

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra chemie**



**Česká zemědělská  
univerzita v Praze**

**Perspektivy biopaliv z vodních řas**

**Bakalářská práce**

**Autor práce: Jan Štich  
Obor studia: Pěstování rostlin**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Hönig, Ph.D. et Ph.D.**

**© 2021 ČZU v Praze**

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Perspektivy biopaliv z vodních řas" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 3. května 2021

---

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Vladimíru Hönigovi, Ph.D. et Ph.D. za rady a odbornou pomoc.

# Perspektivy biopaliv z vodních řas

## Souhrn

Tato bakalářská práce se zabývá tématem biopaliv z vodních řas. V první části práce jsou vymezeny pojmy jako trvale udržitelný rozvoj a pilíře trvale udržitelného rozvoje. Dále na trvale udržitelný rozvoj navazující pojem cirkulární ekonomika. Dalšími popsány pojmy jsou biomasa a biopaliva, která jsou následně rozdělena podle jednotlivých generací.

Druhá část práce je zaměřena na vodní řasy a jejich systematizaci. Zahrnuta je také jejich využitelnost a možnosti kultivace. Kultivace řas je rozdělena na kultivaci makro-řas a kultivaci mikro-řas. Kultivace mikro-řas je dále členěna na kultivaci v otevřených systémech, podlouhlých nádržích a fotobioreaktorech. Tato část je též věnována sklizni řas, či dalším doplňkovým kultivačním procesům, jako je například HRAP.

Třetí část práce je zaměřena na biopaliva z vodních řas. Konkrétně jsou zde popsána biopaliva jako bioethanol, bionafta, bioplyn, letecký biopetrolej a biovodík. V této části je zároveň nastíněno technologické zpracování těchto biopaliv.

Následující čtvrtá část se zabývá legislativou související s trvale udržitelným rozvojem a biopalivy z vodních řas. Konkrétně zmíněnými dokumenty jsou například Kjótský protokol či Pařížská dohoda. Poté následují evropské a české legislativní dokumenty.

Poslední část je zaměřena na budoucnost a perspektivy biopaliv z vodních řas, zejména z ekonomického a environmentálního hlediska, tj. z jejich vlivu na vodní a půdní prostředí, či potřebu organických a anorganických hnojiv.

**Klíčová slova:** biomasa, biopaliva, vodní řasy, energetika, pohonné hmoty, udržitelný rozvoj

# Perspectives of Algae Biofuels

## Summary

This bachelor thesis discusses biofuels fabricated out of algae. In the first section are defined terms such as sustainable development and its pillars and to it related circular economy. Another described terms are biomass and biofuels, which are further divided according to individual generations.

Second part of the thesis is focused on algae and their systematization as well as their usability and cultivation ability. Algae cultivation is divided into macroalgae and microalgae cultivation. Microalgae cultivation is further divided into cultivation in open systems, elongated tanks and fotobioreactors. This section also discusses algae harvestation or other additional cultivation processes such as HRAP.

Third part is focused on algae biofuels. Specifically biofuels like bioethanol, biodiesel, biogas, bio jet fuel and biohydrogen. In this section is also outlined technological processing of these biofuels.

Subsequent forth part deals with legislation related to sustainable development and algae biofuels. Specifically mentioned documents are for example Kyoto protocol or Paris agreement. Followed up by European and Czech legislative documents.

Final section is dedicated to future and algae biofuels perspective, namely economical and enviromental standpoint, i.e. from their influence on water and soil environment or need of organical and anorganical fertilizers.

**Keywords:** biomass, biofuels, algae, energetics, fuels, sustainable development

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Základní pojmy</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Trvale udržitelný rozvoj</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Cirkulární ekonomika.....	13
<b>3.2 Biomasa</b> .....	<b>15</b>
<b>3.3 Biopaliva</b> .....	<b>16</b>
3.3.1 Biopaliva první generace .....	16
3.3.2 Biopaliva druhé generace .....	17
3.3.3 Biopaliva třetí generace.....	19
<b>4 Vodní řasy</b> .....	<b>20</b>
<b>4.1 Systém řas</b> .....	<b>20</b>
<b>4.2 Využitelnost řas</b> .....	<b>22</b>
<b>4.3 Kultivace makro-řas</b> .....	<b>23</b>
4.3.1 Kultivace ve školkách.....	23
4.3.2 Kultivace na farmách .....	24
<b>4.4 Kultivace mikro-řas</b> .....	<b>24</b>
4.4.1 Kultivace v otevřených nádržích .....	25
4.4.2 Kultivace v podlouhlých míchaných nádržích .....	27
4.4.3 Kultivace ve fotobioreaktorech (PBR) .....	29
4.4.4 Sklizeň.....	31
<b>4.5 Doplnkové procesy kultivace řas</b> .....	<b>32</b>
<b>5 Biopaliva z vodních řas</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1 Bioethanol</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2 Bionafta</b> .....	<b>34</b>
<b>5.3 Bioplyn</b> .....	<b>35</b>
<b>5.4 Letecký biopetrolej/biokerosin</b> .....	<b>36</b>
<b>5.5 Biovodík</b> .....	<b>37</b>

<b>6</b>	<b>Legislativa .....</b>	<b>38</b>
6.1	Kjótský protokol .....	38
6.2	Pařížská dohoda .....	38
6.3	Legislativa Evropské unie v oblasti biopaliv .....	39
6.3.1	Zelené knihy .....	39
6.3.2	Bílé knihy .....	39
6.3.3	Směrnice Evropského parlamentu a Rady .....	40
6.4	Legislativa České republiky v oblasti biopaliv .....	41
<b>7</b>	<b>Budoucnost biopaliv z vodních řas .....</b>	<b>42</b>
7.1	Ekonomické hledisko .....	42
7.2	Environmentální hledisko .....	43
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>46</b>
9.1	Seznam obrázků .....	59
9.2	Seznam tabulek .....	59

# 1 Úvod

Kvůli obavám z globálního oteplování a ostatních rizik, které přináší změna klimatu stoupá zájem o ekologičtější výrobu, která bude produkovat méně skleníkových plynů a bude tím šetrnější k přírodnímu prostředí.

Jedním z největších producentů emisí je dopravní průmysl, s nímž souvisí pohonné hmoty. Pohonné hmoty představují až 70 % z celkové světové spotřeby energie. Současně využívaná fosilní paliva mají velmi vysoké emise skleníkových plynů, proto je velká část dnešního biotechnologického výzkumu soustředěná na vývoj alternativních zdrojů energie.

Jednou z alternativ je výroba biopaliv z biomasy. Nejvyužívanější plodinou pro získání biomasy jsou dnes energetické plodiny jako řepka, kukuřice a cukrová třtina. Biopaliva první generace označujeme výrobou biopaliv z plodin, které přímo konkurují potravinářské produkci. Výhodou této generace je snadná produkce biomasy a téměř nulová uhlíková bilance. Úsilí států o zvýšení produkce první generace biopaliv může mít ale i negativní důsledky, například při zabírání nových pěstebních ploch na úkor deštných pralesů.

Druhá generace biopaliv používá jako surovinu pro výrobu paliv zejména odpad z potravinářské produkce nebo lignocelulóзовou biomasu. Výhodou druhé generace je daleko menší konkurence zemědělské výrobě. Nevýhodou mohou být složitější výrobní procesy.

Po zjištěních, že biopaliva první a druhé generace jsou nedostačující pro snížení produkce CO<sub>2</sub> na únosnou úroveň se vývoj soustředí na biopaliva třetí generace.

Jako zdroj biomasy pro výrobu biopaliv třetí generace se využívají vodní řasy. Jejich předností je vysoká adaptabilita na prostředí a možnost pěstování na nezemědělské půdě. Nevýhodou jsou pak vyšší ekonomické náklady jak na založení výroby, tak náklady spojené s provozem kultivačním nádrží řas. Probíhající výzkum v oblasti biopaliv třetí generace se tedy soustředí hlavně na eliminaci ekonomických problémů a vyšší konkurenceschopnost fosilním palivům.

Vývoji a výzkumu v oblasti biopaliv třetí generace pomáhá snaha států a vlád o zlepšení světové ekologické situace.



## 2 Cíl práce

Cílem práce je predikovat udržitelný rozvoj výroby biopaliv z mořských řas. Na základě dostupných dat budou vytvořeny scénáře vývoje a vyhodnocena technická efektivnost.

## 3 Základní pojmy

V této kapitole jsou popsány všechny pojmy podstatné pro další pochopení problémů řešených dále v této práci.

### 3.1 Trvale udržitelný rozvoj

Koncept udržitelného rozvoje zahrnuje úvahy o spravedlnosti napříč generacemi a v rámci nich. Z dlouhodobého hlediska je důležité zohlednění hodnoty životního prostředí při rozhodování o směru a způsobu ekonomického růstu. Český zákon o životním prostředí, konkrétně § 6 zákona č. 17/1992 Sb., definuje udržitelný rozvoj jako: „*Trvale udržitelný rozvoj společnosti je takový rozvoj, který současným i budoucím generacím zachovává možnost uspokojovat jejich základní životní potřeby, a přitom nesnižuje rozmanitost přírody a zachovává přirozené funkce ekosystémů*“. Jinými slovy lze říci, že budoucí generace by měly mít nárok na alespoň stejnou úroveň sociálního a ekonomického blahobytu, jaký je k dispozici současným generacím. Dnešní hospodářský rozvoj tedy musí zajistit, aby nynější generace neomezily zajištěním svých potřeb blahobyt generací budoucích (Barbier & Burgess 2015).

#### Základní pilíře udržitelného rozvoje

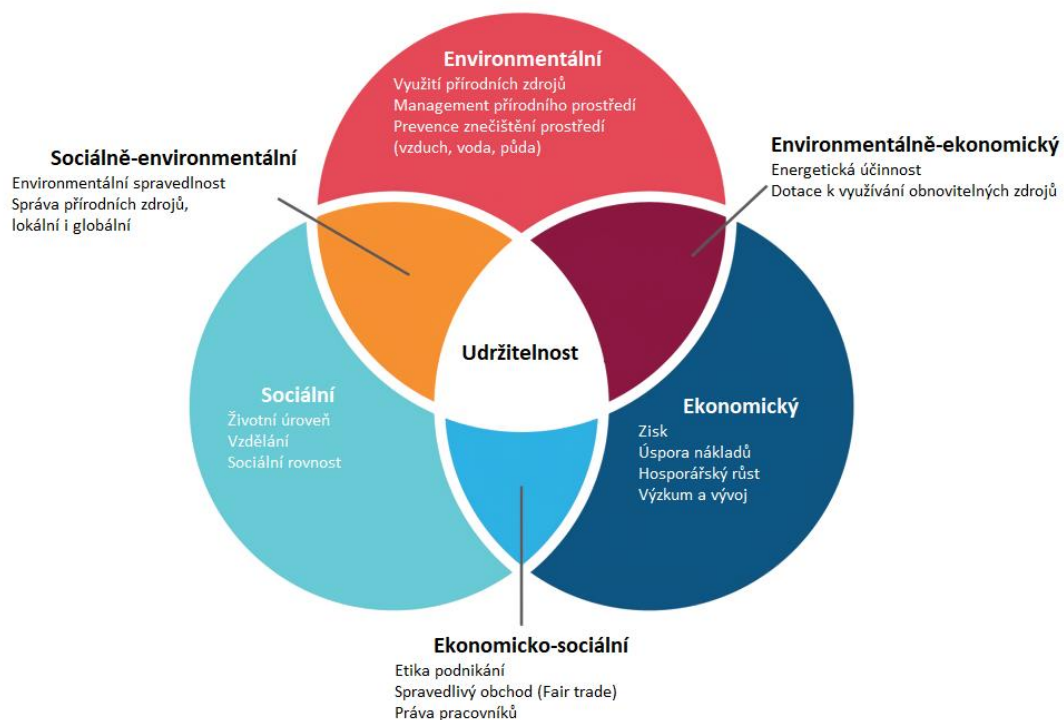
Podle Taylora (2016) jsou třemi hlavními problémy udržitelného rozvoje ekonomický růst, ochrana životního prostředí a sociální rovnost. Na základě toho lze tvrdit, že koncept trvale udržitelného rozvoje stojí v zásadě na třech koncepčních pilířích, ekonomickém, sociálním a environmentálním (Mensah & Ricart Casadevall 2019). Na Obr. 3.1 je zobrazena provázanost všech tří pilířů trvale udržitelné ekonomiky.

