella* sp. T-1 toleruje koncentraci SO_x 20 mg.l⁻¹ a NO_x 60 mg.l⁻¹ při koncentraci CO₂ 15 %. Řasa *Tetraselmis* sp. dokáže růst za koncentrace SO_x 185 mg.l⁻¹, NO_x 125 mg.l⁻¹ a 14,1 % CO₂. *Nannochloropsis* sp. byla testována za koncentrace CO₂ 15 % a 50 mg.l⁻¹ koncentrace SO₂, která neměla negativní dopad na její růst. Ovšem při osminásobku SO₂ byl růst zastaven během několika hodin. Tolerance dalších druhů k teplotě, koncentraci SO_x, NO_x a CO₂ jsou uvedeny v tab. 8 [19],[46],[50].

Tab. 8 Tolerance řas k daným parametrům [46]

Druh řasy	Max. teplota [°C]	Max. CO₂ [%]	Max. SO_x [mg.l⁻¹]	Max. NO_x [mg.l⁻¹]
<i>Cyanidium caldarium</i>	60	100	-	-
<i>Synechococcus elongates</i>	60	60	-	-
<i>Monoraphidium minutum</i>	25	13,6	200	150
<i>Euglena gracilis</i>	-	45	-	-
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	-	15	-	1000

5 TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY VHODNÉ PRO KULTIVACI ŘAS

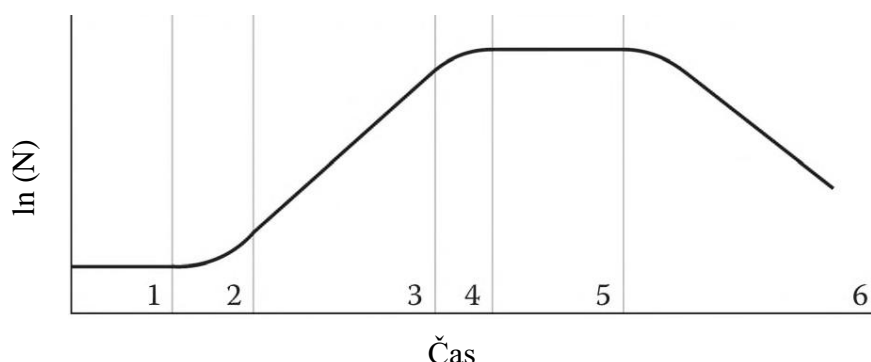
Technologické podmínky a jejich dodržování během kultivace je nezbytným kritériem k úspěšnému získání požadovaných produktů. Pokud by některý z parametrů byl necíleně změněn nebo nedodržen, vedlo by to k nežádoucímu dopadu na složení celé biomasy a tím pádem by došlo k ovlivnění kvality i kvantity produktu. U bioreaktoru je požadováno, aby byl schopen vytvářet optimální podmínky pro kultivaci a regulovat je. Prosperita buněk závisí na mnoha parametrech, jako je teplota, pH, hustota a další. Různé druhy řas mají rozdílné požadavky na tyto parametry. Mezi nejznámější kultivované rody řas patří *Chlorella* a *Spirulina* [26].

Kultivační metody, které se používají ke kultivaci mikrořas jsou:

- fotoautotrofní metoda
- heterotrofní metoda
- mixotrofní metoda [28]

Při fotoautotrofní kultivaci je zdrojem uhlíku anorganický uhlík a zdrojem energie je světlo. Heterotrofní kultivace spočívá ve schopnosti použít jako zdroj uhlíku organický uhlík a to za přítomnosti světla nebo také bez něj. Další možností kultivace je mixotrofní metoda. Ta kombinuje principy předchozích dvou metod. Řasy tedy během kultivace využívají organické zdroje uhlíku i anorganické. Tento způsob kultivace také dovoluje buňkám růst i bez přítomnosti světelného zdroje energie. Nejběžněji se jako zdroj uhlíku používá oxid uhličitý a hydrogenuhličitany. Pokud se použijí organické zdroje uhlíku pro kultivaci, je nutno počítat s vysokou cenou výsledných produktů. Nejlepším způsobem kultivace je fotoautotrofní metoda, protože s ní můžeme snížit emise oxidu uhličitého a využít tak i odpadní produkt, jako např. spaliny, na tvorbu nových produktů [28].

V závislosti na způsobu doplňování živin lze kultivaci rozdělit na vsádkovou („batch“) a kontinuální („continuous“). Při kontinuální kultivaci jsou živiny přiváděny do bioreaktoru a zároveň dochází k odvodu produktu. Ve vsádkové kultivaci se vše dodá do bioreaktoru na počátku kultivace a během kultivace už se žádné další živiny nedodávají. Vsádková kultivace se používá ke zvýšení počtu buněk, které potřebujeme k zahájení procesu kultivace v bioreaktoru. Růst populace při vsádkové kultivaci lze znázornit růstovou křivkou [54].



Obr. 16 Růstová křivka při vsádkové kultivaci [12]

První část růstové křivky se nazývá lag fáze (1). V této fázi se buňky adaptují na nové prostředí a začínají růst. Následuje fáze zvaná akcelerace (2). Během této fáze buňky dosáhnou

postupně maximální možné rychlosti růstu. Hustota buněk roste v závislosti na čase podle rovnice:

$$N_2 = N_1 e^{\mu(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

kde N_2 a N_1 jsou počty buněk v časech t_2 a t_1 a μ je tempo růstu. Tempo růstu, dosažené při fázi akcelerace, zůstává konstantní během tzv. exponenciální fáze (3). Na tuto fázi navazuje fáze zpomalení (4), ve které tempo růstu klesá v důsledku limitace růstu buněk a velikost populace stále roste. Během následující stacionární fáze (5), která začíná bodem, kdy je rychlost růstu nulová, se velikost populace nemění. Poslední fázi (6) provází v důsledku koncentrace metabolitů a nedostatku živin zmenšování populace [12].

V některých případech se při vsádkové kultivaci využívá i možnost přívodu dalších živin („fed-batch“). Jednou z možností, jak využít doplňování živin u vsádkové kultivace, je vyjmutí části biomasy na konci fáze exponenciálního růstu a doplnit bioreaktor médiem. Tato jednoduchá strategie může být několikrát zopakována. Při přítokové kultivaci se neplní celý objem bioreaktoru, ale nechává se z 20 až 40% volného objemu. Tato metoda zaručuje vyšší hustotu buněk než kultivace vsádková [54].

5.1 Teplota

Teplota má při kultivaci dopad na velikost buněk, rychlost růstu, biochemické složení i na požadavky buňky na živiny. V závislosti na teplotním rozsahu, který organismy k životu preferují, se rozdělují na:

- Psychofilní (rostou při teplotách pod 20 °C)
- Mezofilní (rostou při teplotách mezi 20 °C a 50 °C)
- Termofilní (rostou při teplotách nad 50 °C) [55]

Důsledek vlivu teploty na rychlost chemické či enzymatické reakce popisuje např. Arrheniova rovnice:

$$\mu = A \cdot e^{(-E_a/RT)}, \quad (3)$$

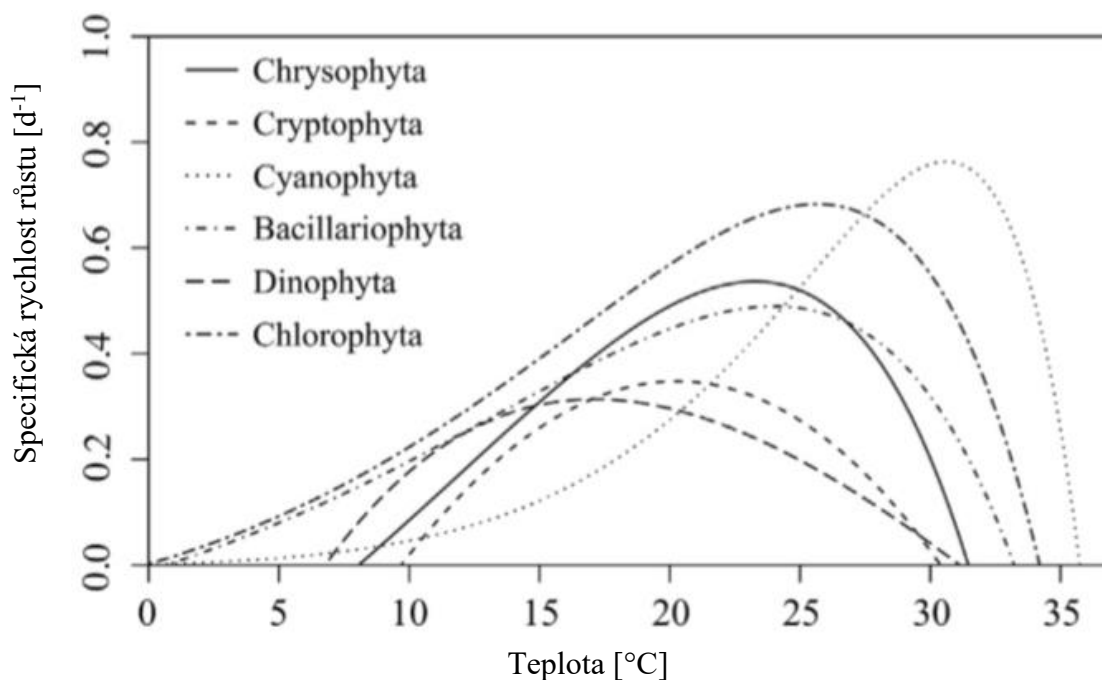
$$k_d = A' \cdot e^{(-E_d/RT)}, \quad (4)$$

kde μ je rychlost růstu, A , A' je frekvenční faktor, E_a je aktivační energie k započetí růstu buněk a E_d je aktivační energie k úmrtí buněk. Rychlost růstu lze také vyjádřit pomocí rovnice:

$$\frac{dX}{dt} = (\mu - k_d) \cdot X, \quad (5)$$

kde X je koncentrace buněk, t je čas, μ je rychlost růstu a k_d je rychlost úmrtí buněk [26].

Tempo růstu buněk v závislosti na teplotě je u každého druhu odlišné. Jak se liší závislosti růstu na teplotě různých skupin řas lze vidět na obr. 17. Rozmezí teplot, při kterém dochází k růstu buněk, je větší v oblasti pod optimální teplotou a nad touto teplotou je rozmezí menší. Teploty nacházející se nad t_{opt} vytvářejí stres a příliš vysoká kultivační teplota má za následek letální účinky. Pokud je teplota pod optimální kultivační teplotou pro daný mikroorganismus, růst je pomalejší [26],[56].



Obr. 17 Srovnání závislosti specifické rychlosti růstu na teplotě pro vybrané skupiny řas [56]

Za podmínek, které nejsou pro buňky řas ideální, dochází k poklesu využití uhlíku a dusíku. Teplota má také zásadní vliv na tvorbu karotenoidů. Produkce karotenoidů se zvyšuje s rostoucí teplotou, protože se s vyšší teplotou zvýší oxidační účinek a nebezpečí světelného poškození. Teplota také ovlivňuje obsah lipidů a mastných kyselin v buňkách. Řasy po vystavení teplotám, které jsou mimo jejich optimální rozptyl, vyžadují vyšší příjem živin než při růstu za optimálních teplot. Dochází tak k nárůstu objemu buněk. Nižší teploty snižují tekutost membrány, proto se tomu buňky snaží zabránit a zvyšují obsah nenasycených mastných kyselin. Tekutost membrán se tak obnoví. Naopak při vyšších teplotách se zvyšuje tuhost buněčné membrány. Nenasycené mastné kyseliny v membránách za nízkých teplot přispívají k ochraně před fotoinhibicí. Vyšší teploty mají za následek tvorbu kyslíkových radikálů v buňkách řas a to indukuje tvorbu karotenoidů [55],[56],[57].

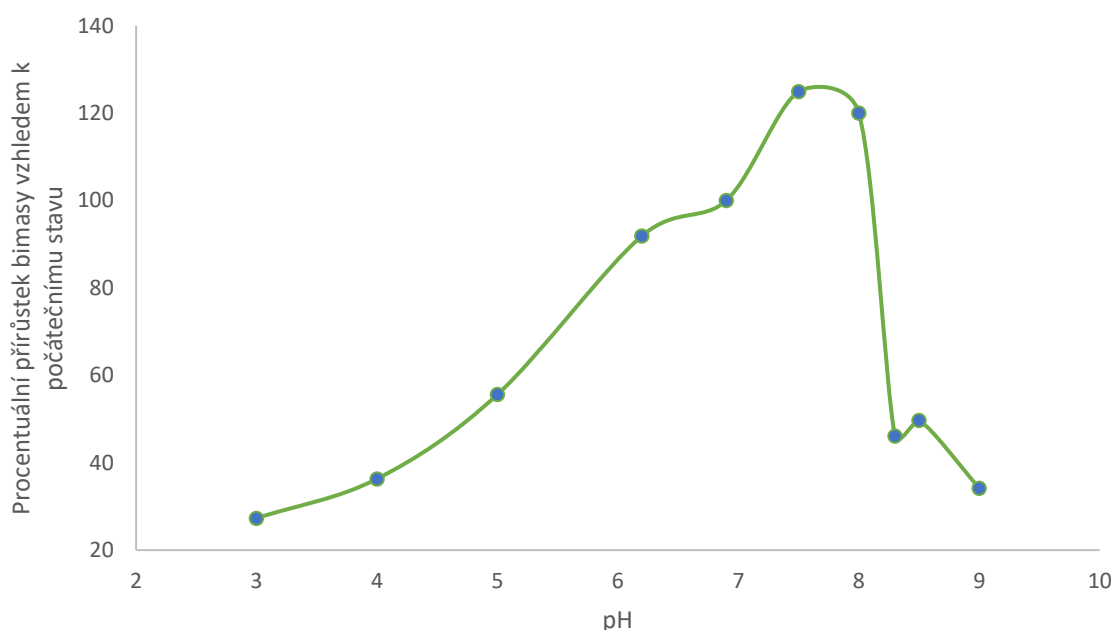
Vliv zvýšené teploty byl například pozorován u řasy *Chlorococcum* sp., kdy byl zdvojnásoben obsah karotenoidů (z 4,4 mg.g⁻¹ na 8,4 mg.g⁻¹) za zvýšení teploty z 20 °C na 35 °C. Při kultivaci řasy *Chlorella vulgaris* byla produkce lipidů negativně ovlivněna zvýšením teploty z 25 °C na 30 °C, kdy jejich podíl na celkové suché hmotnosti klesl z 14,7 % na 5,9 %. U řasy *Scenedesmus obliquus* bylo experimentálně zjištěno, že změnou optimální teploty (25,6 °C) na teplotu 25 °C a 30 °C, se dosáhne nejvyšší produkce mastných kyselin [55],[56],[57].