#### Ekonomický pilíř

Ekonomický pilíř pojednává o ekonomické udržitelnosti. Tím myslíme vytvoření systému výroby, který uspokojuje současnou úroveň spotřeby bez ohrožení budoucích potřeb (Lobo et al. 2015). Ekonomové minulých generací se domnívali, že nabídka přírodních zdrojů byla neomezená a kladli nepřiměřený důraz na zvýšení kapacity trhu (Du & Kang 2016). Rovněž věřili, že ekonomický růst bude doprovázen technologickým pokrokem, který povede k obnovení zničených přírodních zdrojů (Cooper & Vargas 2004). Postupně ovšem došlo k zjištění, že přirozené zdroje nejsou nekonečné, a ne všechny se dají doplnit či obnovit. Rostoucí měřítko ekonomického systému přesáhlo možnosti přírodních zdrojů a vyvolalo debatu o přehodnocení tradičních ekonomických postulátů. Mnoho akademiků začalo zpochybňovat proveditelnost nekontrolovaného růstu (Du & Kang 2016).

Dernbach (2003) uvádí, že důsledku populačního růstu se nároky na množství potravin, oblečení a osobního prostoru neustále zvětšují v rámci populace, ale že celkové dostupné

prostředky a zdroje nelze zvýšit, aby byly tyto nároky splněny navždy za tehdejšího ekonomického systému. Další zdroje, konkrétně Retchless & Brewer (2016), dále tvrdí, že jelikož se zdá, že hlavním problémem je ekonomický růst, tak jsou ignorovány jiné podstatné položky nákladů, jako je například dopad znečištění přírodního prostředí, zatímco rostoucí poptávka po zboží a službách nadále řídí trhy. Ekonomická udržitelnost proto vyžaduje rozhodnutí, kterou budou přijímána, co fiskálně nejlepším možným způsobem při zohlednění dalších aspektů udržitelnosti (Zhai & Chang 2018).



Obr. 3.1 – Tři základní pilíře trvale udržitelného rozvoje (Mensah 2019)

### Sociální pilíř

Sociální udržitelnost zahrnuje pojmy jako spravedlnost, rovnoprávnost, kulturní identita a institucionální stabilita. Sociální udržitelnost v zásadě implikuje systém zmírňující chudobu (Daly 1992).

Boulanger (2008) ve své studii uvádí, že základem udržitelného sociálního rozvoje je informovanost veřejné politiky. Mezinárodní institut pro udržitelný rozvoj obdobně vytvořil

politický rámec pravidel spojený s indexem udržitelnosti. Rámec se skládá ze šesti hlavních oblastí:

- Mezinárodní obchod a investice
- Hospodářská politika
- Změna klimatu a energetiky
- Správa přírodních zdrojů
- Komunikační technologie
- Měření a hodnocení

### **Environmentální pilíř**

Koncept udržitelnosti životního prostředí je o odolnosti přírodního prostředí a o jeho schopnosti podporovat lidský způsob života. Udržitelnost životního prostředí souvisí s integritou ekosystému a únosností přírodního prostředí (Brodhag & Talière 2006). To vyžaduje, že přírodní kapitál bude udržitelně využíván jako zdroj ekonomických vstupů a jako záchyt odpadu. Z toho vyplývá, že regenerace přírodních zdrojů musí probíhat ve vyšší míře než jejich těžba, zatímco odpad musí být emitován v nižší míře, než v jaké je možné ho asimilovat do prostředí. Je tomu tak, protože zemské ekosystémy mají hranice, za nimiž nejde nadále udržovat rovnováha. Pátání po neomezeném růstu ekonomiky však klade na systém Země stále větší požadavky a tím ohrožuje celý ekosystém, protože se můžeme dostat do situace, kdy technologický pokrok nebude schopen podporovat tento exponenciální růst, v rámci environmentální oblasti a dojde k nevratnému poškození přírodního prostředí (Mensah & Ricart Casadevall 2019). Důkazy podporující obavy o udržitelnost životního prostředí se stále množí (ICSU 2017). Klimatické změny jsou například přesvědčivým argumentem o nutnosti plánu udržitelného životního prostředí. Změna klimatu se týká významných a dlouhodobých změn klimatického systému způsobených lidskou činností (Coomer 1981). Mezi tyto změny patří zvyšující se koncentrace skleníkových plynů, oteplování atmosféry, oteplování oceánů a moří, s tím související úbytek ledu, stoupající hladina moře a zvyšující se acidifikace oceánů (Du & Kang 2016).

Tyto změny už vykazují známky ovlivňování biologické rozmanitosti. Kumar a kol. (2013) zjistili, že vyšší teploty prostředí mají tendenci ovlivňovat načasování reprodukce zvířat a rostlin, migrační vzorce zvířat a velikost populací. V zájmu udržitelného rozvoje by se měla společnost přizpůsobit vzniklé realitě a snažit se omezit svůj negativní vliv na přírodní ekosystémy (Campagnolo et al. 2018). Současná míra vymírání druhů převyšuje přirozenou míru hranici (SDG Indicators: Statistics Division 2018). Současné druhy se musí přizpůsobit přesunutím do vyšších nadmořských výšek a šířek, a to jak živočichové, tak rostliny. Pokud se druhy nedokážou přizpůsobit novým geografickým podmínkám, jejich šance na přežití se výrazně sníží. Předpokládá se, že do roku 2080 by mohlo kvůli nárůstu hladiny moří ztraceno asi 20 % pobřežních mokřadů (SDG Indicators: Statistics Division 2018).

Toto vše jsou důležité otázky udržitelnosti životního prostředí, protože jak již bylo řečeno, mají za důsledek produktivnost přírodního prostředí a jeho schopnost podporovat lidský život.

### 3.1.1 Cirkulární ekonomika

Cirkulární ekonomika neboli oběhové hospodářství označuje ekonomický systém zaměřený na eliminaci odpadů a neustálé znovupoužívání (cirkulaci) zdrojů. V cirkulární ekonomice se odpad z jedné produkce použije jako vstup do produkce druhé. Oběhové hospodářství se rychle vyvíjí, zejména v dnešní době, kdy lidstvo čelí různým výzvám, včetně změny klimatu, pandemie, devastace životního prostředí a prohlubování sociálních nerovností (Ghisellini et al. 2016).

Z probíhající pandemie COVID-19 můžeme odvodit tři příslušná pozorování (Liu & Ramakrishna 2021). Prvním je, že nejnütnější je zařídít čistý vzduch, vodu, jídlo, energie a základní hygienické potřeby, s čímž souvisí zdravotní péče, podpora duševního zdraví a podpora rodiny. Jinými slovy, potřebujeme vést zdravý život ve zdravém a bezpečném prostředí. Zadruhé, digitální technologie včetně internetu a umělé inteligence (AI) umožnila analýzu velkých dat. Mobilní komunikační zařízení a cloudové služby umožňující studium, částečnou péči a práci na dálku odkudkoli a kdykoli prakticky libovolným tempem se staly nedílnou součástí lidské společnosti. Jinak řečeno, moderní společnost považuje tyto technologie za nezbytné v bezprecedentních i běžných dobách. Zatřetí, moderní společnost je zaplavena nepodstatnými věcmi, jako je volnočasové cestování za zábavou nebo bezpředmětné nakupování nepotřebných produktů. Moderní společnost se těší z bohaté nabídky produktů a energetické zdrojů dostupných miliardám lidí po celém světě. Produkce odpadu přiměřeně roste v souvislosti ke stále se zvyšující spotřebě. Tento odpad často není adekvátně recyklován, a proto poté končí v půdě, vodě anebo v ovzduší naší planety. Současné způsoby moderní společnosti nepřispívají k zajištění udržitelnosti zdrojů Země pro budoucí generace. Proto je hlavním cílem oběhového hospodářství a trvale udržitelného rozvoje snaha vytvořit novou moderní společnost, v níž budou způsoby současné co nejméně kompromitovat potřeby budoucích generací. Požadované vlastnosti, která by nová moderní společnost měla mít jsou zaměřeny na vývoj ochrany života na Zemi a zajištění lepší kvality života pro celou populaci (Deutz 2020).

Politici činitelé, výrobci produktů, poskytovatelé služeb a spotřebitelé postupně vytvářejí politiku šetrnější k životnímu prostředí, jedná se zejména o inovace obchodních a produkčních postupů a o změnu spotřebitelského chování směrem k udržitelnosti. Přijetí rozvíjejících se technologií, které nejsou vždy dokonalé, umožňuje transformaci tržního oběhu a udržitelnost ekonomiky. Cirkulární ekonomika je poháněna jak udržitelnou výrobou, tak udržitelnou spotřebou. Nejkritičtější faktorem ekonomické transformace je vzdělávání, které formuje myšlení, jednání a chování všech zúčastněných stran (Liu & Ramakrishna 2021).



## 3.2 Biomasa

Biomasa je jedním z nejstarších zdrojů energie využívaných lidstvem. Za biomasu považujeme jakoukoli hmotu rostlinného nebo živočišného původu, ze které jsou nebo byla tvořena těla živých organismů. Obvykle ji rozdělujeme na dřevnatou a nedřevnatou biomasu. Dále ji můžeme dělit například dle jejího původu (Rosillo-Calle et al. 2007).

### **Biomasa z přirozených lesů**

Do této kategorie patří všechna biomasa, která se nalézá v uzavřeném prostředí přirozených lesů. Náleží sem také všechna biomasa nacházející se ve zbytcích z lesů (Rosillo-Calle et al. 2007).

### **Biomasa z produkčních lesů**

Tato kategorie zahrnuje jak plantáže určené na výrobu celulózy, papíru nebo nábytku, tak plantáže určené k výrobě paliv, jako je například dřevěné uhlí. Jejich potenciální bioenergetické využití je do budoucna značně omezeno vzhledem k množství odpadu vyprodukovanému při jejich pěstování.

V 70. a 90. letech byly energetické plantáže považovány za hlavní zdroj energie z biomasy do budoucna, ale v posledních letech je jejich význam považován za stále omezenější (Rosillo-Calle et al. 2007).

### **Biomasa ze zemědělsko-průmyslových plantáží**

Jedná se o biomasu získávanou z lesů výhradně navržených pro výrobu zemědělsko-průmyslových produktů, kde se dřevo shromažďuje pouze jako vedlejší produkt. Mezi příklady pěstovaných plodin můžeme uvést čajovník, kávovník, kaučukovník, olejně a kokosové palmy a bambusové plantáže (Rosillo-Calle et al. 2007).

### **Biomasa ze stromů rostoucích mimo lesy**

Jde o biomasu získávanou z dřevin pěstovaných mimo lesy. Jedná se zejména o stromy a keře pěstované podél silnic, ve městech nebo ovocných sadech. Tyto dřeviny mají spíše okrasný charakter, nebo slouží k produkci ovoce (Rosillo-Calle et al. 2007).

### **Biomasa ze zemědělských plodin**

Do této kategorie patří biomasa získaná z plodin pěstovaných speciálně jako zdroj potravin, krmiva. Patří sem i plodiny pěstované pro energetické účely (Rosillo-Calle et al. 2007).

## Biomasa ze zbytků plodin

Patří sem biomasa z rostlinných zbytků ze zemědělské produkce. Mezi příklady můžeme uvést slámu (Rosillo-Calle et al. 2007).

### 3.3 Biopaliva

Biopaliva nazýváme paliva vyráběná z organických materiálů neboli z biomasy. Těmito materiály mohou být zbytky z rostlinné a živočišné produkce, dřevo, sláma, odpady potravinářského průmyslu anebo rostliny pěstované primárně pro výrobu biopaliv (Tabak 2009).

Biopaliva se od fosilních paliv liší především tím, že jsou v určitém smyslu obnovitelné. Biopaliva běžně rozdělujeme do tří generací, podle druhu výchozích látek sloužících k výrobě finálních produktů (Tabak 2009).

#### 3.3.1 Biopaliva první generace

Termínem biopaliva první generace označujeme paliva, která byla získána zpracováním primárních zemědělských produktů. Biomasa pro tuto generaci biopaliv je nejefektivněji produkována v tropických pásmech, jelikož jsou zde vhodnější tepelné a vlhkostní podmínky a dostatek orné půdy, roční výnosy plodin v tomto pásmu jsou dvakrát až třikrát vyšší než u plodin pěstovaných v mírném pásmu (Hromádka et al. 2010), nejčastěji je pro tyto účely v tropických oblastech pěstována cukrová třtina. Negativním aspektem kultivace plodin na produkci biopaliv první generace v tropických oblastech je, že nadměrným pěstováním dochází k zvýšení kyselosti půdy vzhledem k použitým umělým hnojivům a ztrátě biodiverzity působením pesticidů (Subramaniam et al. 2019).

Produktem bývá nejčastěji bioethanol nebo biobutanol získaný z cukernaté nebo škrobové části rostlin, příkladem plodin využívaných pro tyto produkty jsou obiloviny, cukrová třtina a cukrová řepa. V neposlední řadě je nutné uvést bionaftu nebo MEŘO (methylester řepkového oleje), pro jejichž výrobu se nejčastěji používají semena olejnatých rostlin zejména řepky olejné (Ziolkowska 2020). Dalším druhem biopaliv první generace je například BioETBE (bioethylercbutylether), který se vyrábí adicí bioethanolu s isobutanem, a nakonec rostlinné oleje, které se získávají zejména ze sóji, slunečnice, olejné a kokosové palmy a *jatrophy* neboli dáivivce (Larson 2006).

Značnou nevýhodou biopaliv první generace je to, že konkurují potravinářské produkci a tím může docházet k tlaku na zvyšování cen konzumních potravin (Adeniyi et al. 2018). Další jejich nevýhodou je nižší poměr redukce CO<sub>2</sub> zachyceného z atmosféry během fotosyntézy ku



vyprodukovanému CO<sub>2</sub> při výrobě a následné spotřebě těchto biopaliv oproti ostatním generacím (Baudry et al. 2018).

### **Technologie výroby biopaliv první generace**

U bioethanolu nebo biobutanolu vyráběného z cukrodárných plodin se používá extrakce jednoduchých cukrů z biomasy a následně jejich fermentace, zatímco u škrobnatých plodin je proces výroby více komplexní, protože se nejdříve musí škrob přeměnit enzymatickými procesy za vysokých teplot na jednoduché cukry, to navíc znamená vyšší energetické náklady. Bioethanol se také dá vyrábět smícháním lipidů přítomných v olejnatých plodinách s alkoholy, například methanolem, chemickým procesem zvaným transesterifikace. Takto vyráběný bioethanol dosahuje 88 % až 95 % energetické obsahu konvenční nafty v porovnání s průmyslově vyráběným ethanolem, který dosahuje pouze 70 % (Timilsina & Shrestha 2010).

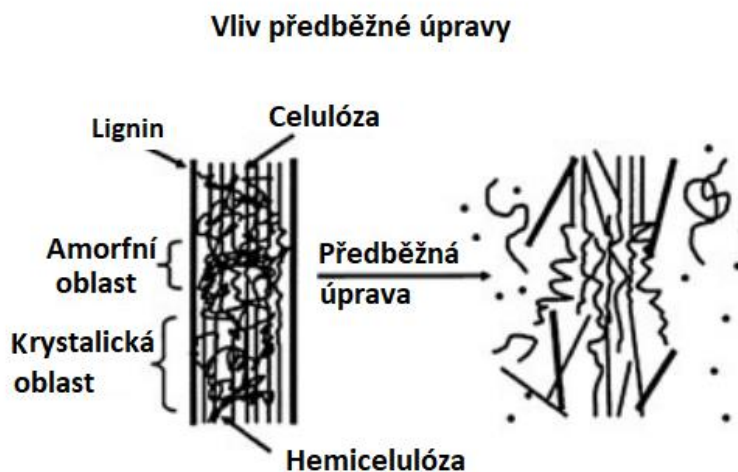
### **3.3.2 Biopaliva druhé generace**

Biopaliva druhé generace se od biopaliv předchozí generace liší zejména svým vlivem na životní prostředí a typem biomasy užití na jejich výrobu. Surovinami pro jejich výrobu jsou především lignocelulózní „nepotravinářské“ biomasy (seno, sláma, rostlinné zbytky, dřevo a zbytky z jeho těžby) (Moodley 2021).

Biopaliva druhé generace mají až o 40 % vyšší potenciál ve snížení emisí CO<sub>2</sub> ve srovnání s biopalivy první generace a až o 90 % oproti fosilním palivům (Crackner 2008).

### **Technologie výroby biopaliv druhé generace**

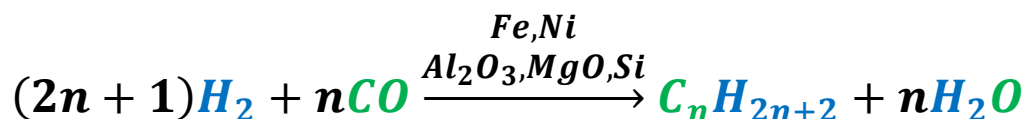
Biopaliva druhé generace se zpracovávají vícero způsoby. Nejpodstatnější úpravou je předběžná úprava, která je nezbytným krokem pro finální přeměnu celulózy v palivo. Je nutno změnit strukturu lignocelulózní biomasy, aby byla lépe přístupná pro enzymy, které převádějí sacharidové polymery na fermentovatelné cukry, jak je znázorněno na Obr. 3.4. Cílem je porušit ligninovou vrstvu a narušit krystalickou strukturu celulózy. Předběžná úprava je považována za jeden z nejnákladnějších kroků při zpracování celulózní biomasy na fermentované cukry, s náklady pohybujícími se až okolo 30 dolarů na galon vyrobeného ethanolu (Gupta & Tuohy 2013), je to také jedna z etap, ve které je nejvíce prostoru pro optimalizaci technologického postupu a s tím spojené snížení nákladů. Toho se dá nejlépe docílit zvolením předběžné úpravy, která bude pracovat i při využití nízkého množství enzymatických inhibitorů hydrolýzy (Sun & Cheng 2002).



Obr. 3.4 – Schematické znázornění efektu předběžné úpravy (Hsu et al. 1980; Mosier et al. 2005)

### Bionafta a biokerosin/letecký biopetrolej (BioTfuel 2016)

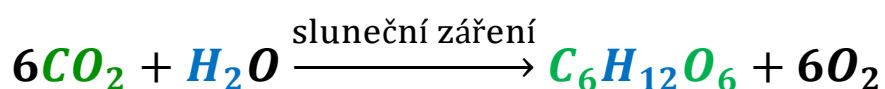
Jedním ze způsobů je kompletní zplyňování biomasy, které probíhá ve více fázích. V první z etap prochází biomasa takzvanou předběžnou úpravou. Během této fáze je biomasa vysušena pomocí tepla a rozdrcena na drobné fragmenty, které následně projdou torrefakcí (pomalá pyrolýza prováděná za nízkých teplot, nejčastěji v teplotním rozmezí od 200 do 300 °C) a nakonec úplným rozmělněním až na prášek s požadovanými optimálními vlastnosti pro vstřikování do zplynovače. Druhou fází je zplyňování, torrefikovaná pevná hmota je zahřívána na velmi vysokou teplotu za přítomnosti kyslíku ve zplynovači s unašečem a tím se přeměňuje na syntézní plyn. Tento syntézní plyn musí mít velmi vysoký stupeň čistoty, aby se mohl přeměnit na kapalné palivo, proto třetí fáze procesu spočívá v čištění syntézního plynu pomocí rozpouštědel a katalyzátorů. Poslední fází je Fischer-Tropschova syntéza, což je katalytická reakce, viz Rovnice 3.1, která převede vyčištěný syntézní plyn na kapalný uhlovodík. Kombinace těchto procesů umožňuje vyrábět bionaftu a biokerosin vysoké kvality (Schneider et al. 2016).



Rovnice 3.1 – Fischer-Tropschova syntéza

### 3.3.3 Biopaliva třetí generace

Nejnovější třetí generace biopaliv používá jako zdroj biomasy vodní řasy, zejména mikro-řasy. Tato generace má největší potenciál díky vysoké reprodukční frekvenci řas a také díky vyššímu obsahu lipidů oproti ostatním zdrojům biomasy (až 50 % hmotnosti řas je za normálních podmínek tvořeno lipidy). Dále také tím, že efektivita přeměny sluneční energie na biomasu je u řas daleko vyšší než u vyšších rostlin, navíc jsou řasy nenáročné na prostředí a podmínky kultivace (Lee & Shah 2013). Níže je znázorněna rovnice fotosyntézy (Rovnice 3.2), což je proces nezbytný pro přeměnu CO<sub>2</sub> na biomasu. Zájem o biopaliva vyráběná z mikro-řas začal vzrůstat zejména kvůli schopnosti mikro-řas akumulovat ve stresových podmínkách až 60 % lipidů v přepočtu na suchou hmotnost (Li-Beisson & Peltier 2013).



Rovnice 3.2 – Rovnice fotosyntézy

## 4 Vodní řasy

Pojem řasy zahrnuje velmi obsáhlou skupinu jednoduchých autotrofních fotosyntetizujících organismů. V minulosti se celá nejednotná skupina řadila do takzvaných nižších rostlin, což je archaické označení, které se dnes již nepoužívá a bylo nahrazeno označením „stélkaté cévnaté rostliny“. Celá skupina, řasy, byla pouze shloučením několika nepříbuzných skupin organismů a pouze část z nich ve skutečnosti patří mezi rostliny (Steneck 2001).

Řasy mohou být jak jednobuněčné, tak mnohobuněčné formy. Tělo mnohobuněčných řas je tvořeno stélkou (Kerrison 2017). Řasy jsou schopné přežít pouze ve vodním prostředí. Žijí především ve slaných a sladkých vodách, ale některé řasy se adaptovali životu na souši symbiózou s houbami a jsou součástí lišejníků. Řasy můžeme dělit podle několika způsobů (Schmidt 2019).

### 4.1 Systém řas

Jeden z nejpoužívanějších je dělení podle řas podle jejich morfologických znaků, toto dělení vedlo k zavedení členění řas na zelené, hnědé, červené a modré neboli sinice, které se od ostatních liší jednodušší prokaryotickou buňkou (Kliman 2016).

Zelené řasy mají největší příbuznost se suchozemskými rostlinami, ale stejně se jedná o nepřírozenou, uměle vytvořenou skupinu, jelikož se během svého vývoje odlišily a oddělily od vyšších rostlin (Kučera 2003). Červené řasy neboli ruduchy tvoří v současné době samostatné monofylum, kmen, Rhodophyta v říši Plantae. Hnědé řasy tvoří další nepřírozenou skupinu, která nemá moc společného s rostlinami. Plastidy hnědých řas jsou ruduchálního původu (Stechmann & Cavalier-Smith 2003) a proto je odborník Thomas Smith na konci 20. století zařadil do vlastní říše Chromista. V 21. století se podařilo prokázat že i tato říše je nepřírozená a proběhlo rozdělení hnědých řas do tří samostatných taxonů. Největší část z nich byla zařazena do infraříše SAR, která získala své označení po třech hlavních skupinách, které zahrnuje, Stramenopila, Alveolata, Rhizaria. Zbytek, skrytěnky (*Cryptophyceae*) a Haptophyta, byl zařazen do svých vlastních taxonů. Modré řasy, sinice, které se dříve také řadili mezi nižší rostliny patří ve skutečnosti do domény bakterií (*Bacteria*). Jsou to prokaryotické organismy, které původně dali vzniknout plastidům v rostlinných buňkách a v buňkách vodních řas (Stechmann & Cavalier-Smith 2003). Podrobnější náhled na tento archaický způsob rozřazení je znázorněn v Tab. 4.1.