Optimální teplota pro kultivaci mikrořas se obecně pohybuje v rozmezí od 15 °C do 30 °C. Tuto skutečnost je možné ověřit na teplotní závislosti na obr. 17. Bylo zjištěno, že řasy rodů *Chlorella*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Scenedesmus*, *Spirogyra*, *Chlamydomonas*, *Botryococcus*, *Haematococcus*, *Ulva* jsou schopny růst v teplotním rozsahu od 20 °C do 30 °C. Za optimální teplotu kultivace řas rodu *Chlorella* a *Scenedesmus* se považuje teplota 25 °C, ale jsou schopny růst v teplotním rozmezí 5 °C až 35 °C [20],[36],[58].

5.2 pH

Během kultivace buňky spotřebovávají živiny z média a vylučují metabolity, což ovlivňuje výslednou hodnotu pH. Hodnota pH ovlivňuje složení produkované biomasy i délku životního cyklu řas. Má vliv také na vstřebávání oxidu uhličitého, živin, vnitrobuněčné funkce a buněčnou stěnu [36],[33].

Některé druhy rostou nejlépe s hodnotou pH kolem 7, jiné upřednostňují vyšší pH (*Spirulina* preferuje pH=11) nebo i nižší hodnoty (*Chlorococcum* pH=4). Optimální pH pro kultivaci většiny mikrořas se pohybuje v rozmezí 6 až 10. Dokonce i druhy stejného rodu mají odlišné nároky na pH. *Chlorella* sp. má vyšší obsah lipidů v mírně alkalickém prostředí. Důsledkem vyššího pH ale zároveň klesá objem vyprodukované biomasy. Závislost vyprodukované biomasy na hodnotách pH lze vidět na grafu níže. Bylo zjištěno, že *Chlorella vulgaris* roste nejlépe v podmínkách, za kterých pH nabývá hodnot 7 až 8. Při pH 7,5 dosahoval nárůst biomasy hodnoty 124,9 %. Příliš kyselé pH vedlo ke zhoršenému růstu, kdy při pH 3 byl přírůstek biomasy pouze 27,3 %. V hodnotách pH, které překročily zmíněný interval optimálních hodnot pH potom růst biomasy zpomaloval a při pH 9 dosáhl hodnoty 34,2 % [28],[36],[59].



Obr. 18 Vliv hodnoty pH na růst řasy *Chlorella vulgaris* [59]

5.3 Oxid uhličitý

CO₂ je nedílnou součástí fotosyntetického procesu a zdroj syntézy organického uhlíku. Pro přeměnu oxidu uhličitého karboxylací na organický uhlík je důležitý enzym RUBISCO [60].

Jako zdroj uhlíku se používá kromě CO₂ také metanol, acetát, nebo glukóza. Zdroj uhlíku se volí v závislosti na tom, jestli se jedná o fotoautotrofní (CO₂, bikarbonáty), heterotrofní (organický uhlík) nebo mixotrofní kultivaci [28].

Rozpustnost CO₂ ve vodním prostředí je závislá na době, kterou je plyn v kontaktu s vodním prostředím a na mezifázové ploše. Rozpustnost tedy můžeme ovlivnit velikostí a rychlostí bublin CO₂. Médium je při kultivaci běžně provzdušňováno vzduchem se zvýšeným obsahem

CO₂ s obsahem 2 až 5 % CO₂. Pokud řasy nemají dostatek CO₂, začnou využívat jako zdroj uhlíku karbonáty a bikarbonáty a zvýší se hodnota pH. Proto je důležité udržovat stálý přísun CO₂, aby nedocházelo k fluktuaci pH. Při příliš vysokých koncentracích CO₂ řasy nedokáží spotřebovat veškeré množství dodávaného CO₂ a ten se proměňuje na HCO₃. To vede ke snížení pH [28].

Tab. 9 Fixace CO₂ u nejběžněji kultivovaných druhů řas [28]

Druh kultivované řasy	Množství spotřebovaného CO ₂ (mg.l ⁻¹ .d ⁻¹)
<i>Chlorella vulgaris</i>	251
<i>Spirulina platensis</i>	318
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	272
<i>Chlorococcum littorale</i>	900

Množství oxidu uhličitého, které jsou řasy schopny spotřebovat je závislé na kultivačních podmínkách, např. na koncentraci CO₂ ve zdroji provzdušňování. Při koncentraci 15 % bylo dosaženo u řasy *Chlorella vulgaris* fixace CO₂ 624 mg.l⁻¹.d⁻¹ naopak při nízké koncentraci CO₂ 0,03 % výsledná fixace činila 75 mg.l⁻¹.d⁻¹. Při této nízké koncentraci byla poté aplikována limitace dusíkem a fixace CO₂ se ještě snížila na 45 mg.l⁻¹. Pro řasu *Chlorella vulgaris* je uvedena optimální koncentrace CO₂ ve zdroji provzdušňování pro kultivaci 6 % [28].

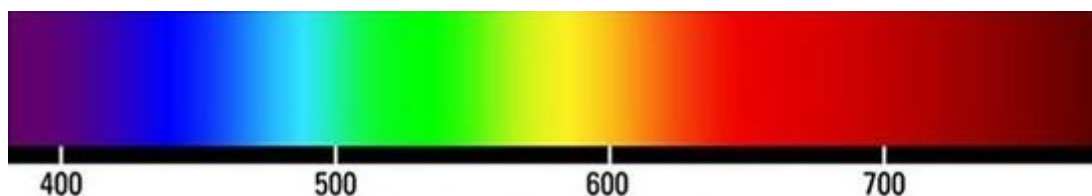
5.4 Světlo

Světlo je elektromagnetické záření, které je tvořeno fotony. Jejich energie se vyjadřuje pomocí Planckovy konstanty (h):

$$E = hc\lambda^{-1}, \quad (6)$$

kde c je rychlost světla a λ je vlnová délka fotonu. Z tohoto vztahu plyne, že je potřeba vyšší počet fotonů, které tvoří delší vlnovou délku, než fotonů s tvorbou kratších vlnových délek. energii lze vyjadřovat v joulech [J] nebo také v elektronvoltech [eV] [12].

Světlo je nezbytnou součástí fotosyntézy. Fotosynteticky aktivní záření leží v rozmezí vlnových délek 400-700 nm. Viditelná část spektra je pro srovnání přibližně od 390 nm do 780 nm [30].

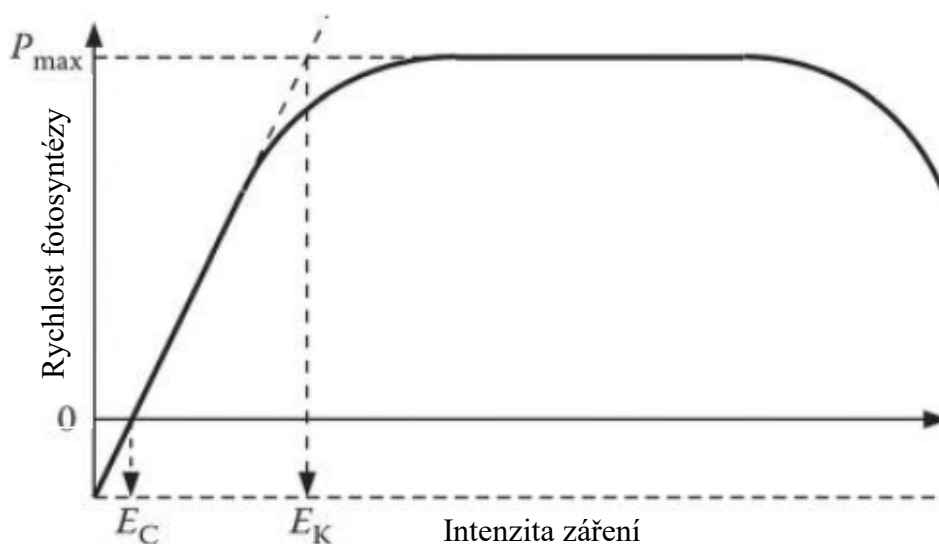


Obr. 19 Vlnové délky viditelného spektra barev v nanometrech [61]

Vztah mezi světlem a fotosyntézou lze znázornit křivkou na obr. 20. Na něm lze pozorovat tři části. První část zobrazuje omezení fotosyntézy množstvím světla, druhá zobrazuje průběh fotosyntézy bez omezení světlem a třetí úsek znázorňuje omezení fotosyntézy v důsledku světelného záření. Rychlost fotosyntézy lze sledovat pomocí měření rychlosti fixace uhlíku a intenzita záření vychází ze vztahu:

$$E = \frac{d\Phi}{ds}, \quad (7)$$

kde Φ [W] je zářivý tok a S [m²] je plocha, na kterou zářivý tok dopadá. V jednotkách se může vyjádřit také jako molární množství fotonů dopadající na danou plochu za určitý čas [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]. E_c představuje tzv. světelný kompenzační bod, ve kterém je množství vázaného uhlíku během fotosyntézy rovno jeho výdeji při dýchání. E_k je bod, který představuje optimální intenzitu záření. Nad tímto bodem buňky produkují více ATP a NADPH, než jsou schopny spotřebovat a nedochází tak už k nárůstu rychlosti fotosyntézy. Pokud by byly buňky přesto vystaveny nadměrnému záření, začala by rychlost fotosyntézy klesat. To je označováno jako fotoinhibice [12].



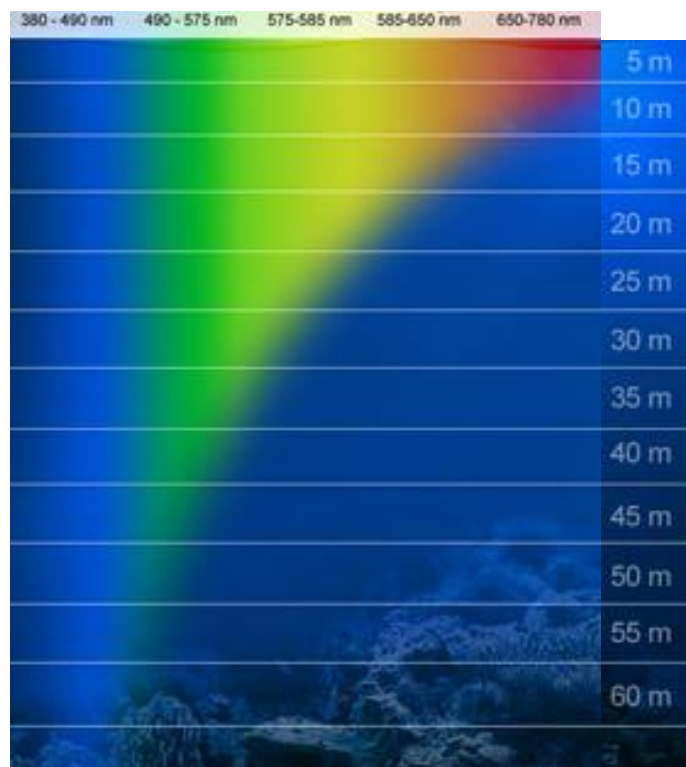
Obr. 20 Závislost rychlosti fotosyntézy na světle [12]

V reaktoru jsou přítomny všechny části výše zmíněné křivky. Tedy oblast, kde světlo způsobuje inhibici, oblast saturace a oblast limitace. Z toho důvodu je potřeba, aby byl reaktor dobře promícháván. Buňky budou těmito oblastmi cirkulovat a zamezí se tak nepříznivým dopadům světla na kultivaci [62].

Vodním sloupcem se světlo šíří rozdílnými rychlostmi v závislosti na vlnové délce. Infračervené světlo (700 – 4000 nm) se šíří nejpomaleji. Nejlépe prostupuje vodním sloupcem světlo o vlnové délce 450 – 550 nm. Tento jev lze pozorovat na obr. 21. Závislost šíření světla na hloubce popisuje vztah vyjádřený z Lambert-Beerova zákona:

$$I_z = I_0 e^{-kz}, \quad (8)$$

kde I_z je intenzita světla v hloubce z , I_0 je intenzita světla na povrchu a k je absorpční koeficient [12].