Název	Druh barviv	Druh zásobních látek	Buněčná stěna	Bičík
Zelené řasy	chlorofyl a, b α- a β-karoteny xantofyly	škrob	celulóza glukosidy xylany manany	mají
Červené řasy	chlorofyl a, d fykocyaniny fykoerythrin α- a β-karoteny xantofyly	florideový škrob	celulóza xylany sulfatované polysacharidy algin	nemají
Hnědé řasy	chlorofyl a, c β-karoten fukoxanthin xantofyly	laminarin	celulóza algin myko- polysacharidy	mají

Tab. 4.1 – Archaické rozdělení řas (Bold a Wynne 1978)

Dalším možným dělením, které se v současnosti používá je dělení na makro- a mikro-řasy, které je rozděluje základě jejich morfologie a velikosti. Jak už jejich název napovídá, mikro-řasy jsou mikroskopické, tímto pojmem označujeme objekty, které nelze pozorovat pouhým okem. Většina mikro-řas je jednobuněčných (John et al. 2011). Naopak makro-řasy jsou mnohobuněčnými organismy a jejich tělo se označuje jako stélka, která je diferenciována na jednotlivé orgány připomínající kořeny, stonky a listy vyšších rostlin (Chen et al. 2009).

Mikro-řasy jsou schopné tolerovat a využívat daleko podstatně vyšší hladiny CO<sub>2</sub> (John et al. 2011). Mohou tedy využívat oxid uhličitý produkovaný tepelnými elektrárnami, které zpracovávají fosilní paliva, což může ve výsledku snížit emise skleníkových plynů (Nigam & Singh 2011). V Tab. 4.2 je zobrazeno současné rozřazení řas do příslušných taxonů, které vychází z bližšího prozkoumání genetiky a historického vývoje jednotlivých druhů.

Doména	Superskupina	Bližší zařazení	Skupiny řas	Vznik plastidu
<b>Bacteria</b>			sinice	-
<b>Eukaryota</b>	Archaeplastida	Ruduchy	ruduchy	primární endosymbióza se sinicemi
		Glaukophyta	glaukofyty	
		Viridiplantae	chlorofyty charofyty	
	SAR	Rhizaria	chloarachniofyty	sekundární endosymbióza s chlorofyty
		Stramenopiles	rozsivky, zlativky, chaluhy, různobrvky	sekundární endosymbióza s ruduchami
		Alveolata	obrněnky	
		Cryptista	skrytěnky	
	Haptista	haptofyty		

Tab. 4.2 – Současné rozdělení řas (Burki et al. 2007)

## 4.2 Využitelnost řas

Skupina řas zahrnuje několik tisíc různých druhů, to nám umožňuje výběr druhu s požadovanými vlastnostmi dle kultivačního prostředí (Yew et al. 2019).

Buňky vodních řas jsou schopné plout a držet se na hladině, tím se vyhýbají potřebě mít strukturální biopolymery, jako je hemicelulóza a lignin, které jsou nezbytné pro růst vyšších rostlin v suchozemském prostředí (Culaba et al. 2020). Tato jejich vlastnost zjednodušuje proces výroby bioethanolu a ostatních biopaliv, tím že eliminuje kroky chemické a enzymové předběžné úpravy, která se používá na rozklad biopolymerů na jednoduché cukry (Li-Beisson & Peltier 2013). Kvůli strukturálním rozdílům mezi řasami a suchozemskými vyššími rostlinami jsou řasy schopné produkovat daleko vyšší výnosy materiálů z nich získávaných, například lipidů, které se využívají pro výrobu biopaliv, nebo bílkovin a polysacharidů využívaných na výrobu potravinových doplňků (Griffiths et al. 2016).

Mořské řasy jsou schopné produkovat obrovské množství sacharidů během celého roku (Matsumoto et al. 2003). Řasy rostoucí v lesích v přílivových oblastech patří k největším producentům biomasy na planetě. Navíc mohou být řasy sklizeny v relativně krátkém čase v porovnání s ostatními plodinami a lépe tím uspokojit rostoucí poptávku po produktech z nich vyráběných (biopaliva, krmiva hospodářských zvířat, potravinové a kosmetické doplňky atd.) (Adams et al. 2009).

Řasy mají skromné pěstební požadavky, mohou zaplnit kultivační prostředí i do velmi vysoké hustoty, a přitom stále efektivně využívat sluneční záření, oxid uhličitý a další anorganické živiny. V porovnání s jednou z nejběžnějších plodin pěstovaných za účelem výroby paliv, kukuřicí, která má výtěžnost pouze 3 750 litrů bioethanolu na hektar půdy ročně, jsou řasy schopné vyprodukovat až 95 000 litrů bioethanolu na hektar za rok (Leite & Hallenbeck 2014).

Kultivační systémy řas navíc mohou místo zemědělské půdy využívat půdu nezemědělskou, takže nekonkurují potravinářské produkci. Řasy lze snadno pěstovat jak ve slané či sladké vodě, tak ve vodě odpadní. Tento způsob kultivace může být použit u větších měst, nejlépe měst nacházejících se na pobřeží moří a oceánů, jako velmi efektní alternativa čistíčky odpadních vod za současné produkce biomasy, řasy jsou schopny z odpadní vody využívat dusík a fosfor, které jsou nezbytné pro jejich růst a tím se řeší i problém s případnou konkurencí potravinářské produkci v dostupnosti hnojiv. Předpokládá se, že až 50 % světové biomasy se vytváří v mořském prostředí. Ve skutečnosti schopnost řas růst ve sladkých nebo komunálních vodách je zásadní pro udržitelnou výrobu biopaliv, protože pak nekonkurují potravinářské produkci, která vyžaduje zavlažování čistou sladkou vodou. Kromě paliv lze také vyrábět cenné vedlejší produkty, které už byly zmíněny dříve (Carlsson et al. 2007).

### 4.3 Kultivace makro-řas

Makro-řasy jsou bohatým, ale nedostatečně využívaným zdrojem biomasy. V současné době se využívá méně než 1 % dostupných makro-řas (Budarin et al. 2011). Setrvávajícím problémem jsou technologické překážky a s tím související vyšší provozní náklady. Technologie kultivace stále vyžaduje pokrok v oblasti výzkumu a vývoje (Chen et al. 2015). Z hlediska využitelnosti jsou pro výrobu biopaliv nadějnější mikro-řasy (Culaba et al. 2020).

Příkladem může být rozdíl v nákladech na produkci bioethanolu z makro-řas (11 Kč/kg) v porovnání s produkcí bioethanolu z kukuřice (3,50 Kč/kg) (Aitken et al. 2014). V současné době existují pouze omezená ekonomická hodnocení výroby biopaliv z řas, protože výzkum je teprve v počátku. Biotechnologie využívané na produkci řasové biomasy by neměly být hodnoceny pouze z hlediska ekonomické účinnosti, ale také z hlediska vlivu na přírodní prostředí (Chen et al. 2015).

Přibližně 95 % mořských řas využívaných lidmi je získáváno kultivací a téměř většina těchto kultur je tvořena těmito rody: *Porphyra*, *Undaria*, *Laminaria* a *Gracilaria*. Zbýlých 5-6 % pochází z přírodních populací (Lindsey Zemke-White & Ohno 1999).

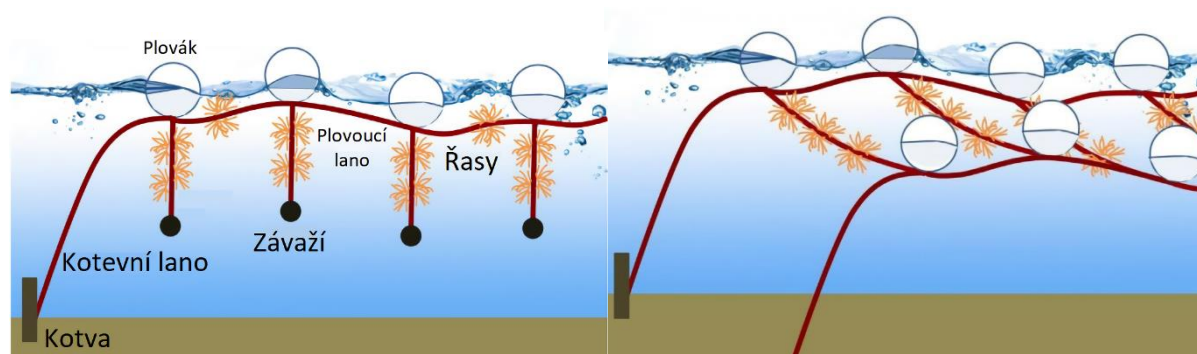
#### 4.3.1 Kultivace ve školkách

Základní metodou pěstování řas na pobřeží rybníků, jezer, moří nebo oceánů je připevnění sazenic k lanové konstrukci. Sazenice vyžadují místo na počáteční fázi růstu a také ochranu

před přesunutím do větších farem. Aby se minimalizovaly náklady na čerpání vody a na přesun sazenic je vhodné školku umístit na nízko položenou plochu přiléhající k moři. Školka také musí mít dostatečný přísun elektrické energie, dobrý přístup k silniční obsluze a dostatek prostoru, zvláště pro nádrže a odborná pracoviště (Edwards & Watson 2015).

#### 4.3.2 Kultivace na farmách

Existují dva obecné způsoby chovu mořských makro-řas. Prvním je závěsný (vertikální) lanový systém a druhým horizontální lanový systém (Philippsen et al. 2014). Řasy jsou připevněny k vodorovnému nebo svislému lanu, které je uchyceno na plovoucích bójkách, které jsou ukotveny kotevním lanem a kotvou k mořskému dnu. V závěsném systému je lano udržováno ve svislé poloze pomocí závaží připevněných k jeho konci. V horizontálních systémech jsou plováky vertikálně propojeny. Podrobnější náčrt je zobrazen na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 – Vertikální a horizontální způsob pěstování makro-řas (Ghadiryfar et al. 2015)

#### 4.4 Kultivace mikro-řas

Pěstování řas je částí akademické obce považováno za další nezbytnou zemědělskou inovaci potřebnou pro ekologickou a udržitelnou produkci potravin a paliv (Harmon et al. 2021). Stále však zůstávají významné výzvy v ekonomické části jejich plošné produkce. Hlavním problémem zůstává konkurenční boj s fosilními palivy, hlavně setrvávají tendence snižující se ceny ropy. Dále boj s přirozenými predátory a chorobami řas, při jejich kultivaci ve venkovním prostředí. Hlavními parazity jsou parazitické bakterie, houby (*Chytridiomycota* a *Aphelidiomycota*), vířníci, améby (*Vampyrella*), perloočka (*Daphnia pulex*) a vodní hmyz a jejich larvy. Dalším problémem při pěstování řas v otevřených venkovních systémech mohou být konkurenční řasy a sinice (*Cyanobacteria*, *Amoebophrya ceratii*) (Carney & Lane 2014).

Pěstovat řasy pro produkci biomasy můžeme jak ve venkovních otevřených nádržích, tak v takzvaných fotobioreaktorech (PBR) (Pawar 2016).



#### 4.4.1 Kultivace v otevřených nádržích

V přirozeném vnějším prostředí řasy pohlcují sluneční záření, oxid uhličitý ze vzduchu a všechny ostatní potřebné živiny z vody, ve které jsou pěstovány. Uměle vytvořené nádrže se snaží co nejvíce využít přírodních zdrojů, a proto se jejich umístění soustředí především do slunných oblastí a poblíž zdrojů vody. Přírodní prostředí ale může být určitým způsobem i limitujícím faktorem vzhledem k působení denních cyklů a sezonních změn v počasí. Sluneční záření se dá nahradit zářením umělým, ale zvýší se tím už tak vysoké náklady na produkci biomasy z řas, a ještě více se tím prohloubí všechny ekonomické problémy této generace biopaliv. Výběr umělého osvětlení je navíc limitován druhem pěstovaných řas a pigmentu, který obsahují. Například *Chlorella vulgaris* a *Nannochloropsis oceanica* mají chlorofyl a a b, zatímco rozsivky (*Diatomeae*) mají chlorofyl a a c (Beale & Appleman 1971).

Pro pěstování řas v uměle vytvořených nádržích je také podstatný přísun základních živin, dusíku (N) a fosforu (P). Dusík se většinou dodává ve formě močoviny, která je pro převážnou část řas nejlépe vstřebatelná. Některé druhy řas jsou schopny absorbovat dusík i z atmosféry ve formě oxidů ( $\text{NO}_x$ ). Fosfor se dodává hlavně ve formě fosfátů ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), ale je třeba znát přesné hodnoty, jelikož jeho vyšší koncentrace může naopak inhibovat růst řas (Su 2021).

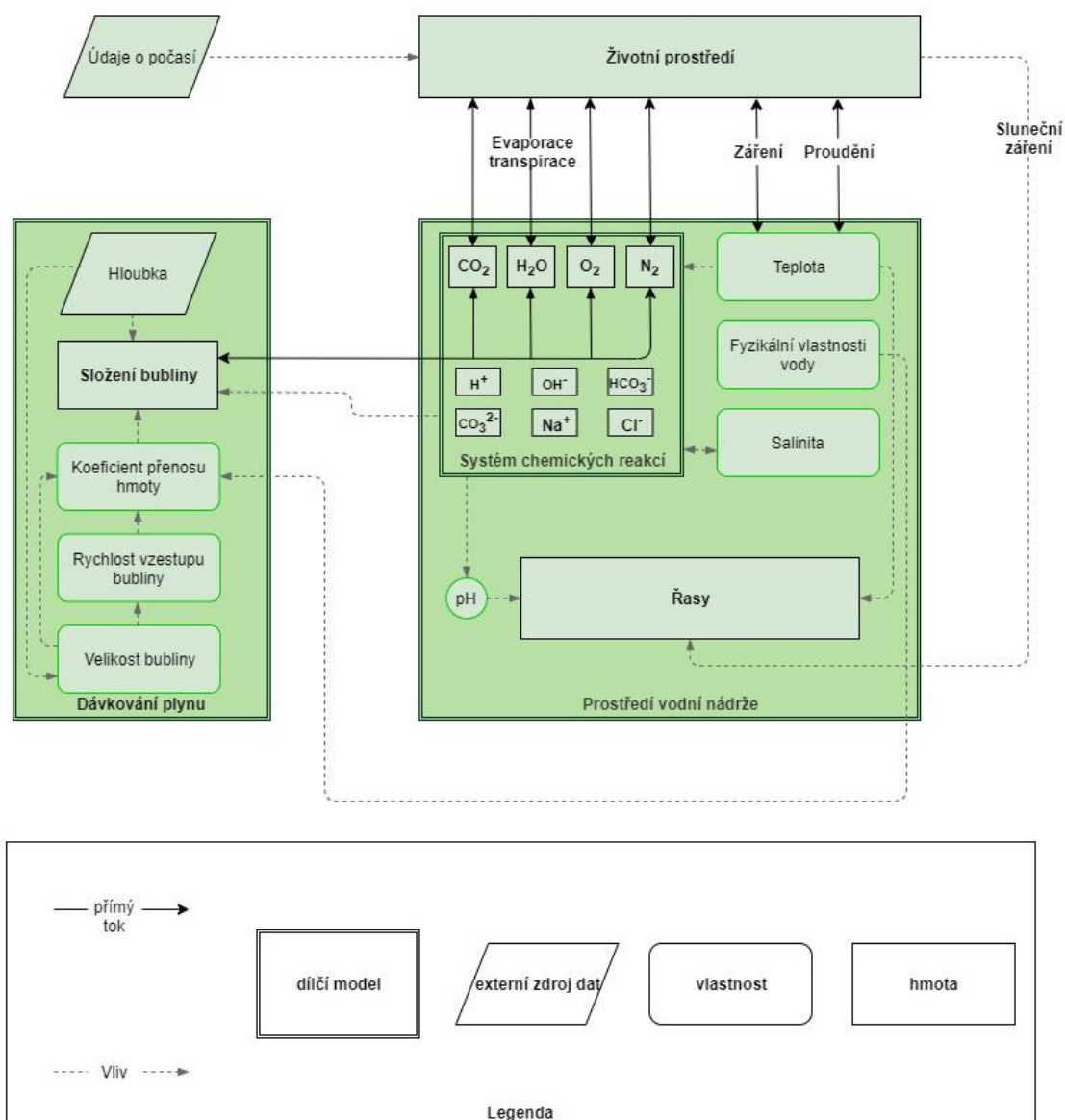
Nezbytným prvkem pro výživu vodních řas je také železo (Fe), které je nepostradatelné pro správnou funkci fotosyntézy. Zde opět jeho vysoká koncentrace může vést k inhibici růstu. Biomasa z řas obsahuje až 50 % uhlíku (Nautiyal et al. 2014).

Americké ministerstvo energetiky (U.S. DOE) financovalo za účelem urychlení vývoje technologií vhodných pro produkci biomasy z mikro-řas jako suroviny pro výrobu biopaliv vývoj a provoz národních testovacích míst po celých Spojených státech amerických. Společnost Algae Testbed v rámci výzkumu zřídila 5 stanovišť na různých geografických místech s různými podmínkami okolního prostředí. Tato výzkumná pracoviště fungovala po všechna čtyři roční období po dobu dvou let za účelem zjištění vhodných sezónních a geografických podmínek u různých druhů mikro-řas. Během každé sezóny byly vždy testovány dva kmeny, *Nannochloropsis oceanica* a *Chlorella vulgaris*, třetí kmen, *Desmodesmus*, byl pěstován pouze během léta (Harmon et al. 2021).

Kultivace probíhala v semikontinuálním režimu, který hodnotil dvě různé frekvence sklizně a až tři různé rychlosti ředění vodního prostředí. Během těchto experimentů byly pozorovány případy selhání celých nádrží, které poskytly údaje potřebné ke kvantifikaci spolehlivosti pěstování řas ve venkovním prostředí. Vzhledem k prevalenci kontaminujících organismů a s tím souvisejících nedostatků otevřených nádrží potřebujeme pro hodnocení spolehlivosti produkčního systému stanovit soubor ukazatelů hodnot venkovních nádrží, aby se se snížilo riziko při budoucím pěstování a pomohlo se při vývoji integrované strategie proti škodlivým

organismům. Takové kvantitativní ukazatele jsou nepostradatelné i pro budoucí mapování provozních parametrů (Rarrek et al. 2017).

Přestože pěstování řas v otevřených nádržích se provádí už po celá desetiletí, stále existuje řada výzkumů, které se snaží zjistit, jak co neefektivněji pěstovat řasy ve velkých systémech s plochou větší než 10 ha, čímž by se zredukovala ekonomická náročnost výroby (Rarrek et al. 2017). Literatura nabízí mnoho modelů popisujících růst řas, od velmi jednoduchého systému, kdy se kontrolují jen nezákladnější parametry, až po velmi sofistikované modely, které se snaží pokrývat i procesy probíhající uvnitř buněk. Existují také modely, které simulují celé otevřené nádrže na řasy. Tyto modely zahrnují nejen růst řas, ale i chemii vodního prostředí a vliv nádrže na okolní životní prostředí (Bernard et al. 2016). Na Obr. 4.2 je zobrazen obecný model otevřených nádrží.



Obr. 4.2 – Model otevřených nádrží na kultivaci řas (Rarrek et al. 2016, vlastní zpracování)

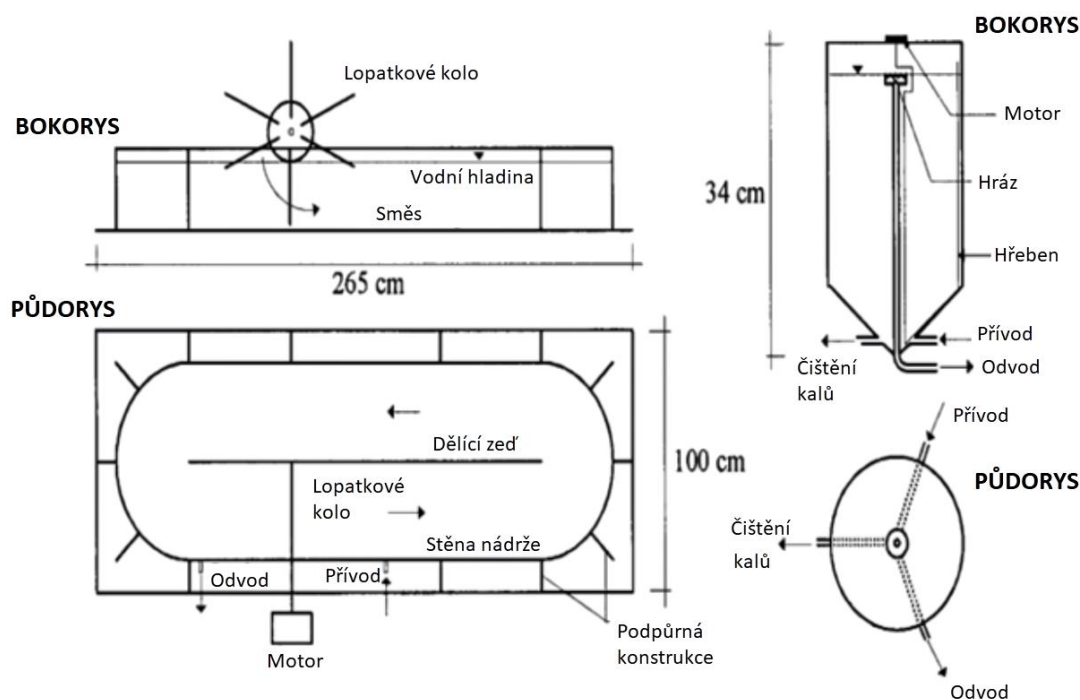
Bernard a kol. (2016) předkládají přehled o existujících modelech. Modely, které zkoumají procesy probíhající uvnitř nádrží a jejich vliv na přírodní prostředí představují Buhr a Miller (1983). Ve 21. století poté přišel s podobným modelem také Yang (2011). James a Boriah (2010) představili model, kde je kultivace řas podpořena zvýšenou cirkulací vody, které je docíleno pomocí vodního kola. Další optimalizaci modely produkce řas v otevřených nádržích představili Yadala a Cremaschi (2016), kteří určili optimální geometrii nádrží pro dva druhy řas (*Phaeodactylum tricornutum* a *Isochrysis galbana*) a čtyři různé lokace (Tulsa, USA; Hyderabad, Indie; Kapské město, Republika Jižní Afrika; Rio de Janeiro, Brazílie) jejich kultivace. Ve studii od Maleka a kol. (2016) byl vyvinut model, který simuluje nádrž s řasami včetně dodávky CO<sub>2</sub>. Tento model byl poté následně vyzkoušen a experimentálně ověřen údaji z Málagy ve Španělsku. Model byl zkoušen na 450 m<sup>2</sup> velké otevřené nádrží po dobu deseti měsíců. Řasou pěstovanou v tomto pokusu byla *Spirulina*. Zjištěné parametry potom byly použity k ověření, zda model vyvinutý Malekem a kol. odpovídá skutečnosti. Výkonnost kultivačních nádrží se udává podle rychlosti růstu řas a účinnosti fixace uhlíku. Účinností fixace uhlíku se v tomto případě rozumí množství uhlíku, které je řasami fixováno, ve srovnání s množstvím uhlíku, které je poskytováno dávkováním oxidu uhličitého.

Jak je zobrazeno na Obr. 4.2, fyzikální vlastnosti vody a přenos hmoty mezi nádrží a okolním prostředím, jakož i přenos hmoty v důsledku dávkování plynu, závisí na složení a teplotě vody v otevřené nádrži. Tento model bere v potaz různé chemické sloučeniny vyskytující se ve vodním prostředí a jejich chemické reakce, které jsou nezbytné ke stanovení dávkování CO<sub>2</sub> a k následnému výpočtu účinnosti fixace CO<sub>2</sub>. Přenos hmoty v důsledku dávkování plynu závisí na koncentraci CO<sub>2</sub> ve vodě, která je určena systémem chemických reakcí. Tři zdroje uhlíku (CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> a CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) jsou součástí tohoto systému, který má pro stejné hodnoty koncentrace celkového anorganického uhlíku vysoké hodnoty koncentrace CO<sub>2</sub> při nízkých hodnotách pH a nízké hodnoty koncentrace při vysokých hodnotách pH. V důsledku toho je třeba posoudit stav systému chemických reakcí, aby bylo možné vyhodnotit, jak je účinnost fixace uhlíku ovlivněna spotřebou oxidu uhličitého řasami a jaký vliv na fixaci měly odlišné hodnoty pH. Navzdory svému významu pro přesné dávkování CO<sub>2</sub> nebo pro růst řas je systém chemických reakcí brán v potaz pouze v minimu studií (Rarrek et al. 2016).