Obr. 21 Šíření světla vodním sloupcem [63]

Kromě intenzity světla je také při osvětlení důležitý cyklus světla a tmy. Během osvětlení může docházet k poškození buněk a toto poškození dokáží řasy opravit během temné fáze. Nejběžněji se při kultivaci používají cykly světlo/tma: 24:0, 16:8, 12:12. Bylo zjištěno, že pokud je složka temné fáze větší než 50 %, klesá efektivita fotosyntézy. Každý druh řasy ale reaguje na různé režimy osvětlení odlišným způsobem. Nepřetržité osvětlení působí na některé druhy řas nepříznivě (může vést až ke smrti buněk) [64],[65]. Byly provedeny experimenty, kdy se porovnávalo nepřetržité osvětlení a frekvence cyklu světlo/tma. Došlo se k závěru, že střídáním světla a tmy se se zvyšováním frekvencí cyklu zvýší rychlost fotosyntézy. Díky střídání světla a tmy se také sníží riziko fotoinhibice. Důsledky intermitentního osvětlení lze pozorovat v tab. 10 [50],[66].

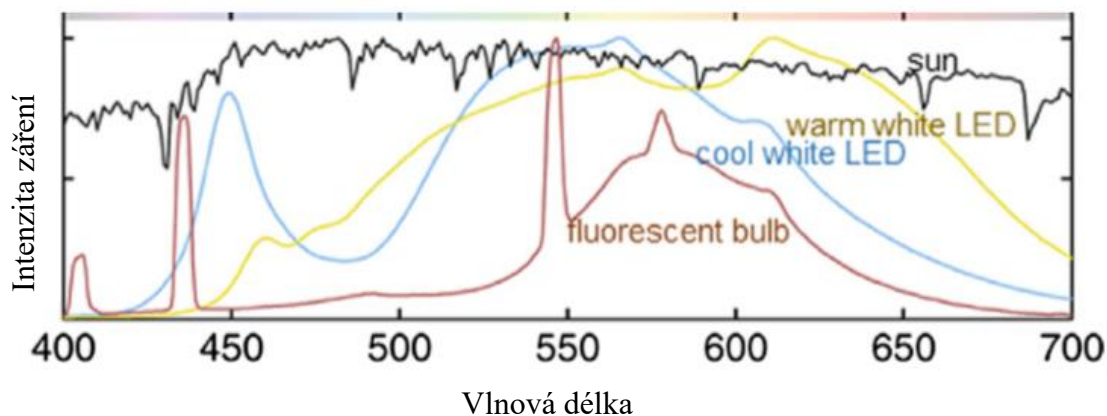
Tab. 10 Důsledky intermitentního osvětlení [66]

Druh řasy	Důsledky
<i>Dunaliella salina</i>	Při frekvencích 10 až 50 Hz dosažení rychlejšího růstu
<i>Spirulina platensis</i>	Při frekvencích 0,1 až 20 Hz dosažení rychlejšího růstu
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Při frekvenci 1 Hz dosaženo vyšší koncentrace astaxantinu
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Při frekvenci 100 Hz dosažení rychlejšího růstu

Pokud dojde během kultivace ke změně světla, nastane změna intenzity nebo vlnové délky světla, reaguje na to buňka tzv. fotoaklimací. Ta může probíhat několik vteřin nebo i dní [30].

Chlorofyl *a* dosahuje maximálního pohlcování světla při vlnové délce 430 nm a 675 nm, chlorofil *b* při 445 nm a 645 nm. Další chlorofyly a nejlépe pohlcované vlnové délky lze vidět v tab. 11. Karotenoidy dosáhnou maxima při vlnové délce 420 až 490 nm. Fotosyntetická aktivita je menší v oblasti nižších vlnových délek. Červené světlo je tak z energetického hlediska výhodnější než modré [12],[67].

Při kultivaci je možné použít přírodní světlo, umělé osvětlení nebo také jejich kombinaci. Každý zdroj světla má rozdílné složení vlnových délek. Rozdíl mezi nimi je znázorněn na obr. 22 [62],[66].



Obr. 22 Vlnové délky různých zdrojů světla [30]

Tab. 11 Nejlépe pohlcované frekvence světla jednotlivými chlorofyly [12]

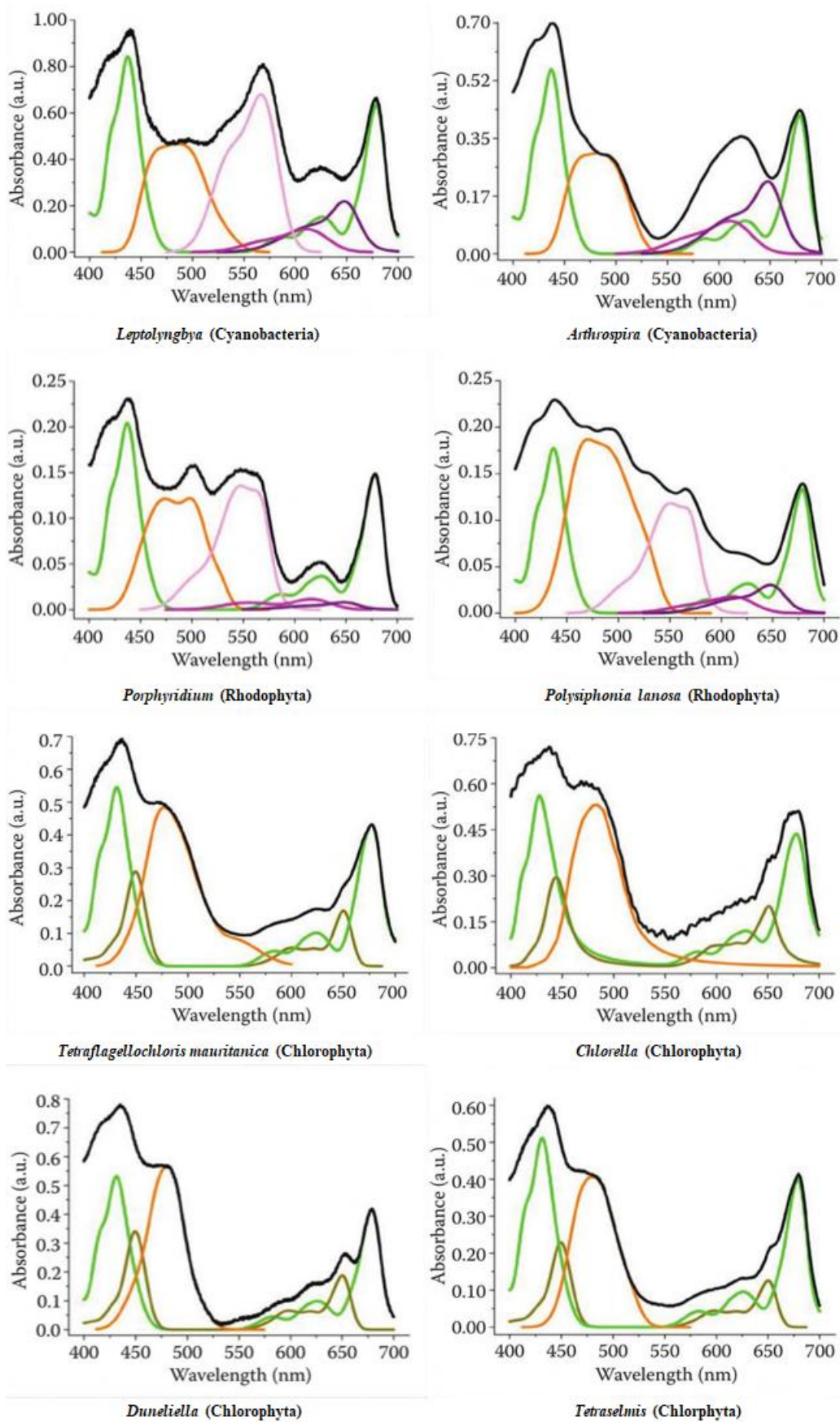
Chlorofyly	Vlnová délka světla [nm]
a	430; 675
b	445; 645
c ₁	460
c ₂	470
d	400; 450; 700
f	410; 710

chlorofyl a

fykobilproteiny

chlorofyl b

karotenoidy a xantofyly



Obr. 23 Absorpce světla fotosynteticky aktivních částí řas [12]

5.5 Smykové napětí

Smykové napětí může mít na řasy vliv stimulační, omezovací nebo také destrukční. Faktory, které ovlivňují sensitivitu buněk na smykové napětí jsou: druh řasy, složení a tloušťka buněčné stěny, velikost a morfologie buněk, podmínky, ve kterých buňka žije nebo intenzita smykového napětí. Smykové napětí dokáže ovlivnit, jakým způsobem bude buňka růst a má tedy vliv na konečné složení kultivované biomasy. Citlivost řas na smykové napětí se liší v závislosti na druhu [33].

Smykové napětí lze vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$\tau = \gamma \cdot \mu, \quad (9)$$

kde je τ smykové napětí [Pa], γ je smyková rychlost [s^{-1}] a μ je viskozita [Pa.s]. Vzniká během míchání a způsobují ho malé víry, které mají velikost přibližně stejnou jako buňky mikrořas nebo i menší [68].

Při kultivaci je do reaktoru přiváděn také plyn, který je důležitý z hlediska transportu CO_2 , odstraňování O_2 nebo míchání. Smykové napětí vzniká při prasknutí bublin. Pokud je použito k míchání čerpadlo, vzniká smykové napětí při vysokých otáčkách rotoru čerpadla. Toto napětí je řádově vyšší než napětí, které vzniká v mechanicky míchaných reaktorech [68].

Byla provedena řada experimentů, která se zabývala citlivostí buněk na smykové napětí. Při nich bylo zjištěno, že smykové napětí způsobuje zhoršenou vitalitu buněk, delší čas nutný pro jejich zotavení, snížení rychlosti růstu, redukovanou fotosyntetickou aktivitu a lyzi buněk. Byly zjišťovány hodnoty kritického smykového napětí, při kterých docházelo k poškození buněk. Výsledky těchto experimentů můžete vidět v tab. 12. Kritické smykové napětí je závislé na druhu mikrořasy, kultivačních podmínkách a na původu smykového napětí [68].

Tab. 12 Výsledky experimentů ke zjištění kritických smykových napětí [68]

Druh řasy	Kritické smykové napětí [Pa]	Rozsah testovaných smykových napětí [Pa]	Testovaný rozsah průtoku plynu [vvm]	Kritický průtok plynu [vvm]	Použité testovací zařízení
<i>Chlorella vulgaris</i>	0,900	0 – 3,660	-	-	Míchaný bioreaktor (2,8 L)
	-	-	0,12 – 0,190	> 0,160	Probublávaná kolona (56 L)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	0,900	0 – 3,660	-	-	Míchaný bioreaktor (2,8 L)
	-	-	0,175 – 1,340	> 1,340	Panelový bioreaktor (45 L)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	0,200	0 – 3,660	-	-	Míchaný bioreaktor (2,8 L)
	-	-	0 – 0,280	> 1,340	Probublávaná kolona (0,3 L)

<i>Synechocystis</i> <i>sp.</i>	> 0,114	0 – 0,114	-	-	Míchaný bioreaktor (0,15 L)
<i>Spirulina</i> <i>platensis</i>	-	-	0,2 – 2,500	> 2,500	Probublávaná kolona (20 L)

5.6 Míchání

V přírodních podmínkách se mikrořasy vyskytují v hustotě přibližně 10^3 buněk na 1 ml s mezibuněčnou vzdáleností 1 mm. Při kultivacích však může hustota buněk nabývat hodnot okolo 10^9 buněk na 1 ml. Existuje několik metod míchání, které závisejí na vybraném kultivačním bioreaktoru [69]. Rozlišuje se mechanické míchání, míchání pomocí čerpadla a pomocí plynu. Míchání pomocí čerpadel nabízí vysokou efektivitu míchání, ale dochází k omezenému přenosu plynu. Při průchodu čerpadlem jsou mikrořasy namáhány smykovým napětím. To roste v závislosti na rychlosti čerpadla. Mechanické způsob míchání je efektivní a zajišťuje dobrý přenos plynu. Jeho provoz ale vytváří napětí [19].

Pro zamezení usazování buněk je míchání nezbytné. Závisí na něm přenos živin a odvádění kyslíku. Je jím ovlivněna také délka a intenzita světla dopadajícího na buňky řas. Na míchání má vliv mnoho faktorů. Závisí na něm správné měření teploty, pH, hustoty. Zajištění dostatečného míchání je obtížnější s rostoucím objemem bioreaktoru. Pokud bychom stále zvyšovali rychlost míchání, dostaneme se k bodu, kdy dojde vlivem smykových napětí k mechanickému poškození buněk [26].

5.7 Limitace změnou kultivačních podmínek

Limitace je omezení přístupu buněk ke všem dostupným zdrojům, které potřebuje ke svému růstu. Limitační neboli stresové faktory jsou důležité z hlediska produktů, které buňka vytváří na základě dostupných zdrojů. Lze tak například ovlivnit množství lipidů a sacharidů. Buňka potřebuje ke svému růstu vedle zdroje energie a uhlíku také makroživiny (N, P), mikroživiny (S, Fe, Mg, Ca, K, Cl) a stopové prvky (B, Cu, Mn, Zn, Mo, Co, V, Se) [24],[12]. Dusík je v kultivačním médiu běžně přítomen jako NO_3 , NO_2 nebo NH_4 . Pokud by byl jako jediný zdroj dusíku používán amoniak, došlo by během kultivace k významnému snížení pH v důsledku uvolněných vodíkových iontů. Fosfor má zase podobu HPO_4 a H_2PO_4 [48],[57].

Regulace růstu buněk na základě limitujícího faktoru se nazývá zákonem minima. Omezením přísunu makroživin se dosáhne vyšší produkce sacharidů a lipidů. Ke zvýšení obsahu lipidů v buňkách řas se používá zejména omezení zdroje dusíku. Hmotnostní podíl lipidů při kultivaci řasy *Chlorella vulgaris* vzroste o více než 10 % při redukci koncentrace dusíku o 75 % [12],[24].

Limitace fosforem způsobuje také vyšší produkci lipidů. Při jeho nedostatku se snižuje množství bílkovin a chlorofylu *a*. Také klesá rychlost růstu, zvyšuje se produkce astaxantinu a roste obsah sacharidů. Obsah lipidů u řasy *Scenedesmus* sp. byl zvýšen z 23 % na 53 % při změně koncentrace fosforu z 2 mg.l^{-1} na $0,1 \text{ mg.l}^{-1}$. Limitace fosforem má za následek úbytek chlorofylu *a* a bílkovin. Zároveň dojde k přírůstku sacharidů [55].

Stopové prvky a mikroživiny mohou být také použity k limitaci. Jejich nedostatek vede ke zpomalení růstu buněk. Limitace železem způsobuje nedostatek ferredoxinu a chlorofylu. Při zvýšeném množství železa bylo dosaženo u řasy *Chlorella vulgaris* zvýšeného množství lipidů v biomase. Pokud je ale jeho koncentrace příliš vysoká, působí na buňky toxicky. Jeho nedostatek vede také k poklesu obsahu karotenoidů. Toxicita prvků, jako je železo, měď nebo

nikl, je závislá na pH. U řasy *Scenedesmus quadricauda* je toxicita mědi při pH 6,5 téměř osmdesátkrát vyšší než při pH 5 [55].

Faktory, které ovlivňují kultivační proces, se mohou ovlivňovat navzájem. Například při studiu řasy *Chlorella pyrenoidosa* bylo prokázáno, že lépe využívá světlo při vyšších teplotách než při teplotách nižších [55].

Tab. 13 Limitace růstu řas a jejich následky [55]

Měněné podmínky	Druh řasy	Změna kultivačních podmínek	Následek
Teplota	<i>Chlorella vulgaris</i>	zvýšení z 20 na 38 °C	nižší obsah škrobu
	<i>Haematococcus pluvialis</i>	zvýšení z 20 na 35 °C a limitace dusíkem	zvýšení produkce astaxantinu
Světlo	<i>Dunaliella viridis</i>	žádné světlo	zvýšení obsahu lipidů
	<i>Chlorella vulgaris</i>	červené světlo	zvýšení obsahu škrobu
		modré světlo	zvýšení obsahu lipidů
pH	<i>Coccochloris peniocyctis</i>	snížení pH ze 7 na 5	zhoršená schopnost příjmu uhlíku
Dusík	<i>Haematococcus pluvialis</i>	limitace dusíkem	zvýšení produkce karotenoidů na 13 % such. hm.
	<i>Nannochloropsis oculata</i>	limitace dusíkem (75 % snížení koncentrace dusíku)	zvýšení produkce lipidů z 8 % na 15 %
Fosfor	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	limitace fosforem	snížení obsahu fosfatidylglycerolu
	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	limitace fosforem	snížení obsahu chlorofylu a, snížení obsahu bílkovin, zvýšení obsahu sacharidů a lipidů
Železo	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	limitace železem	snížení obsahu chlorofylu
	<i>Haematococcus pluvialis</i>	zvýšená koncentrace železa	zvýšení obsahu karotenoidů
Uhlík	<i>Dunaliella salina</i>	zvýšení koncentrace uhlíku ze 2 % na 10 %	30 % nárůst such. hm. obsahu mastných kyselin za 1 den
	<i>Spirulina platensis</i>	zvýšená koncentrace CO ₂	zvýšení obsahu sacharidů, snížení obsahu bílkovin a pigmentů

6 KULTIVAČNÍ BIOREAKTORY

Kultivační bioreaktory jsou uzavřené systémy, ve kterých můžeme kontrolovat podmínky, za kterých dochází k růstu biomasy, jako jsou živiny, teplota, světlo a jeho intenzita, pH aj. Díky uzavřenému systému nedochází ke kontaminaci bioreaktoru [70].

Existují také otevřené systémy, které nejsou tak nákladné jako uzavřené systémy. Nemůžeme u nich ale ovlivňovat teplotu vody, osvětlení a dochází u nich k vypařování. Kvůli nízkému využití oxidu uhličitého mají tyto systémy nízkou hustotu média a produktivitu [70].

Tab. 14 Porovnání otevřených systémů a kultivačních bioreaktorů [33]

Porovnávaná vlastnost	Otevřené systémy	Uzavřené bioreaktory
Riziko kontaminace	Velmi vysoké	Nízké
Prostorová náročnost	Vysoká	Nízká
Ztráta vody	Velmi vysoká	Zanedbatelná
Ztráta CO ₂	Vysoká	Zanedbatelná
Možnosti výběru kultivovaných druhů	Omezený počet druhů	Mohou být kultivovány téměř všechny mikrobiální druhy
Kvalita biomasy	Špatně ovlivnitelná	Dobře ovlivnitelná
Opakovatelnost procesu	Silně závislá na vnějších podmínkách	Je možná
Standardizace	Není možná	Je možná
Pružnost produkce	Velmi obtížná změna kultivovaného druhu	Snadná změna
Závislost na počasí	Velmi vysoká	Zanedbatelná
Produkční doba	Průměrně 6 až 8 týdnů	Průměrně 2 až 4 týdny
Efektivita procesu	Nízká	Vysoká
Hustota biomasy	Nízká (0,1 až 0,2 g/l)	Vysoká (2 až 8 g/l)

Před uvedením bioreaktoru do provozu je nezbytná jeho příprava. Ta se skládá z čištění, sterilizace a opatření reaktoru potřebnými přístroji. Čištěním je myšleno odstranění usazenin po delším provozu zařízení. Provádění této operace důležité pro ochranu povrchů, které jsou v přímém kontaktu s kultivačním procesem a slouží jako prevence hromadění usazenin, které by mělo vliv na efektivitu celého zařízení [33].

Sterilizace je proces, při kterém dochází k destrukci mikrobů. Důvodem provádění této operace je zabránění kontaminace nechtěnými organismy uvnitř bioreaktoru. Sterilizace může být provedena několika způsoby [12].

Etylenoxid se může použít na sterilizaci materiálů, které nevydrží vyšší teploty. Nahrazuje atomy vodíku na molekulách proteinů a DNA a tím zastaví procesy, na kterých jsou buňky životně závislé. Tento proces se nazývá alkylace [12].

Dalším možným způsobem sterilizace je použití suchého horkého vzduchu. Prázdné nádrže se vystaví působení teplot po dobu nejméně 3 až 4 hodin při teplotě 160 °C. Pro efektivní sterilizaci je však zapotřebí použít teploty od 200 °C do 250 °C. Tento způsob je vhodný jen pro materiály, které vydrží vystavení vysokým teplotám (sklo, teflon aj.) [12].

Autoklávování spočívá v udržení teploty na 121 °C při tlaku 1 až 2 barů po dobu 15 minut v celém objemu nádrže [12].

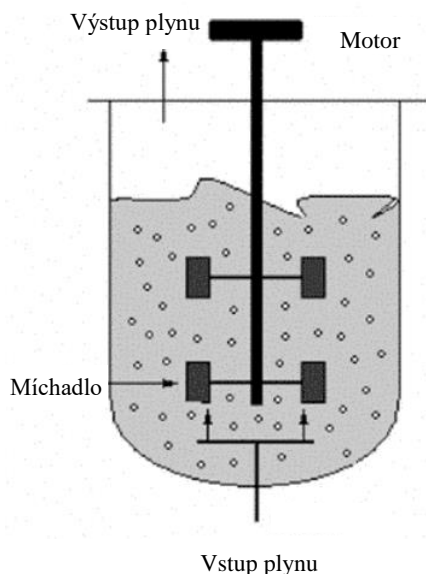
Pasterizace média, které bude použito pro kultivaci, probíhá při teplotách 90 °C až 95 °C po dobu 30 minut [12].

UV sterilizace je také možná, ale je potřeba velkých intenzit pro dostatečně vysoký stupeň sterilizace [12].

Sterilizační filtrace média má nižší účinnost než sterilizace teplem. Pro velké objemy médií je to časově náročný proces [12].

6.1 Míchané bioreaktory

Tento typ bioreaktoru je jeden z nejběžněji používaných. Rotor má na starosti přenos tepla



Obr. 24 Míchaný bioreaktor [26]

a hmoty, provzdušňování a míchání za účelem homogenizace [26]. Každá část bioreaktoru má vliv na jeho funkci. Běžný je pro něj tvar válce s odlišnými tvary dna. Výhodnější je použití dna se zaoblenými rohy, které zamezují usazování kultury. Úprava tvaru dna významně zlepšuje rozpustnost látek. Kyslík má běžně rozpustnost 8 mg.l⁻¹ a je během kultivace doplňován pomocí rozprašovače, který je umístěn pod rotorem reaktoru. Vstup míchadla do reaktoru je buď horní nebo dolní. V obou případech může dojít ke kontaminaci v místě, kde hřídel vstupuje do míchaného média. K zamezení kontaminace se používají různé typy těsnění. Nejpoužívanějším typem je mechanické těsnění, které se skládá ze dvou částí a to ze stacionární a rotující. Rotující část bývá vyrobena z uhlíku nebo keramiky. Nepohyblivá část je většinou vyrobena buď z nástrojové oceli nebo keramiky. Alternativou může být také magnetický pohon. Ten využívá k přenosu kroutícího momentu magnety, které by k sobě měly být co nejbližší. Výška bioreaktorů je omezena v důsledku potřeby zajištění homogenních podmínek na 1,00 až 1,25 násobek průměru reaktoru za použití rotorů o průměru 0,25 až 0,50 průměru reaktoru. Při použití vyšších bioreaktorů je potřeba na hřídel umístit vyšší počet míchadel v závislosti na výšce reaktoru. Vzdálenost mezi jednotlivými rotory je velmi důležitá z hlediska proudění, kdy příliš krátké vzdálenosti způsobí, že se budou vytvářené proudy vzájemně ovlivňovat a narušovat celý oběh. V případě velkých vzdáleností mezi nimi nebude docházet k dostatečnému míchání [33],[71].

Do vnitřního prostoru bioreaktoru se umísťují přepážky. Jejich účelem je zabránit víření. Běžně se používají 4 přepážky o šířce 0,083 až 0,100 průměru nádrže. Připevňují se přímo ke stěně nádoby nebo v její blízkosti tak, aby se za nimi netvořily usazeniny. Vytvářejí turbulence, které narušují cirkulaci generovanou rotorem [33].

Nejpoužívanější jsou axiální a radiální míchadla. Často se používá Rushtonova turbína, která má tvar disku a 6 lopatek. Vytváří zejména radiální nebo horizontální proud a velmi dobře rozptyluje plyn. Za lopatkami Rushtonovy turbíny dochází k vytváření párů nízkotlakých, vysokorychlostních vírů. Tato vlastnost má vliv na velikost příkonu míchadla v podmínkách bez přívodu plynu. Při průchodu plynu tekutinou se plyn hromadí v těchto nízkotlakých a vysokorychlostních oblastech, vytváří dutiny a snižuje výkon míchadla. Toto snížení výkonu je závislé na rychlosti míchadla, velikosti nádrže, vlastnostech kapaliny a rychlosti plynu. Na výkon má vliv také vzdálenost rotoru od dna bioreaktoru, velikost rotoru, stěny nádoby a jejich tloušťka, typ rozprašovače a jeho umístění či poměr výšky hladiny k průměru nádrže [26],[33].

Používají se i jiné diskové turbíny s větším či menším počtem lopatek. Lopatky jsou na nich umístěny různými způsoby [33].

Dalším možným míchadlem, který můžeme použít pro míchání média je šroubový typ. Tato míchadla vytvářejí proud tvořený zejména axiální složkou. Mohou být používány ve směru čerpání dolů i nahoru. Běžně mají průměr 1/3 průměru nádrže. K vysokým energetickým ztrátám dochází při přívodu plynu [33].

Mezi používaná míchadla dále patří lopátkový typ. Je konstrukčně jednoduchý se dvěma nebo čtyřmi lopatkami. Během provozu generují radiální proudění. Používají se při konstrukci velkoobjemových a nízkorychlostních reaktorů. Při jejich použití nedochází k tvorbě rychlých proudů tekutiny, ale ani k výraznému transportu buněk z horní části reaktoru do dolní části či naopak z dolní části k horní. V porovnání s ostatními typy míchadel není při jejich použití dosaženo homogenního rozložení plynu a jsou proto nevhodné pro použití v prostředích s kapalinou a plynem [33].

Používanou variantou je také kotevní typ míchadla. Mají velký průměr, mezi stěnou a rotorem je prostor o velikosti 1 až 5% průměru nádrže a pracují při rychlostech 5 až 20 min⁻¹. V okolí hřídele však nedochází k dostatečnému míchání a není proto vhodné je používat, pokud chceme dosáhnout homogenního míchání [33].

Další možností je spirálovitý rotor. Mají velký průměr a jejich vzdálenost od stěny nádrže je velmi malá. Rotor lze zkonstruovat s jednou nebo dvěma spirálami. Pracují při nízkých rychlostech a rozptylují plyn hůře než vysokorychlostní míchadla. Mají dobré výsledky promíchání ze dna nádrže k horní části a neexistují při jeho použití oblasti, kde by nedocházelo k míchání [33].