#### 4.4.2 Kultivace v podlouhlých míchaných nádržích

Poslední scénáře výzkumu v oblasti pěstování řas směřují k demonstračnímu rozsahu pěstování. Podlouhlé nádrže jsou celosvětově jednou z nejpoužívanějších technologií pro kultivaci řas. Podlouhlé nádrže jsou velmi mělké, většinou okolo 30 cm (Hartmann et al. 2014). To je nezbytné, aby se zabránilo nedostatku světla napříč pěstovanou kulturou. Nicméně tato restrikce omezuje plošnou produktivitu podlouhlých nádrží a zvětšení kultivačního prostředí lze provést pouze zvýšením celkové plochy nádrže. Nižší výška nádrží také snižuje účinnost rozprašovače plynů, kvůli kratší době kontaktu kapalina-plyn. Tím dochází k úniku většiny plynu do atmosféry a k celkovému snížení efektivnosti fixace CO<sub>2</sub> (Kumar et al. 2015). Obr. 4.3

zobrazuje obecný schématický náčrt podlouhlých míchaných nádrží (RWP – raceway ponds).



Obr. 4.3 – Schématický náčrt podlouhlých míchaných nádrží (Polprasert & Koottatep 2017)

## Spotřeba energie

Spotřeba energie v podlouhlých míchaných nádržích závisí zejména na jejich hloubce, přítomnosti přepážek a rychlosti lopátkového vodního kola. Spotřeba byla stanovena v rozmezí 1,5-8,4 W/m<sup>3</sup>. Specifická spotřeba energie je neoptimálnější u nádrží o hloubce 20 cm. Bylo zjištěno, že snížení vodní hladiny šetří energetické ztráty. Zavedení přepážek naopak spotřebu energie zvyšuje. Proto je důležité si uvědomit, že příliš mnoho přepážek může ve výsledku snížit celkový výkon podlouhlých míchaných nádrží (Raeisossadati et al. 2019).

## Míchání

Zajištění přiměřeného promíchávání je jedním z hlavních problémů podlouhlých nádrží. Míchání představuje téměř 70 % celkových nákladů na provoz, proto se snaží většina provozovatelů RWP zkombinovat produkci biomasy v nádržích s produkcí elektřiny ze solárních panelů nebo mini větrných elektráren. To jim umožní snížit náklady za míchání na minimum. Míchání slouží k několika účelům, jako je periodické vystavení buněk slunečnímu záření, udržování buněk v suspenzi, dostupnost živin pro všechny buňky řas a odstraňování kyslíku uvolňovaného z procesu fotosyntézy. Je ale podstatné vyhnout se nadbytečnému míchání. Za prvé kvůli ekonomickým důvodům, a zadruhé, protože nadbytečné noční míchání může způsobit ztráty biomasy až do výše 25 %. Rychlost cirkulace nádrže se udržuje mezi 5-30

cm/s v závislosti na velikosti RWP, čím vyšší je nádrž, tím vyšší je potřeba rychlost míchání. Dlouhá přímá oblast RWP je nejhorší oblastí z hlediska dostatečného promíchání suspenze, zatímco v ohybu je díky víru generována dostatečná rychlost (Polprasert & Kottatep 2017).

### **Dodávky CO<sub>2</sub> do RWP**

Náklady na dodávky uhlíku do kultivačních nádrží řas se pohybují v rozmezí 10-30 % celkových provozních nákladů (Li et al. 2013), jiné zdroje uvádějí, že denní náklady dodávek oxidu uhličitého mohou přesáhnout až 33 % (Ketheesan & Nirmalakhandan 2011). Koncentrace CO<sub>2</sub> nejméně 65 μmol/L při pH 8,5 byla shledána optimální pro vysokou výnosnost určitých druhů mikro-řas (*Chlorella sp.*) (Weissman et al. 1988). Oproti tomu studie Liho a kol. (2013) uvádí, že pro normální růst řas je při pH 8 nutná koncentrace CO<sub>2</sub> 73 μmol/L a vyšší.

Aerace povrchu je nejjednodušším způsobem, jakým se CO<sub>2</sub> může šířit do suspenze řas. Aerace má tu nevýhodu, že špatně nastavená doba setrvání v plynových bublinách vede k nedokonalému využití oxidu uhličitého řasami. Dodávání CO<sub>2</sub> je nutné i do otevřených nádrží pracujících s odpadní vodou. Je to proto, že poměr CO<sub>2</sub> v buňkách řas se pohybuje od 6 C:N do 8 C:N, což je mnohem vyšší než poměr C:N v odpadních vodách (3 C:N). Velikost dodávky CO<sub>2</sub> do otevřených nádrží závisí na pH vodního prostředí, rychlosti míchání a době kontaktu plyn-kapalina (Brennan & Owende 2010).

### **Vliv pH na pěstovanou kulturu**

Rychlost absorpce CO<sub>2</sub> vodními řasami se zrychluje s rostoucí hodnotou pH prostředí. Optimální pH většiny řas se pohybuje v rozmezí 7-8 (González-López et al. 2012).

#### **4.4.3 Kultivace ve fotobioreaktorech (PBR)**

Fotobioreaktory lze popsat jako uzavřené kultivační nádoby určené pro řízenou produkci biomasy. Jsou izolované od vnějšího prostředí a nedochází zde k přímé výměně plynů ani jiných látek. Fotobioreaktory navzdory svým vysokým pořizovacím nákladům mají několik hlavních výhod oproti otevřeným systémům (Singh & Sharma 2012).

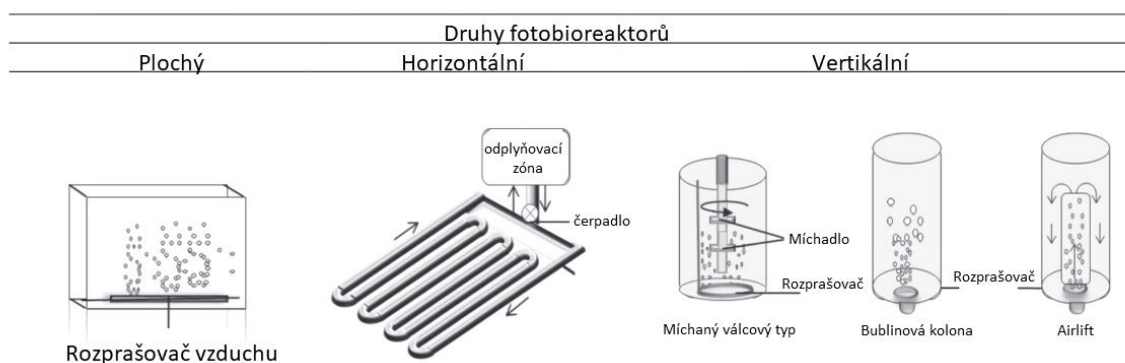
- Minimalizují riziko kontaminace kultivačního prostředí.
- Umožňují lepší kontrolu nad podmínkami prostředí, jako je pH, teplota, síla a doba působení slunečního záření, koncentrace CO<sub>2</sub>.
- Fotobioreaktory mají daleko nižší ztráty CO<sub>2</sub>, jelikož nedochází k uvolňování přes volný povrch kapaliny jako u otevřených systémů.
- Zabraňují odpařování vody.
- Ve fotobioreaktorech je možné dosáhnout vyšší koncentrace suspenze.
- Umožňují výrobu komplexních biofarmaceutik.

Cílem stavby PBR bylo zefektivnění produkce biomasy, jelikož v oblasti otevřených systémů už moc místa na inovace nezbývá (Ugwu et al. 2008).

Tsoglin a kol. (1995) uvádějí ve své studii tyto body, které je třeba vzít v úvahu při navrhování fotobioreaktoru:

- Reaktor by měl umožňovat pěstování libovolných druhů mikro-řas.
- Konstrukce PBR musí zajistit rovnoměrné osvětlení celé kultury a rychlý přenos CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> uvnitř reaktoru
- Konstrukce PBR musí zabránit nebo minimalizovat znečištění reaktoru, aby nebylo zamezeno proudění záření.
- Musí se zajistit možnost rychlého přenosu hmoty, bez rizika poškození pěstovaných buněk nebo potlačení jejich růstu.
- PBR musí být schopen fungovat i za podmínek intenzivního pění, ke které v reaktorech s vysokou rychlostí přenosu hmoty často dochází.
- Konstrukce reaktoru by měla být navržena tak, aby minimalizovala dobu, kdy bude suspenze neosvětlená.

Bylo vyvinuto mnoho druhů fotobioreaktorů, které se dají dělit dle geometrické stavby reaktoru do následujících kategorií (Wang et al. 2012): Na Obr. 4.4 jsou zobrazeny příklady různých typů fotobioreaktorů.



Obr. 4.4 – Typy fotobioreaktorů (Assunção & Malcata 2020)

### Vertikální sloupcové fotobioreaktory

Jedná se o pevné vertikálně stavěné válce s obvyklým poloměrem okolo 20 cm a výškou až 4 m. Tyto válce mají co nejmenší poloměr, aby se zvýšil poměr povrchu a objemu, a tím se docílilo co největšího ozáření suspenze. Omezení výšky je naopak spjato s pevností materiálů použitých ke konstrukci válců (většinou polyethylen). Mimoto v příliš vysokých sloupcích může

docházet k zvyšování doby zdržení kyslíku ( $O_2$ ) vylučovaného řasami při fotosyntéze, a tím dojít k inhibici růstu kultury. Vertikální sloupcové PBR se vyznačují vysokými koeficienty účinnosti fixace oxidu uhličitého. Probublávání plynu ze spodní části kolony umožňuje efektivní využití  $CO_2$  a rychlé odstranění  $O_2$  ze suspenze. Konstantní míchání suspenze způsobené bublinami plynu také jemně mísí kultury, oproti lopatkovým vodním kolům nebo čerpadlům, která se používají u otevřených systémů a tímto jemným mícháním se snižuje riziko poškození buněk řas (Vega-Estrada et al. 2005).

### **Ploché fotobioreaktory**

Ploché fotobioreaktory (FP-PBR z anglického flat panel photobioreactor) jsou uzavřené reaktory s úzkou dráhou světla. Mají kvádrovitý tvar. Jsou vyrobeny z průhledných materiálů, nejčastěji z polykarbonátů, skla nebo plexiskla. Vyznačují se velkým poměrem plochy k objemu. Míchání je zajištěno buď probubláváním plynu z jedné strany nebo mechanicky pomocí motoru (Assunção & Malcata 2020).

### **Horizontální sloupcový fotobioreaktor**

Horizontální sloupcové fotobioreaktory jsou umístěny vodorovně, což je umožněno návrhem ve tvaru paralelní sady sloupců ve tvaru smyčky. Při venkovním umístění PBR tohoto typu je výhodou jejich snadná orientace na sluneční záření. Nevýhodou je daleko větší zabraná užitná plocha. Dochází zde častěji než u předchozích případů k nahromadění kyslíku během fotosyntézy a důsledkem je takzvané vysvícení (ztráta správné funkce fotosyntetického barviva). Další nevýhodou je vysoká spotřeba energie při použití bublinových rozprašovačů pro dobývání  $CO_2$  do suspenze (Singh & Sharma 2012). Pro zlepšení podmínek produkce se používá hlavně alternativa ve formě šikmého sloupcového fotobioreaktoru, který je méně energeticky náročný a díky svému sklonu efektivněji zachytává sluneční světlo (Slegers et al. 2013).