Tento reaktor se upřednostňuje před pneumaticky míchanými reaktory, protože je v něm možno dosáhnout větší produktivity díky vyšším hustotám [26].

6.2 Pneumaticky míchané tubulární bioreaktory

Dva hlavní typy pneumaticky míchaných bioreaktorů jsou „air-lift“ (AL) a „bubble-column“ (BC) bioreaktory. AL bioreaktory vytvářejí cirkulaci, která zabraňuje akumulaci plynových bublin, smykové napětí se rozloží do celého reaktoru a zvýší se oběžný pohyb tekutiny, díky kterému se zlepší přenos hmoty a tepla. V AL bioreaktoru se vytváří interní nebo externí cyklus [26].

V AL bioreaktorech je oběh vody a vzduchu zajištěn pomocí přívodu vzduchu, který vytvoří rozdíl v tlaku mezi částí, kde vzduch stoupá („riser“) a částí se vzduchem klesajícím zpět ke dnu („downcomer“). Tento rozdíl v tlacích lze vyjádřit jako:

$$\Delta P = \rho gh(\varphi_r - \varphi_d), \quad (10)$$

kde ΔP je rozdíl tlaků, ρ je hustota kapaliny, h je výška vodního sloupce a $\varphi_r - \varphi_d$ je rozdíl podílů objemů plynu v objemu daných částí bioreaktoru („riser“ a „downcomer“). φ_i vyjadřuje množství plynu v objemu bioreaktoru a je dáno vztahem:

$$\varphi_i = \left(\frac{V_G}{V_G + V_L + V_S} \right)_i, \quad (11)$$

kde indexy G,L,S značí plyn, tekutinu a pevnou fázi a i označuje tu část bioreaktoru, pro kterou chceme daný poměr zjistit. Na množství plynu v bioreaktoru má vliv poměr průřezů trubek, ve kterých vzduch stoupá a klesá zpět ke dnu [33].

Vzduch klesající ke dnu v odpovídající části bude ke dnu klesat za předpokladu, že rychlost proudění bude dostatečně vysoká. Pokud by nebyla dostatečně vysoká, vzduch by z média unikl a dolů by proudilo médium bez vzduchu. Zvyšováním obsahu plynu se zmenšuje plocha, kterou může médium proudit a zvyšuje se tak jeho rychlost. Zároveň se zvyšováním rychlosti se postupně dostávají do klesající části bubliny se stále větším průměrem [33].

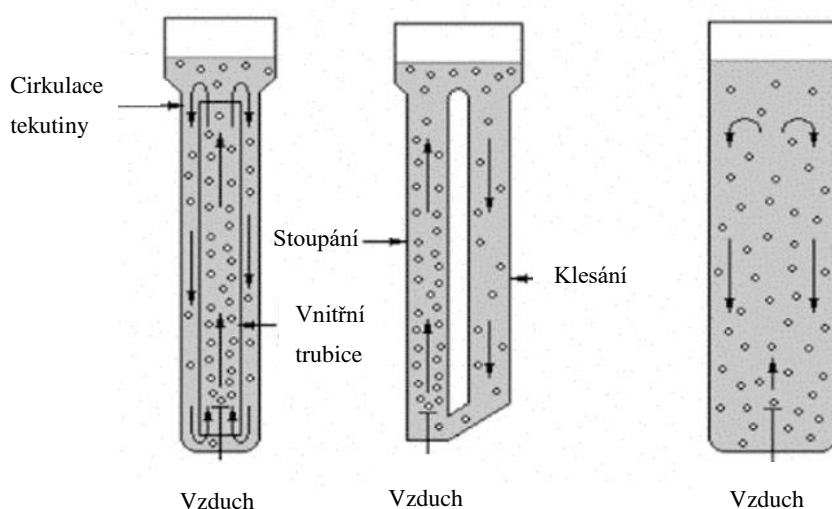
V bioreaktoru s interním cyklem vzduch prochází centrální trubkou, která usměrňuje cirkulaci vzduchu i tekutiny. Bublíny vzduchu stoupají centrální trubkou vzhůru a některé

z nich srůstají a vystupují na horním konci sloupu, ale některé z nich pokračují v cyklu dál s tekutinou [26].

Bioreaktory s externím cyklem rozprašují bubliny mimo ponořenou trubku. Proudění je silnější v části s pohybem vzhůru než v části s pohybem dolů. Díky tomu, že ohřívání nebo chlazení je umístěno na stěnách reaktoru, má lepší proudění na krajích a lepší tepelnou účinnost. Údajně tyto reaktory v porovnání s reaktory s interním cyklem vytvářejí méně pěny [26].

Ve srovnání s míchanými bioreaktory je jejich největší výhodou cena, která může být mnohem nižší díky nižším nákladům na míchání a provzdušňování. Mezi další výhody těchto bioreaktorů patří nízká smyková napětí, žádné pohyblivé části, vysoká efektivita přenosu kyslíku a předvídatelnost toku [26].

Mezi nevýhody AL bioreaktorů patří srůstání bublin a tvorba pěny. Další problém nastává při zvyšující se hustotě kultury v reaktoru. Zhoršuje se přenos kyslíku a dochází k nerovnoměrné distribuci biomasy v bioreaktoru [26].



Obr. 25 Pneumaticky míchané bioreaktory [26]

6.3 Membránové bioreaktory

Membránový bioreaktor je průtokový reaktor, který obsahuje membrány k oddělování buněk či enzymů. Membrány mohou být vyrobeny z různých materiálů, jako je celulóza, keramika nebo polypropylen. Katalyzátor (buňky nebo enzymy) zůstává uvnitř reaktoru. Mezi možnostmi, jakými může být katalyzátor imobilizován, patří kovalentní nebo iontová vazba, porézní struktura, povrch membrány nebo fyzikální sorpce [26],[72].

Techniky imobilizace katalyzátoru se dělí na techniky vazební a techniky zachytávací. První skupina zahrnuje techniky, které dokáží vytvořit vazbu mezi buňkami a nosičem pomocí fyzikální adsorpce, iontové nebo kovalentní vazby. Zachytávací techniky zahrnují uzavření buněk v polymerní matici nebo za semipermeabilní membránou [26].

Membránové bioreaktory se dělí z hlediska uspořádání do dvou skupin. U první skupiny membrána odděluje reakční prostor a určuje, co do tohoto prostoru vstoupí a co vystoupí. Ve druhé skupině probíhá reakce přímo v membránách. Dalším hlediskem je uspořádání membránových bioreaktorů, kdy je lze rozdělit na reaktory s vnitřním a vnějším membránovým modulem. Membránové moduly jsou obaly, ve kterých jsou membrány umístěny. Používají se deskové moduly, moduly s dutými vlákny, spirálovité nebo trubkové [26],[72].

V trubkových modulech jsou membrány ve svazcích. Deskové moduly se obvykle skládají ze dvou membrán a rozdělovače. Přes membrány pak prochází produkt (tzv. permeát) a na druhém konci modulu vychází po oddělení permeátu tzv. retentát. Deskové moduly bývají řazeny v několika za sebou a mívají povrch 100 až 400 m² na 1 m³. Spirálovité moduly jsou tvořeny membránou, která je navinutá na vnitřní trubici. Vstup (nástřík) prochází modulem v axiálním směru, permeát se v modulu pohybuje radiálně směrem k centrální trubce, kterou poté odtéká. Zbytek odtéká druhým koncem modulu. Dosahují vyšších hodnot povrchů membrány než deskové moduly a to mezi 300 a 1000 m² na 1 m³. V trubkových modulech jsou tubulární membrány umístěny v počtu většinou větším než čtyři. Plocha membrány bývá menší než 300 m² na 1 m³. Kapilární moduly jsou složeny z kapilár, které tvoří jeden svazek. Jejich povrchy jsou obvykle mezi 600 a 1200 m² na 1 m³ [72].

Nacházejí dobré uplatnění při čištění odpadních vod. Voda, která prochází čistícím procesem je oddělena od aktivního kalu pomocí mikrofiltrace nebo ultrafiltrace. Používají se mikrofiltrační membrány s velikostí pórů 0,01 až 0,4 μm. Tyto membrány nepropouští bakterie a ultrafiltrační membrány jsou dokonce schopny zabránit průchodu virů, proto membrány plní také funkci fyzikální desinfekce. Dále jsou bioreaktory tohoto typu používány na biokatalýzu, fermentaci, buněčné kultury a čištění odpadních plynů [26],[72].

6.4 Bioreaktory s pevným nosičem a s fluidním nosičem

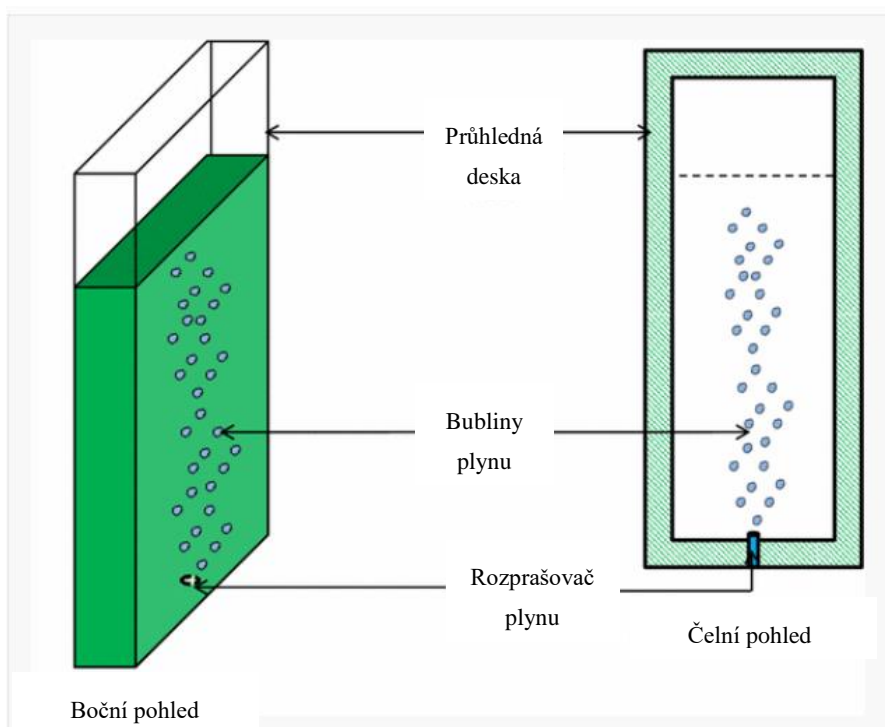
Enzymy nebo buňky jsou v bioreaktoru s pevným nosičem znehybněny uvnitř bioreaktoru. Výhodou tohoto typu bioreaktoru jsou vysoké reakční rychlosti. Často v něm dochází ke hromadění plynu. Nejčastěji se tento typ reaktoru používá na čištění odpadních vod a plynů [26].

Bioreaktor s fluidním nosičem má válcový tvar s rozšířenou horní částí. Toto rozšíření snižuje rychlost kapaliny na povrchu. Přívod reaktoru je nainstalován na dně a za ním je umístěn distribuční systém, který slouží k homogenizaci průtoku a tlaku. Plášť bioreaktoru se využívá k regulaci teploty [33].

6.5 Panelové bioreaktory

Panelové bioreaktory jsou charakteristické svým tvarem a velkou osvětlenou plochou. Desky jsou běžně ze skla, polykarbonátů nebo plexiskla. Tyto bioreaktory mají vysoké nároky na prostor a vydrží pouze omezené hodnoty tlaků. Mohou být rozděleny do dvou kategorií. Panelové bioreaktory provzdušňované a panelové bioreaktory poháněné čerpadlem. Existuje velké množství různých konfigurací [69].

Jeden z těchto konfigurací je panelový reaktor, který navrhnul Barbosa a kol. Míchání je zajištěno pomocí směsi CO₂ a vzduchu. Směs se do reaktoru dostává pomocí 17 děr o průměru 0,8 mm v silikonu na dně reaktoru. Osvětlení je zajištěno deseti zářivkami, umístěnými na jedné straně reaktoru, s celkovou intenzitou 1000 μmol fotonů m⁻²s⁻¹. Poměr povrchu a objemu činil 0,34 cm⁻¹ [73].



Obr. 26 Panelový bioreaktor [74]

6.6 Spirálovité bioreaktory

Spirálové (cívkové) bioreaktory jsou tvořeny dlouhou, průhlednou a prožnou trubkou o malém průměru a s připojenou odplyňovací jednotkou pro odvod vyprodukovaného a zbytkového plynu. Tento bioreaktor je jednou z možných konfigurací horizontálních tubulárních bioreaktorů. K zajištění proudění je používáno odstředivé čerpadlo. Živiny a CO_2 je výhodnější přivádět ze spodní části bioreaktoru. Ovšem energie potřebná k provozu odstředivého čerpadla a tvorba smyčkového napětí čerpadlem snižují vhodnost tohoto systému k vyšším produkcím biomasy [28],[69].

Příklad konfigurace je spirálovitý bioreaktor z PVC s průměrem 0,03 m a stoupáním 2° . Bylo u něj dosaženo produktivity biomasy $0,9 \text{ g.l}^{-1}.\text{d}^{-1}$. Poměr povrchu a objemu činil 53 m^{-1} . Z celkového objemu reaktoru tvořily 23 % vzduchové bubliny. Je výhodný z hlediska prostoru a díky délce trubky poskytuje dostatek času k rozpuštění CO_2 [73].