#### **4.4.4 Sklizeň**

Sběrem neboli sklizní řas se rozumí koncentrování řas do husté pasty, s cílem získat suspenzi s nejméně 2-7 % hmotnosti tvořenými sušinou. Obecně je sklizeň biomasy z řas velmi náročným krokem, protože velikost buněk řas je velmi malá (3-30  $\mu m$ ) a koncentrace buněk v roztoku je velmi zředěná (přibližně 1 g/l u otevřených systémů a 5 g/l u fotobioreaktorů). Výsledkem je, že sklizeň řasové biomasy je velmi ekonomicky nákladný proces, představuje 20-30 % celkových nákladů na výrobu biomasy. Mikro-řasy lze sklízet sedimentací, filtrací nebo odstředěním. Výběr procesu vždy záleží na velikosti a vlastnostech pěstované kultury (Wen et al. 2011).

## Sedimentace

Metoda sedimentace se používá hlavně u otevřených systémů, zatímco u fotobioreaktorů najde uplatnění filtrace a centrifugace (odstředění). Sedimentační systém je vhodný zejména pro mikro-řasy, které mají přirozeně vysoký sedimentační index (Smith & Davis 2013). Kapitálové a provozní náklady této metody jsou nízké. Pokud má pěstovaná kultura špatné sedimentační vlastnosti lze použít flokulační činidlo (Gerde et al. 2014).

## Filtrace

Filtrace se nejčastěji používá při sklizni biomasy určené na výrobu biopaliv. Zde jsou ale problémem vyšší kapitálové náklady, kvůli cenám filtračních membrán a čerpadel. Provozní náklady jsou také vyšší, kvůli nutnosti pravidelné obměny filtračních membrán (Baerdemaeker et al. 2013), pokud nepoužíváme plastové či ocelové omyvatelné membrány (Xu et al. 2021).

## Odstředování neboli centrifugace

Odstředování je zrychlený proces sedimentace, který se používá zejména v laboratorních podmínkách pro urychlení výzkumu. Kapitálové i provozní náklady této metody jsou většinou příliš vysoké pro využití v běžném provozu. Jedinou možnou formou centrifugace, která by byla ekonomicky únosná je využití hydrocyklonu. Hydrocyklon je zařízení, které funguje na základě poměru odstředivé síly pevných částic a odporu kapaliny. V hydrocyklonovém systému jsou stěny komory hydrocyklony pevné, zatímco buňky řas se v komoře pohybují spirálovitě směrem vzhůru a vytvářejí tím odstředivé síly, které mají za následek točení hustších částic směrem ven z kapaliny. Jeho využití je okrajové, a to pouze pro výrobu produktů s relativně vysokou hodnotou (Peralta-Ruiz et al. 2013).

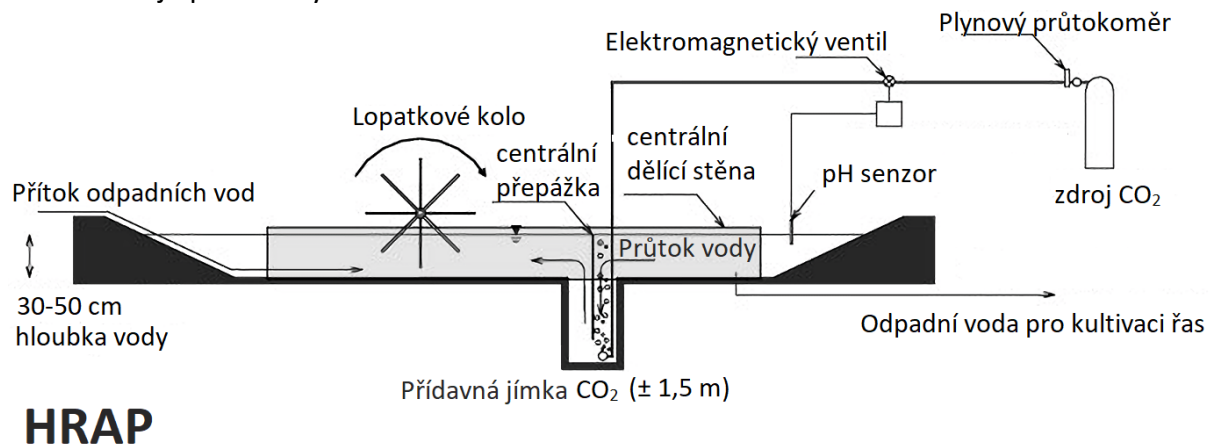
## 4.5 Doplnkové procesy kultivace řas

Kapitálové a provozní náklady systémů na kultivaci řas jsou v současné době s dostupnými technologiemi ekonomicky nevýhodné. Například Chisti a kol. (2008) vypočítali, že náklady na výrobu bionafty z řas musí klesnout až téměř desetkrát, aby byl konkurenceschopné s fosilními palivy. Existují však způsoby, kdy je biomasa pěstována jako vedlejší produkt čištění odpadních vod. Takové systémy se nazývají HRAP (z anglického high rate algal ponds). HRAP jsou mělké, otevřené nádrže, které se používají pro čištění průmyslových a odpadních vod (Mohsenpour et al. 2021). Velkovýrobu řasových biopaliv za použití technologie HRAP navrhli poprvé už ve dvacátém století Oswald a Golueke (1960). Řasová biomasa sklizená z těchto systémů čištění odpadních vod by mohla být různými způsoby přeměna na biopaliva. Jako nejjednodušší se nabízí způsob přeměny biomasy anaerobní digescí na bioplyn. Dalšími metodami mohou být transesterifikace lipidů na bionaftu a fermentace sacharidů na bioethanol (Craggs et al. 2011).



Růst řas a jejich fotosyntetická aktivita byly za poslední roky podrobeny mnoha důkladným studiím. Navíc bylo studováno mnoho kritických environmentálních (světlo a teplota), provozních (pH, koncentrace CO<sub>2</sub> a správná hodnota živin) a biologických (patogeny) parametrů, které ovlivňují čištění odpadních vod systémy HRAP (Park et al. 2011).

Navzdory výše uvedeným skutečnostem výzkumu využití HRAP na čištění odpadních vod pro výrobu řas a následnou konverzi biomasy na biopaliva bylo věnováno jen málo pozornosti. K optimalizaci systému HRAP je stále nutný základní i terénní výzkum (Park et al. 2011). Obr. 4.5 zobrazuje podobu systému HRAP.



Obr. 4.5 – Schématický náčrt systému HRAP (Park & Craggs 2011)

## 5 Biopaliva z vodních řas

V této kapitole jsou uvedeny příklady biopaliv z vodních řas a technologické postupy jejich výroby.

### 5.1 Bioethanol

Bioethanolem nazýváme ethylalkohol vyráběný z biologického zdroje. Může být použit jako náhražka nebo aditivum benzínu (Nahak et al. 2011). Poptávka po bioethanolu jako dopravním palivu stále roste. Několik národů, jako je Indie, Čína a Brazílie vyvinulo iniciativu k výrobě bioethanolu jako komerčního paliva (Lee & Lee 2016). Bioethanol je preferován nejen kvůli jednoduchosti jeho produkce, ale také díky jeho dopadu na životní prostředí v porovnání s fosilními palivy. Obsahuje menší množství síry, ve srovnání s benzínem, čímž snižuje škodlivé emise skleníkových plynů při jeho spalování. Dosahuje asi 66 % energetické hodnoty benzínu. Vzhledem k jeho obnovitelné povaze je prostor pro využití bioethanolu vysoký (Anto et al. 2020). Výhodou získávání bioethanolu z vodních řas místo z plodin první generace biopaliv je, že nekonkurují potravinářské produkci. Řasy jsou schopné růst v průmyslové i odpadní vodě. Tato jejich schopnost pomáhá při bioremediaci, protože spotřebovává oxid uhličitý a další živiny potřebné pro fotosyntézu (dusík, fosfor), a tím čistí vodu, ve které jsou pěstovány. Zamezují tím také přílišné acidifikaci moří a oceánů (John et al. 2011).

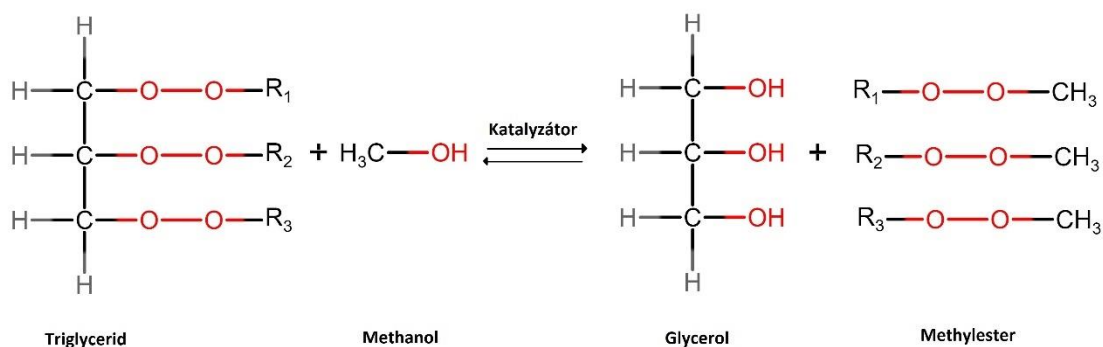
Bioethanol lze vyrábět hlavně fermentací zásobních látek, škrobu, nebo celulózy, která je součástí buněčné stěny (Ullah et al. 2015). Druhy jako je *Chlorella vulgaris* mohou obsahovat až v hodnotě 37 % jejich suché hmotnosti. Modrozelené řasy včetně druhů *Spirogyra* a *Chlorococum sp.* mají ve svých buněčných stěnách uschovány vysoké hladiny polysacharidů (Chaudhary et al. 2014). Různé druhy řas si schovávají živiny v jiných formách, například ve formě alginátů, mannitolu, glukanu, galaktanu a laminarinu (John et al. 2011). Řasy jsou proto považovány za vhodný zdroj biomasy pro výrobu bioethanolu díky svému vysokému obsahu sacharidů. Mezi běžně používané řasy pro výrobu bioethanolu patří *Sargassum*, *Glacilaria*, *Prymnesium parvum*, *Euglena gracilis* (zde je zařazení mezi řasy sporné, jedná se o druh z rodu krásnooček), *Porphyridium*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* a *Spirulina* (Chaudhary et al. 2014).

### 5.2 Bionafta

Bionafta je stejně jako bioethanol velmi vyhledávanou alternativou fosilních paliv. Bionafta se vyrábí transesterifikací lipidů (Obr. 5.1) získaných z řas za vzniku methylesterů mastných kyselin s dlouhým řetězcem. Délka řetězce závisí na zdroji lipidů. Zdrojem biomasy pro výrobu bionaftu v současné době bývají oleje z palem, sóji, řepky nebo slunečnice. Takto vyráběná bionafta je dražší než nafta vyráběná z fosilních paliv (Demirbas & Fatih Demirbas 2011). I tyto suroviny ovšem vedou ke konfliktu o půdu mezi palivem a potravinami, tím se řasy stávají

jedním z nejvíce lákavých obnovitelných zdrojů. Z hlediska přírodního prostředí je také nafta z řas výhodnější, protože má menší emise CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a dalších skleníkových plynů (Scott et al. 2010).

Pro výrobu bionafty jsou nejčastěji zkoušeny druhy s vyšším hmotnostním obsahem lipidů (až 60 % hmotnosti) a to *Chlamydomonas reinhardtii*, *Dunaliella salina*, *Chlorella sp.*, *Botryococcus braunii*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Thalassiosira pseudonana*, *Nannochloropsis* a *Isochrysis sp.* (Scott et al. 2010). Těmito lipidy jsou obvykle triglyceridy, které jsou obvykle skladované jako membránové komponenty, zásobní látky nebo metabolity. Mastné kyseliny nebo lipidy získané z řas jsou obecně polynenasycené, což vede k nižším bodům tání a k jejich nestabilitě (Demirbas & Fatih Demirbas 2011). Výtěžek bionafty z každé dávky řas lze zvýšit optimalizací různých parametrů. Například je možné manipulovat s růstovými charakteristikami, navozením přesných stresových podmínek, aby docházelo k větší akumulaci mastných kyselin. Toho lze dosáhnout hlavně dodáváním nižších dávek dusíku (Zhao et al. 2016). Obecně platí, že mikro-řasy vykazují v celkovém součtu lepší vlastnosti než makro-řasy (Hossain et al. 2008).