7 VÝSLEDKY A DISKUZE

Na základě informací uvedených v bakalářské práci mají řasy široké možnosti využití. Naleznou uplatnění například ve farmaceutickém, kosmetickém nebo potravinářském průmyslu. Výběrem vhodných druhů řas lze dosáhnout námi kladených požadavků na složení a rychlost růstu biomasy. Každý druh řas se vyznačuje jinými vlastnostmi a metabolismem, které lze při kultivaci využít. Ještě před zahájením kultivace je proto důležitým krokem výběr vhodného druhu řasy, jehož vlastnosti ho předurčují ke splnění námi kladených požadavků. Dalším důležitým hlediskem je zajištění vhodných kultivačních parametrů, které mají zásadní vliv na složení biomasy a tvorbu žádaných bioproduktů. Jednotlivé druhy řas se odlišují rozdílnými nároky na kultivační podmínky. Preferují rozdílné teploty, hodnoty pH, vyhovují jim různé koncentrace CO₂, mají rozdílné nároky na světlo nebo také odlišné tolerance smykového napětí [36]. Aby došlo k ovlivnění růstu a složení biomasy, stačí omezení jednoho kultivačního parametru nebo naopak zvýšení jeho hodnoty. V případě omezení kultivačního parametru se při kultivaci využívá tzv. limitace, kdy dochází k záměrnému ovlivnění metabolismu buněk k dosažení vyšších hmotnostních výnosů bioproduktů. Nadměrné osvětlení při kultivaci způsobí fotoinhibici, která buňky poškozuje a má negativní dopad na růst biomasy. Na základě těchto skutečností je proto nutné volit druhy nejen podle námi kladených požadavků na výsledný produkt, ale také podle toho, jakým kultivačním podmínkám budou řasy vystaveny [12],[55]. Při využití odpadních produktů jsou už některé kultivační parametry dány složením odpadních produktů a je tak potřeba specifické kultivační podmínky při výběru vhodných druhů zohlednit [43].

V případě uplatnění řas k čištění odpadních produktů představují řasy jednu z možných alternativ k současným metodám. Řasy jsou schopny odstraňovat z odpadní vody ve velké míře dusík i fosfor a představují tak alternativní řešení k chemickému odstraňování těchto prvků. Navíc jde o způsob, který je nejšetrnější k životnímu prostředí. Řasy mají také schopnost vázat na sebe těžké kovy a díky produkci kyslíku ještě zefektivňují čistící proces [38]. K tomuto účelu je výhodné využít membránové bioreaktory, které byly v bakalářské práci podrobněji popsány. Kombinují vlastnosti membrán a bioreaktorů a kromě čištění odpadní vody a růstu biomasy, fungují při čištění odpadních vod také jako fyzikální dezinfekce [72]. Řasy lze využít také k čištění odpadních plynů, kde jde opět o nejšetrnější způsob čištění. Na rozdíl od konvenčních metod se jedná o udržitelný způsob snižování emisí CO₂. Díky schopnosti vázat na sebe CO₂ mají potenciál zredukovat emise tohoto plynu. Podobně jako odpadní vody i odpadní plyny obsahují těžké kovy, které lze s využitím vhodných druhů řas z plynu odstranit [19],[50]. Dalším aspektem, na který je třeba myslet, pokud řasy zahrneme do čistícího procesu odpadních plynů, je teplota. Je tedy potřeba volit takové druhy řas, které budou schopny přežít v prostředí s vysokou koncentrací CO₂, s přítomností těžkých kovů a vysokými teplotami [49],[50]. V bakalářské práci byla adaptabilita řas k těmto parametrům podrobněji probrána. Bylo zjištěno, že koncentrace biomasy ovlivňuje množství odstraněných iontů těžkých kovů. S rostoucí koncentrací biomasy roste množství odstraněných iontů. Biosorpce je ovlivněna také koncentrací jiných kovů, hodnotou pH, teplotou a druhem řasy. *Chlorella vulgaris* je schopna vázat 89,19 mg.g⁻¹ mědi a *Spirulina platensis* 44,56 mg.g⁻¹ kadmia. Řasa *Chlamydomonas reinhardtii* je dokonce schopna vázat 72,2 mg.g⁻¹ rtuti [52],[53]. Protože buňky vyžadují ke svému růstu velké množství živin, lze využitím těchto odpadních produktů dosáhnout snížení nákladů na produkci biomasy. V této oblasti je ale stále potřeba vyřešit problémy zahrnující vysoké počáteční a provozní náklady, rizika kontaminace z odpadních produktů, fluktuaci živin nebo zvýšení efektivity kultivačních systémů [38],[65].

Velkou výhodou řas oproti ostatním běžně pěstovaným plodinám je rychlost růstu, která je až stonásobně vyšší. Řasy jsou schopny zdvojnásobit svoji populaci během několika hodin. Jejich kultivací tak lze dosáhnout vyšších výnosů než pěstováním běžných plodin a k jejich kultivaci není zapotřebí orná půda [75]. Kultivace řas ve velkém měřítku je slibnou cestou k udržitelnému rozvoji. Z ekonomického a energetického hlediska je však velkoobjemová kultivace náročná a vyžaduje další vývoj kultivačních systémů. Otevřené kultivační systémy jsou na rozdíl od uzavřených levnější, ale je v nich dosaženo nižší produkce, jsou závislé na vnějších podmínkách a dochází u nich ke kontaminaci z okolního prostředí [18],[42].

V této práci proto byla věnována pozornost uzavřeným kultivačním systémům, protože představují oproti otevřeným kultivačním systémům výhodnější způsob kultivace [75]. Tyto systémy lze klasifikovat na základě způsobů míchání na bioreaktory míchané čerpadlem, plynem nebo míchadlem. Bioreaktor vybíráme podle požadavků na produktivitu, náklady, energetickou náročnost nebo odolnost řas na smykové napětí. Bioreaktory s míchadlem dosahují nejvyšších výnosů. Jejich pořizovací cena a operační náklady jsou ale vysoké a nejsou vhodné pro druhy, které jsou citlivé na smykové napětí. Prostor pro vylepšení je v modifikacích a návrzích nových typů míchadel. Bioreaktory míchané vzduchem jsou vhodnější pro druhy, které jsou citlivé na smykové napětí a jsou levnější. Dosahují ale nižších výnosů, protože se zvyšující se hustotou klesá účinnost míchání a dochází k narušení homogenity prostředí. Při čerpadlovém míchání dochází také k namáhání buněk smykovým napětím, které roste spolu s rostoucí rychlostí čerpadla [19],[26]. Existuje velké množství modifikací již zmíněných bioreaktorů, které se snaží optimalizovat kultivační parametry a snížit náklady na kultivaci. Navrženy byly také další typy bioreaktorů, které nejsou v této práci podrobněji popsány, jako jsou hybridní bioreaktory nebo bioreaktory využívající k míchání pohyb vodní hladiny. Vysoké pořizovací a provozní náklady a snižující se efektivita s rostoucím objemem bioreaktoru jsou výzvy, které je třeba vyřešit k tomu, aby kultivace v těchto systémech byla ekonomicky výhodná a mohl být plně využit potenciál, který řasy k produkci biomasy a bioproduktů poskytují [18],[74],[69].

Vysoká míra počátečních investic a provozních nákladů se týká také zpracování biomasy. Metody, které jsou použity pro narušení buněčné stěny, je třeba volit s ohledem na daný druh řasy. Pokud je kultivován druh s tenkou buněčnou stěnou, je potřeba menší množství energie na její dezintegraci než na buňky se silnější buněčnou stěnou. Mezi řasy se silnější buněčnou stěnou se řadí například *Chlorella vulgaris*. Naopak *Spirulina platensis* patří mezi řasy s tenčí buněčnou stěnou. Tenká buněčná stěna umožňuje dobrou stravitelnost buněk řas lidským organismem. Studie jsou často zaměřeny na získání jednoho konkrétního bioproduktu. Pokud by ale byly využity i další bioprodukty, které řasy během kultivace vytvářejí, zvýšila by se tak efektivita celého procesu. Je proto potřeba použít metody, které nezničí ostatní produkty a ty tak budou moci být dále zpracovány [1],[18],[22].

Mezi nejdůležitější produkty, které je možné kultivací řas získat, patří bílkoviny, lipidy, sacharidy, pigmenty nebo vitamíny, které nacházejí uplatnění v různých oblastech [36].

Volbou řas s vysokou produkcí bílkovin nabývá výsledná hodnota podílu tohoto produktu na celkové hmotnosti suché biomasy i více než 60 %. Řasa *Spirulina platensis* obsahuje až 63 % tohoto produktu. Mezi druhy s vysokým obsahem bílkovin dále patří řasy rodu *Anabeana*, *Chlorella*, *Euglena* a *Duneliella*. Praktické využití bílkovin je možné v podobě krmiv, hnojiv, průmyslových enzymů, doplňků stravy nebo bioplastů [1].

Lipidy představují energetickou rezervu řasových buněk. Vysoký hmotnostní podíl na celkovém množství vyprodukované biomasy má řasa *Scenedesmus dimorphus* a to 40 %. Jejich

množství v buňce lze ovlivňovat vnějšími faktory. Nejběžněji se ke zvýšení podílu lipidů používá limitace dusíkem. Hmotnostní podíl lipidů při kultivaci řasy *Chlorella vulgaris* vzroste o více než 10 % při redukcí koncentrace dusíku o 75 %. Množství lipidů lze ovlivnit i limitací jiných prvků, jako je například fosfor. Lipidy nachází uplatnění ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu nebo při výrobě biopaliv [1],[24].

Sacharidy jsou v řasách přítomny ve formě škrobu, glukózy, celulózy a různých druhů polysacharidů. Hmotnostní podíl sacharidů řasy *Porphyridium cruentum* může činit až 57 %. Sacharidy lze využít k výrobě biopaliv, jako je etanol nebo vodík [1],[18]. Polysacharidy nacházejí uplatnění v medicíně. Byly prokázány jejich pozitivní účinky na zdraví člověka. Mají vlastnosti, které jsou využitelné při léčbě nádorových nebo virových onemocněních [1].

Pigmenty slouží buňkám k zachycení sluneční energie. Využití nacházejí zejména ve farmacii a potravinářském průmyslu. Astaxantin se vyznačuje schopností léčit onemocnění jater, očí nebo kůže a funguje také jako účinná prevence proti těmto nemocem. Řasa, která má nejvyšší podíl hmotnosti tohoto pigmentu, je *Haematococcus pluvialis* a to 1,5 % až 3 % [1]. Vedle těchto produktů představují řasy hodnotný zdroj vitamínů, zejména ze skupiny A, E a B. Koncentrace těchto vitamínů je u řas vyšší než u ostatních potravin a mohou tak posloužit jako hodnotný doplněk stravy, protože vitamíny představují mikroživiny potřebné k fungování lidského těla. Vysoká koncentrace vitamínu B₇ byla zjištěna u řas rodu *Chlorella*. *Dunaliella tertiolecta* byla identifikována jako druh s vysokou koncentrací vitamínu B₂, B₁₂, E a provitamínu A [2]. Kromě bioproduktů, které byly podrobněji popsány v bakalářské práci nabízejí řasy také další bioprodukty, jako jsou nenasycené a polynenasycené mastné kyseliny, stopové prvky nebo flavonoidy [2],[29].

Využití řas se neomezuje pouze na tyto produkty. Řasy mají velký potenciál i z energetického hlediska, kdy požadovaných energetických produktů dosáhneme pomocí transformačních procesů [3].

Termochemická konverze představuje procesy, při kterých je využito tepla k tvorbě konečného produktu. Další možností je biochemická konverze, které zahrnuje anaerobní digesci, alkoholovou fermentaci a fotobiologickou produkci vodíku. Transesterifikace je reakce triglyceridů s alkoholem za účasti katalyzátoru, kterou vzniknou složky s nižší molekulovou hmotností ve formě alkylesterů mastných kyselin. Fotosyntetický palivový článek představuje cestu, kterou je možné s využitím řas generovat elektrickou energii. Těmito procesy se řasy konvertují v energeticky hodnotné produkty, jako je nafta, etanol, metan, vodík nebo elektřina. Díky těmto způsobům využití řas je zřejmé, že mohou být považovány za univerzální obnovitelný energetický zdroj s rozsáhlými možnostmi aplikací a podílet se na snížení naší závislosti na neobnovitelných zdrojích energie [1],[3],[37].

8 ZÁVĚR

V předložené bakalářské práci byl vytvořen základní přehled o řasách a jejich vlastnostech, byly shrnuty možnosti jejich využití pro produkci biomasy a žádaných bioproduktů a popsány používané typy bioreaktorů pro jejich kultivaci. Další část bakalářské práce byla věnována vlivu technologických parametrů na kultivace řas.

V úvodní části práce byly shrnuty základní charakteristiky jednotlivých skupin řas a graficky zpracováno jedno z možných taxonomických rozdělení s označením skupin, do kterých spadají dnes nejčastěji kultivované řasy rodu *Chlorella* a *Spirulina* [2].

Další část práce byla věnována bioproduktům, které vznikají při kultivaci řas a jejich vlastnostem. Ze zjištěných informací plyne, že řasy mají rozsáhlé možnosti aplikací v různých odvětvích, jako je farmaceutický, potravinářský nebo kosmetický průmysl. Bílkoviny nacházejí uplatnění v podobě doplňků stravy nebo krmiv, průmyslových enzymů. Některé druhy mají obsah bílkovin i větší než 60 %. Mezi tyto druhy patří řasa *Spirulina platensis* [1]. Lipidy lze konvertovat na biopaliva nebo využít v kosmetickém průmyslu [16],[65]. U řasy *Scenedesmus dimorphus* tvoří hmotnostní podíl lipidů až 40 % [1]. Řasa *Scenedesmus obliquus* je schopna při limitaci dusíkem dosáhnout až na 50 % tohoto podílu [24]. Sacharidy jsou vhodné pro výrobu etanolu nebo vodíku a najdou také uplatnění při léčbě a prevenci některých onemocnění [1]. Pigmenty jsou využitelné ve formě potravinářských barviv a najdou uplatnění také ve farmacii. Řasa *Haematococcus pluvialis* je významným zdrojem astaxantinu. Podíl tohoto pigmentu tvoří 1,5 až 3 % hmotnosti řasy. Různé druhy vitamínů, které jsou řasy schopny produkovat, mohou být využity v podobě doplňků stravy. Mezi tyto vitamíny patří například vitamín A, B₁, B₂ nebo B₁₂ [1],[2]. Řasy mohou být také využity k výrobě biomateriálů, např. pro produkci biopolymerů [29].

Kromě těchto produktů řas byly v bakalářské práci popsány také metody, kterými je možné získat produkty s energetickou hodnotou. Mezi tyto produkty patří vodík, etanol, metan, nafta nebo elektřina. Byly charakterizovány jednotlivé transformační metody, jejich rozdělení a byly také uvedeny produkty, které těmito postupy vznikají [3].

Z popsaných metod zpracování biomasy je důležité zvolit nejvhodnější postupy na základě vlastností kultivovaných buněk a podle požadovaného výstupního bioproduktu nebo bioproduktů. Zaměřením se na získání více bioproduktů oproti cílené extrakci jednoho z nich, vzroste hodnota biomasy a zvýší se tak rentabilita celého procesu [18],[22].

Dále byly probrány možnosti využití odpadních produktů ke kultivaci řas. Využitím odpadních produktů, jako je odpadní voda, spaliny nebo odpadní plyn s obsahem CO₂, lze snížit náklady na kultivaci a zároveň využít růstu řas k čistícímu procesu, kde může být využita i jejich schopnost vázat na sebe těžké kovy [38],[52]. Kromě snížení nákladů na kultivaci a minimalizaci dopadů lidské činnosti na životní prostředí, je výhodou také fakt, že tímto způsobem proměňujeme odpadní produkty na hodnotnou surovinu. Je nutné brát v úvahu specifické podmínky, kterým jsou řasy během kultivace s využitím odpadních produktů vystaveny. Podle těchto podmínek je potom potřeba vybrat ke kultivaci takové druhy, které budou schopny dané prostředí využít ve svůj prospěch [38],[50]. Například řasy *Chlorella* H-84 a *Chlorella* A-2 vykazují vysokou toleranci na vysoké teploty i koncentrace CO₂. Nejvyšší rychlosti růstu bylo u těchto druhů dosaženo za teploty 40 °C a koncentrace CO₂ 20 % [49].

Byl zpracován přehled technologických parametrů a jejich vliv na kultivaci. Každý z těchto parametrů má vliv na průběh kultivace, složení a rychlost růstu biomasy. Je proto důležité kontrolovat hodnoty těchto parametrů a zajistit řasám podmínky, jakými dosáhneme námi

kladených cílů. Využívá se tzv. limitace živinami, kdy jsou buňky řas vlivem nedostatku jedné z živin vystaveny stresu [12],[36].

Ke kultivaci řas se využívá otevřených a uzavřených kultivačních systémů. Práce se zaměřila na popis uzavřených kultivačních systémů. Ty mají na rozdíl od otevřených kultivačních systémů větší potenciál plynoucí z jejich výhod. Otevřené kultivační systémy jsou sice levnější, ale mají nízkou účinnost, vysokou možnost kontaminace a závislost na vnějším prostředí. Uzavřené kultivační systémy nabízejí vyšší produkci a účinnost, nízké riziko kontaminace z okolního prostředí a možnost kontroly parametrů kultivace [69],[74],[75].

Cílem bakalářské práce bylo popsat na základě zjištěných informací potenciál využití řas. Jak plyne z této práce, možnosti využití řas jsou velmi rozsáhlé a jsou jednou z možných odpovědí na změny globálního charakteru. Je ale potřeba dalšího výzkumu týkajícího se snížení energetické náročnosti, snížení pořizovacích a provozních nákladů, zvýšení kultivovaných objemů a modifikace bioreaktorů, aby byla jejich kultivace v uzavřených systémech rentabilní.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TRIVEDI, Jayati, Mounika AILA, D.P. BANGWAL, Savita KAUL a M.O. GARG. Algae based biorefinery—How to make sense? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **47**, 295-307 [cit. 2017-11-24]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.052. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115002051>
- [2] KOYANDE, Apurav Krishna, Kit Wayne CHEW, Krishnamoorthy RAMBABU, Yang TAO, Dinh-Toi CHU a Pau-Loke SHOW. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Science and Human Wellness* [online]. 2019, **8**(1), 16-24 [cit. 2019-05-18]. DOI: 10.1016/j.fshw.2019.03.001. ISSN 22134530. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213453018301435>
- [3] CHEW, Kit Wayne, Jing Ying YAP, Pau Loke SHOW, Ng Hui SUAN, Joon Ching JUAN, Tau Chuan LING, Duu-Jong LEE a Jo-Shu CHANG. Microalgae biorefinery: High value products perspectives. *Bioresource Technology* [online]. 2017, **229**, 53-62 [cit. 2019-03-31]. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.006. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417300263>
- [4] VASSILEV, Stanislav V. a Christina G. VASSILEVA. Composition, properties and challenges of algae biomass for biofuel application: An overview. *Fuel* [online]. 2016, **181**, 1-33 [cit. 2018-06-18]. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.106. ISSN 00162361. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623611630271X>
- [5] SINGLETON, Paul a Diana SAINSBURY. Dictionary of microbiology and molecular biology: ČSN ISO 3297 (01 0187). 3rd ed. Chichester: John Wiley, 2001. Informace a dokumentace, 3297 (01 0187). ISBN 04-714-9064-4.
- [6] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa - definice a členění. *Tzb-info* [online]. 2009 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [7] *Vyhláška č. 415/2012 Sb.: Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.* In: . ročník 2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [8] *Zákon č. 242/2000 Sb.: Zákon o ekologickém zemědělství a o změně zákona č. 368/1992 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů.* In: . ročník 2000. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-242>
- [9] KODÍČEK, Milan. *Biochemické pojmy: výkladový slovník.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2004. ISBN 80-708-0551-X.
- [10] ROSYPAL, Stanislav. *Nový přehled biologie.* Praha: Scientia, 2003. ISBN 80-7183-268-5.
- [11] WEHR, John D., Robert G. SHEATH a John Patrick KOCIOLEK. *Freshwater algae of North America: ecology and classification* [online]. Second edition. Boston: Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier, [2015] [cit. 2019-05-18]. ISBN 978-0-12-385876-4. Dostupné z: <https://books.google.cz/>
- [12] BARSANTI, Laura a Paolo GUALTIERI. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology [online]. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2014 [cit. 2018-11-18]. ISBN 08-493-1467-4. Dostupné z: https://archive.org/details/Algae_Anatomy_Biochemistry_and_Biotechnology_2nd_Edition_By_Laura_Barsanti_Paolo/page/n3

- [13] MASOJÍDEK, Jiří. *Co víte o řasách?: Řasy*. Třeboň: Centrum ALGATECH. Dostupné také z: <http://www.alga.cz/c-548-co-vite-o-rasach-.html>
- [14] [Www.sinicearasy.cz](http://www.sinicearasy.cz/): Fykologická laboratoř na katedře botaniky Přírodovědecké fakulty JU v Českých Budějovicích [online]. Přírodovědecká fakulta JU [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.sinicearasy.cz/>
- [15] *Red Algae - Definition, Glossary, Details - Oilgae* [online]. Chennai: Oilgae [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: http://www.oilgae.com/ref/glos/red_algae.html
- [16] DEBIAGI, Paulo Eduardo Amaral, Martina TRINCHERA, Alessio FRASSOLDATI, Tiziano FARAVELLI, Ravikrishnan VINU a Eliseo RANZI. Algae characterization and multistep pyrolysis mechanism. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2017, -, - [cit. 2017-11-05]. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.08.007. ISSN 01652370. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237017305260>
- [17] *Fytoplankton.cz: Laboratoř ekologie fytoplanktonu* [online]. Biologické centrum Akademie věd ČR [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.fytoplankton.cz/fytoatlas.php>
- [18] VANTHOOR-KOOPMANS, Marieke, Rene H. WIJFFELS, Maria J. BARBOSA a Michel H.M. EPPINK. Biorefinery of microalgae for food and fuel. *Bioresource Technology* [online]. 2013, **135**, 142-149 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.10.135. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852412016446>
- [19] KUMAR, Amit, Sarina ERGAS, Xin YUAN, Ashish SAHU, Qiong ZHANG, Jo DEWULF, F. Xavier MALCATA a Herman VAN LANGENHOVE. Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology* [online]. 2010, **28**(7), 371-380 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.tibtech.2010.04.004. ISSN 01677799. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167779910000715>
- [20] ENAMALA, Manoj Kumar, Swapnika ENAMALA, Murthy CHAVALI, et al. Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **94**, 49-68 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.012. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118303551>
- [21] JACOB-LOPES, Eduardo, Mariana M MARONEZE, Mariany C DEPRÁ, Rafaela B SARTORI, Rosangela R DIAS a Leila Q ZEPKA. Bioactive food compounds from microalgae: an innovative framework on industrial biorefineries. *Current Opinion in Food Science* [online]. 2019, **25**, 1-7 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.cofs.2018.12.003. ISSN 22147993. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214799318301048>
- [22] SOTO-SIERRA, Laura, Petya STOYKOVA a Zivko L. NIKOLOV. Extraction and fractionation of microalgae-based protein products. *Algal Research* [online]. 2018, **36**, 175-192 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1016/j.algal.2018.10.023. ISSN 22119264. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211926418304612>
- [23] POSTEN, Clemens a Christian WALTER. *Microalgal biotechnology: integration and economy* [online]. Boston: Walter de Gruyter, 2012 [cit. 2019-04-15]. ISBN 978-3-11-029827-7. Dostupné z: databáze Knovel

- [24] VITOVA, Milada, Katerina BISOVA, Shigeyuki KAWANO a Vilem ZACHLEDER. Accumulation of energy reserves in algae: From cell cycles to biotechnological applications. *Biotechnology Advances* [online]. 2015, 33(6), 1204-1218 [cit. 2018-09-24]. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.04.012. ISSN 07349750. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975015000919>
- [25] MURRAY, Robert K. Harperova Biochemie. 23. vydání. Praha: H&H, 1998. Lange medical book. ISBN 80-857-8738-5.
- [26] YANG, Shang-Tian. *Bioprocessing for value-added products from renewable resources: new technologies and applications* [online]. Boston: Elsevier, 2007 [cit. 2017-11-05]. ISBN 978-0-444-52114-9. Dostupné z: databáze Knovel
- [27] SINGH, Lalit Kumar a Gaurav CHAUDHARY. *Advances in biofeedstocks and biofuels: Biofeedstocks and Their Processing* [online]. Beverly, Massachusetts: Scrivener Publishing, 2016 [cit. 2017-11-12]. ISBN 978-1-119-11725-4. Dostupné z: databáze Knovel
- [28] PANDEY, Ashok. *Biofuels from algae* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2014 [cit. 2017-11-21]. ISBN 978-044-4595-584. Dostupné z: platformy ProQuest Ebook Central
- [29] KHANRA, Saumyakanti, Madhumanti MONDAL, Gopinath HALDER, O.N. TIWARI, Kalyan GAYEN a Tridib Kumar BHOWMICK. Downstream processing of microalgae for pigments, protein and carbohydrate in industrial application: A review. *Food and Bioproducts Processing* [online]. 2018, 110, 60-84 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1016/j.fbp.2018.02.002. ISSN 09603085. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960308518300105>
- [30] LEHMUSKERO, Anni, Matilde SKOGEN CHAUTON a Tobias BOSTRÖM. Light and photosynthetic microalgae: A review of cellular- and molecular-scale optical processes. *Progress in Oceanography* [online]. 2018, **168**, 43-56 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.pocean.2018.09.002. ISSN 00796611. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079661118301058>
- [31] SINGH, Gulab a S.K. PATIDAR. Microalgae harvesting techniques: A review. *Journal of Environmental Management* [online]. 2018, 217, 499-508 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.04.010. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479718303840>
- [32] SATI, Himanshu, Madhusree MITRA, Sandhya MISHRA a Prashant BAREDAR. Microalgal lipid extraction strategies for biodiesel production: A review. *Algal Research* [online]. 2019, **38** [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101413. ISSN 22119264. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221192641830585X>
- [33] FLICKINGER, Michael C, ed. *Encyclopedia of industrial biotechnology: bioprocess, bioseparation, and cell technology* [online]. Hoboken, N.J.: Wiley, c2010 [cit. 2018-11-18]. ISBN 978-0-470-61004-6. Dostupné z: databáze Knovel
- [34] ROUX, Jean-Maxime, Hadrien LAMOTTE a Jean-Luc ACHARD. An Overview of Microalgae Lipid Extraction in a Biorefinery Framework. *Energy Procedia* [online]. 2017, 112, 680-688 [cit. 2019-02-04]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1137. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217312626>

- [35] BRENNAN, Liam a Philip OWENDE. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, 14(2), 557-577 [cit. 2019-03-31]. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.009. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109002408>
- [36] CHIA, Shir Reen, Hwai Chyuan ONG, Kit Wayne CHEW, et al. Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. *Renewable Energy* [online]. 2018, 129, 838-852 [cit. 2018-10-04]. DOI: 10.1016/j.renene.2017.04.001. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148117302938>
- [37] SHUKLA, Madhulika a Sachin KUMAR. Algal growth in photosynthetic algal microbial fuel cell and its subsequent utilization for biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, 82, 402-414 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.067. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117313163>
- [38] ZHOU, Wenguang, Paul CHEN, Min MIN, et al. Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 36, 256-269 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.073. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114003116>
- [39] VRÁNA, Michal. Odpadní vody [online]. In: . [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: https://www.vakvs.cz/userfiles/admin/files/pro_skoly/odpadni_vody.pdf
- [40] Přednášky: Martin Pivokonský [online]. 2018 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: www.pivokonsky.wz.cz
- [41] PECHÁČEK, Jiří. Čištění odpadních vod [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-a-ekologie_43-44/44_MMP/081_cisteni-odpadnich-vod---Pechacek.pdf
- [42] DELGADILLO-MIRQUEZ, Liliana, Filipa LOPES, Behnam TAIDI a Dominique PAREAU. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology Reports* [online]. 2016, 11, 18-26 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.btre.2016.04.003. ISSN 2215017X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2215017X16300182>
- [43] SINGH, Vaishali, Archana TIWARI a Moumita DAS. Phyco-remediation of industrial waste-water and flue gases with algal-diesel engenderment from micro-algae: A review. *Fuel* [online]. 2016, 173, 90-97 [cit. 2019-02-03]. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.031. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236116000405>
- [44] ABDEL-RAOUF, N., A.A. AL-HOMAIDAN a I.B.M. IBRAHEEM. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences* [online]. 2012, 19(3), 257-275 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.sjbs.2012.04.005. ISSN 1319562X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1319562X12000332>
- [45] HWANG, Jae-Hoon, Jared CHURCH, Seung-Jin LEE, Jungsu PARK a Woo Hyoung LEE. Use of Microalgae for Advanced Wastewater Treatment and Sustainable Bioenergy Generation. *Environmental Engineering Science* [online]. 2016, 33(11), 882-897 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1089/ees.2016.0132. ISSN 1557-9018. Dostupné z: <http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ees.2016.0132>

- [46] KUMAR, Kanhaiya, Chitrlekha Nag DASGUPTA, Bikram NAYAK, Peter LINDBLAD a Debabrata DAS. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource Technology* [online]. 2011, **102**(8), 4945-4953 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.054. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852411001234>
- [47] VAN DEN HENDE, Sofie, Han VERVAEREN a Nico BOON. Flue gas compounds and microalgae: (Bio-)chemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology Advances* [online]. 2012, **30**(6), 1405-1424 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.02.015. ISSN 07349750. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975012000663>
- [48] ZHAO, Bingtao a Yaxin SU. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **31**, 121-132 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.054. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113008034>
- [49] SAKAI, N, Y SAKAMOTO, N KISHIMOTO, M CHIHARA a I KARUBE. *Chlorella* strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO₂. *Energy Conversion and Management* [online]. 1995, **36**(6-9), 693-696 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/0196-8904(95)00100-R. ISSN 01968904. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/019689049500100R>
- [50] PIRES, J.C.M., M.C.M. ALVIM-FERRAZ, F.G. MARTINS a M. SIMÕES. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, **16**(5), 3043-3053 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.055. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112001499>
- [51] MAEDA, K., M. OWADA, N. KIMURA, K. OMATA a I. KARUBE. CO₂ fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae. *Energy Conversion and Management* [online]. 1995, **36**(6-9), 717-720 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/0196-8904(95)00105-M. ISSN 01968904. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/019689049500105M>
- [52] ZERAATKAR, Amin Keyvan, Hossein AHMADZADEH, Ahmad Farhad TALEBI, Navid R. MOHEIMANI a Mark P. MCHENRY. Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *Journal of Environmental Management* [online]. 2016, **181**, 817-831 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.06.059. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030147971630425X>
- [53] SURESH KUMAR, K., Hans-Uwe DAHMS, Eun-Ji WON, Jae-Seong LEE a Kyung-Hoon SHIN. Microalgae – A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [online]. 2015, **113**, 329-352 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.12.019. ISSN 01476513. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0147651314005740>
- [54] HU, Wei-Shou. *Engineering principles of biotechnology* [online]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018 [cit. 2018-10-05]. ISBN 978-1-119-15902-5. Dostupné z: databáze Knovel
- [55] JUNEJA, Ankita, Ruben CEBALLOS a Ganti MURTHY. Effects of Environmental Factors and Nutrient Availability on the Biochemical Composition of Algae for Biofuels Production: A Review. *Energies* [online]. 2013, **6**(9), 4607-4638 [cit. 2019-05-15].

- DOI: 10.3390/en6094607. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/6/9/4607>
- [56] NALLEY, Jakob O., Daniel R. O'DONNELL a Elena LITCHMAN. Temperature effects on growth rates and fatty acid content in freshwater algae and cyanobacteria. *Algal Research* [online]. 2018, 35, 500-507 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.algal.2018.09.018. ISSN 22119264. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211926418301577>
- [57] RICHMOND, Amos. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Ames, Iowa, USA: Blackwell Science, 2004. ISBN 06-320-5953-2.
- [58] SINGH, S.P. a Priyanka SINGH. Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 50, 431-444 [cit. 2017-11-05]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.024. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115004839>
- [59] RACHLIN, Joseph W. a Albania GROSSO. The effects of pH on the growth of *Chlorella vulgaris* and its interactions with cadmium toxicity. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* [online]. 1991, 20(4), 505-508 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1007/BF01065839. ISSN 0090-4341. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01065839>
- [60] ZHU, Baojun, Gu CHEN, Xupeng CAO a Dong WEI. Molecular characterization of CO₂ sequestration and assimilation in microalgae and its biotechnological applications. *Bioresource Technology* [online]. 2017, 244, 1207-1215 [cit. 2017-11-28]. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.199. ISSN 09608524. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096085241730874X>
- [61] Are there colors that exist beyond the known light spectrum that have not yet been detected?. *Quora* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Are-there-colors-that-exist-beyond-the-known-light-spectrum-that-have-not-yet-been-detected>
- [62] OGBONNA, James C. a Hideo TANAKA. Light requirement and photosynthetic cell cultivation: Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* [online]. 2000, 12(3/5), 207-218 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1023/A:1008194627239. ISSN 09218971. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1008194627239>
- [63] *Www.aquarium-light.com* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.aquarium-light.com/index.php/2015/05/13/biologie-und-led/>
- [64] ZHAO, Bingtao a Yaxin SU. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 31, 121-132 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.054. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113008034>
- [65] RAZZAK, Shaikh A., Mohammad M. HOSSAIN, Rahima A. LUCKY, Amarjeet S. BASSI a Hugo DE LASA. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, 27, 622-653 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.063. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113003663>

- [66] ABU-GHOSH, Said, Dror FIXLER, Zvy DUBINSKY a David ILUZ. Flashing light in microalgae biotechnology. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **203**, 357-363 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.12.057. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852415016879>
- [67] MARTÍN-GIRELA, Isabel, María Dolores CURT a Jesús FERNÁNDEZ. Flashing light effects on CO₂ absorption by microalgae grown on a biofilm photobioreactor. *Algal Research* [online]. 2017, **25**, 421-430 [cit. 2017-11-27]. DOI: 10.1016/j.algal.2017.06.008. ISSN 22119264. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211926417300310>
- [68] WANG, Chinchin a Christopher Q. LAN. Effects of shear stress on microalgae – A review. *Biotechnology Advances* [online]. 2018, 36(4), 986-1002 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.03.001. ISSN 07349750. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975018300399>
- [69] WANG, Bei, Christopher Q. LAN a Mark HORSMAN. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances* [online]. 2012, **30**(4), 904-912 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.01.019. ISSN 07349750. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975012000328>
- [70] DE JESUS, Sérgio S. a Rubens MACIEL FILHO. Potential of algal biofuel production in a hybrid photobioreactor. *Chemical Engineering Science* [online]. 2017, **171**, 282-292 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1016/j.ces.2017.05.041. ISSN 00092509. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250917303615>
- [71] PAUL, Edward L., Victor A. ATIEMO-OBENG a Suzanne M. KRESTA. *Handbook of industrial mixing: science and practice* [online]. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2004 [cit. 2019-05-20]. ISBN 978-0-471-26919-9. Dostupné z: databáze Knovel
- [72] PALATÝ, Zdeněk a Bohumil BERNAUER. *Membránové procesy*. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [73] SINGH, R.N. a Shaishav SHARMA. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, **16**(4), 2347-2353 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.026. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112000275>
- [74] GUPTA, Prabuddha L., Seung-Mok LEE a Hee-Jeong CHOI. A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* [online]. 2015, **31**(9), 1409-1417 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1007/s11274-015-1892-4. ISSN 0959-3993. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11274-015-1892-4>
- [75] LAM, Man Kee, Keat Teong LEE a Abdul Rahman MOHAMED. Current status and challenges on microalgae-based carbon capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2012, **10**, 456-469 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.07.010. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583612001673>

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

symboly využívající **latinská** písmena:

Symbol	Význam	Jednotka
A	koncentrace intracelulárních látek	[%]
c	rychlost světla	[$m \cdot s^{-1}$]
E	energie	[J]
e	Eulerovo číslo	[–]
h	Planckova konstanta	[$J \cdot s$]
h	výška vodního sloupce	[m]
I	intenzita světla	[cd]
N	počet buněk	[–]
P	tlak	[Pa]
S	plocha	[m^2]
t	čas	[s]
V	objem	[m^3]

symboly využívající **řecká** písmena:

Symbol	Význam	Jednotka
Δ	rozdíl	[–]
Φ	zářivý tok	[W]
γ	smyková rychlost	[s^{-1}]
φ	objemový podíl plynu v bioreaktoru	[–]
λ	vlnová délka světla	[nm]
μ	specifická rychlost růstu	[h^{-1}]
ρ	hustota	[$kg \cdot m^{-3}$]
τ	smykové napětí	[Pa]

dolní indexy:

Symbol	Význam
a	aktivační
d	úmrtí
\max	maximální hodnota
0	počáteční koncentrace
1	počáteční stav
2	koncový stav

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení skupin řas [12]	15
Obr. 2 <i>Dunaliella</i> sp. [14].....	16
Obr. 3 <i>Spirulina major</i> Kützing ex Gomont [14].....	16
Obr. 4 <i>Glaucocystis nostochinearum</i> ITZIGSOHN [14].....	17
Obr. 5 <i>Bangia atropurpurea</i> (Mertens ex Roth) Agard [14]	17
Obr. 6 <i>Klebsormidium</i> cf. <i>flaccidum</i> (Kützing) P. C. Silva, K. R. Mattox & W. H. Blackwell [14]	18
Obr. 7 <i>Rhipidodendron splendidum</i> F. Stein [14].....	18
Obr. 8 <i>Cryptomonas</i> sp. Ehrenberg [14].....	19
Obr. 9 <i>Synura uvella</i> Ehrenberg [14]	19
Obr. 10 <i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg [14]	20
Obr. 11 <i>Euglena</i> sp. [17].....	20
Obr. 12 Rozdělení proteinových produktů řas [22].....	22
Obr. 13 Klasifikace metod používaných k narušení buněk [34].....	27
Obr. 14 Rozdělení metod termochemické konverze [35]	28
Obr. 15 Rozdělení metod biochemické konverze [35].....	28
Obr. 16 Růstová křivka při vsádkové kultivaci [12].....	34
Obr. 17 Srovnání závislostí specifické rychlosti růstu na teplotě pro vybrané skupiny řas [56]	36
Obr. 18 Vliv hodnoty pH na růst řasy <i>Chlorella vulgaris</i> [59]	37
Obr. 19 Vlnové délky viditelného spektra barev v nanometrech [61].....	38
Obr. 20 Závislost rychlosti fotosyntézy na světle [12].....	39
Obr. 21 Šíření světla vodním sloupcem [63].....	40
Obr. 22 Vlnové délky různých zdrojů světla [30]	41
Obr. 23 Absorpce světla fotosynteticky aktivních částí řas [21].....	42
Obr. 24 Míchaný bioreaktor [26]	47
Obr. 25 Pneumaticky míchané bioreaktory [26]	49
Obr. 26 Panelový bioreaktor [74]	51

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Aktuální ceny produktů kultivace řas [21].....	21
Tab. 2 Obsah bílkovin různých druhů řas [1]	22
Tab. 3 Obsah lipidů u různých druhů řas [1]	23
Tab. 4 Obsah sacharidů různých druhů řas [1]	24
Tab. 5 Metody sklizení biomasy z řas [31].....	26
Tab. 6 Schopnost fixace CO ₂ vybraných druhů řas [50].....	31
Tab. 7 Schopnost biosorpce řas [52],[53]	32
Tab. 8 Tolerance řas k daným parametrům [46]	33
Tab. 9 Fixace CO ₂ u nejběžněji kultivovaných druhů řas [28]	38
Tab. 10 Důsledky intermitentního osvětlení [66]	40
Tab. 11 Nejlépe pohlcované frekvence světla jednotlivými chlorofyly [12]	41
Tab. 12 Výsledky experimentů ke zjištění kritických smykových napětí [68]	43
Tab. 13 Limitace růstu řas a jejich následky [55]	45
Tab. 14 Porovnání otevřených systémů a kultivačních bioreaktorů [33].....	46