Obr. 5.1 – Transesterifikace lipidů (Anto et al. 2020, vlastní zpracování)

### 5.3 Bioplyn

Bioplyn označuje směs plynů produkovanou anaerobní digescí biomasy. Touto biomasou může být odpad ze zemědělské produkce, rostlinný materiál, hnůj, potravinový odpad i řasová biomasa po extrakci lipidů (Ošlaj & Muršec 2010). Bylo zjištěno, že řasová biomasa s vyšším obsahem lipidů má větší potenciál produkovat bioplyn o teoretické hodnotě 287-611 l/kg biomasy. Tato hodnota výtěžku však závisí na zvolené kultuře čas a také na provozních teplotách (Dębowski et al. 2013). K anaerobní digesci dochází podle následujících čtyř stupňů (Anto et al. 2020):

#### Hydrolyza

Jedná se o reakci rozpadu komplexních lipidů nebo sacharidů s dlouhým řetězcem za přítomnosti katalyzátorů, kyselin nebo zásad, na odpovídající monomery. Toto štěpení usnadňují také enzymové komplexy jako je celulosom nebo proteáza. Ty jsou produkovány fermentačními bakteriemi, prvoky nebo houbami za současné produkce vodíku (Maneein et al. 2018).

### Acidogeneze

V této fázi se rozpustné monomery přeměňují reakcí s vodíkem na kyseliny (například na propionovou, máselnou, mléčnou atd.) (Jankowska et al. 2017).

### Acetogeneze

V této fázi jsou kyseliny vyprodukované ve fázi acidogeneze zkonsumovány acetogenními bakteriemi, což vede k tvorbě kyseliny octové ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a vodíku ( $\text{H}_2$ ). Na acetogenezi se podílí ještě několik dalších bakterií, například *Syntrophobacter wolinii* (zajišťuje rozklad propionové kyseliny) a *Syntrophomonos wolfei* (zajišťuje rozklad kyseliny máselné) (Sambusiti et al. 2015).

### Metanogeneze

Metanogeneze je poslední fází anaerobní digesce. Dochází zde k více reakcím, které nakonec vedou k tvorbě methanu jako hlavního produktu. V této fázi se alkoholy a kyseliny vyprodukované v médiu převádějí na methan za přítomnosti metanogenních bakterií (*Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* nebo *Methanosarcina*). Jako nejlepší metoda digesce pro výrobu bioplynu byla vyzkoušena termofilní digesce (Sambusiti et al. 2015).

## 5.4 Letecký biopetrolej/biokerosin

Syntetický petrolej lze vyrábět z uhlí, zemního plynu nebo biomasy (Liu et al. 2013). Biomasa je však jedinou obnovitelnou možností. Obecně platí, že se během procesu výroby leteckého biopetroleje transformuje biomasa několika různými způsoby. Biomasa, kterou je možné použít pro výrobu leteckého paliva musí obsahovat buď triglyceridy, sacharidy nebo škrob, anebo se musí jednat o lignocelulóзовou biomasu. V závislosti na vstupním materiálu jsou obnovitelné zdroje zpracovány následujícími způsoby (Gutiérrez-Antonio et al. 2016):

- Hydrogenační zpracování triglyceridové biomasy.
- Přeměna alkoholů na letecké palivo.
- Pyrolýza biomasy na letecké palivo.
- Zplyňování biomasy následované Fisher-Tropschovou syntézou.
- Hydrotermální úprava biomasy.

Z těchto metod je pouze zplyňování biomasy s následnou Fisher-Tropschovou syntézou a hydrogenerační zpracování triglyceridů certifikováno pro komerční využití. Tyto metody mají své výhody i nevýhody. Metody využívající dražší vstupní surovinu, biomasu s vyšším obsahem triglyceridů, vyžadují nižší náklady na zpracování. Na druhou stranu metody využívající relativně levnou lignocelulóзовou biomasu vyžadují mnoho fází zpracování, což také ve výsledku zvyšuje náklady (Gutiérrez-Antonio et al. 2017).

## 5.5 Biovodík

Vodík je přirozeně se vyskytující se molekulou, která je čistým a účinným nosičem energie (Clark & Deswarte 2014). Mikro-řasy mají nezbytné genetické, metabolické a enzymatické vlastnosti, aby byly schopny produkovat plynný vodík ( $H_2$ ). Za anaerobních podmínek se vodík tvoří v eukaryotických řasách jako donor elektronů v procesu fixace uhlíku. Během fotosyntézy převádějí mikro-řasy molekuly vody na vodíkové ionty ( $H^+$ ) a kyslík. Vodíkové kationty se následně za anaerobních podmínek převádějí na enzymy hydrogenázy (Cantrell et al. 2008). V důsledku reverzibility reakce je biovodík buď uvolňován, nebo spotřebován jednoduchou přeměnou zpět. Produkce fotosyntetického kyslíku způsobuje rychlou inhibici klíčového enzymu, hydrogenázy, čímž je narušen proces výroby fotosyntetického vodíku. Kultury mikro-řas vhodné pro výrobu biovodíku musí být následně podrobeny anaerobním podmínkám (Akkerman 2002).

Existují dva základní typy postupů k fotosyntetické produkci biovodíku z vody. První proces výroby vodíku je dvoustupňový proces fotosyntézy, při kterém se prostorově odděluje výroba fotosyntetického kyslíku ( $O_2$ ) a vodíkového plynu ( $H_2$ ). V první fázi se řasy pěstují za normálních podmínek. Během druhé fáze je řasám odebrán přístup k síře, čímž dojde k nastolení anaerobních podmínek a ke stimulaci konzistentní produkce vodíku. Tento výrobní proces je časově omezen, protože výtěžek vodíku začne po 60 hodinách klesat. Použití této výrobní metody nevede k produkci toxických vedlejších produktů. Tato metoda by se dala použít jako proces s přidanou hodnotou při pěstování řasové biomasy pro produkci jiných produktů. Druhý postup zahrnuje současnou produkci fotosyntetického kyslíku a plynného vodíku. V tomto postupu jsou elektrony uvolňované při fotolýze vody přiváděny přímo do procesu zpětné oxidace vodíku zprostředkovaného hydrogenázou. Výtěžnost vodíku je teoreticky lepší, ale současný výrobní proces trpí silnou inhibicí hydrogenázy, ke které dochází ve velmi krátké době kvůli současné produkci kyslíku (Brennan & Owende 2010).

## 6 Legislativa

Tato kapitola se zabývá legislativou vztaženou k biomase, biopalivům a trvale udržitelnému rozvoji.

### 6.1 Kjótský protokol

Kjótský protokol, smlouva dojednaná v prosinci 1997 v rámci OSN, je mechanismem globální správy s velmi silným regulačním přístupem. Protokol byl navržen ke snížení emisí skleníkových plynů stanovením povinností napříč průmysly. Rozvojové země se mohly přihlásit dobrovolně, ale nebyly povinny protokol dodržovat. První období závazků podle protokolu trvalo od roku 2008 do roku 2021. V tomto období se 38 zemí společně s Evropskou unií zavázalo k závazným cílům, které měly přispět ke snížení emisí skleníkových plynů kumulativně o 4,7 % pod úroveň roku 1990. Ve skutečnosti došlo ke snížení o 12,5% bodu pod úroveň roku 1990, ale tato hodnota zahrnovala i snížení emisí v Rusku a na Ukrajině, které bylo primárně spojeno s významným poklesem spotřeby energie. Ve druhém závazkovém období, které trvalo od roku 2012 do roku 2020 bylo cílené snížení emisí skleníkových plynů o 18 % u celkem 21 zemí plus Evropské unie (Hu & Monroy 2012).

Kjótský protokol byl široce kritizován. Hlavní producenti emisí, například Spojené státy americké, se rozhodli nepřistoupit na dohodu už v samém začátku a jiní, například Kanada, od protokolu odstoupili v roce 2012. Velkým problémem byla neshoda v zacházení s jedněmi z největších producentů emisí, s Čínou a Indií. Čína a Indie totiž stále spadají do kategorie rozvojových zemí a nepodléhají tak dohodě o snižování emisí (Millock 2013).

Na zasedáních v roce 2015 se diskutovalo o osudu Kjótského protokolu po roce 2020. Jednající strany nakonec dosáhly nové dohody, jejímž cílem je řešit tento dlouhodobý problém (DeLoyde & Mabee 2020). Výsledná Pařížská dohoda je jednou z nejdůležitějších částí politiky související s globální správou životního prostředí (Bretschger et al. 2018).

### 6.2 Pařížská dohoda

Pařížská dohoda je dohoda v rámci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu (UNFCCC z anglického United Nations Framework Convention on Climate Change). Je o zmírňování změny klimatu, přizpůsobení se přírodnímu prostředí a financování ochrany přírodního prostředí. Byla sepsána v roce 2016. Původně dohodu podepsalo 196 států. K březnu 2021 je členy dohody 191 členů UNFCCC. Ze šesti členských států, které dohodu neratifikovaly, jsou jedinými významnými producenty emisí Írán, Irák a Turecko, ačkoli irácký prezident již schválil přistoupení země k této dohodě. Spojené státy americké od dohody v roce 2020 odstoupily, ale znovu se připojily v roce 2021 (Walsh et al. 2017).

Dlouhodobým cílem Pařížské dohody je udržení meziročního růstu teploty výrazně pod 2 °C/rok a usilovat o omezení růstu až na hodnotu 1,5 °C/rok, což by mělo vést k podstatnému snížení rizika a dopadů změn klimatu na životní prostředí. Toho by mělo být dosaženo pomocí snižování emisí co nejrychleji to bude možné. Zaměřuje se také na schopnosti států přizpůsobit se nepříznivým dopadům změn klimatu a zajistit, aby ekonomika byla v souladu s cestou k nízkým emisím skleníkových plynů a udržitelnému rozvoji, který se bude schopen přizpůsobit změnám klimatu (Davy 2020).

Podle Pařížské dohody musí každá země stanovit plán postupu a pravidelně podávat zprávy o svém příspěvku ke zmírnění globálního oteplování. Žádný mechanismus ale nenutí členy, aby stanovili konkrétní cíl snížení emisí do konkrétního data, pouze uvádí, že každý stát by měl jít nad rámec dříve stanovených cílů. Na rozdíl od Kjótského protokolu se neřeší rozdíly mezi rozvinutými a rozvojovými zeměmi, a proto dohoda platí pro všechny bez výjimek (Bretschger et al. 2018).

### 6.3 Legislativa Evropské unie v oblasti biopaliv

V této kapitoly jsou vybrané části evropského práva, které mají úzkou spojitost s biopalivy a trvale udržitelným rozvojem.

#### 6.3.1 Zelené knihy

Pojmem zelené knihy označujeme dokumenty, vydané Evropskou komisí, které mají vyvolat veřejnou diskuzi o určitých tématech na evropské úrovni. Vyzývají příslušné strany jak v rámci EU, tak třetí země, aby se zapojily do debaty na základě návrhů, které Evropská komise uvedla do příslušné Zelené knihy. Zelené knihy mohou vést k legislativnímu vývoji, který je následně nastíněn v bílých knihách (EUR-Lex 2021).

V roce 1997 byla vydána Zelená kniha, která nesla název „Přizpůsobení se změně klimatu v Evropě – možnosti pro postup EU“. V té Komise navrhovala možná řešení problému klimatické změny způsobené emisemi skleníkových plynů. V dokumentu stanovila cíl snížit emise skleníkových plynů nejméně o 20 % do roku 2020 a o 50 % do roku 2050 v porovnání s úrovněmi z roku 1990. Jako způsoby snížení emisí skleníkových plynů EU navrhla zavedení včasných opatření v rámci EU, zahájení dialogu mezi zeměmi EU a nečlenskými státy a podporování výzkumu klimatických změn (EUR-Lex 2021).

#### 6.3.2 Bílé knihy

Bílé knihy Evropské komise jsou dokumenty obsahující návrhy na zavedení opatření Evropskou unií v konkrétní oblasti. V některých případech navazují na Zelenou knihu, která byla zveřejněna za účelem zahájení konstruktivní debaty na úrovni EU. Účelem Bílé knihy je zahájit

debatu s veřejností, zúčastněnými stranami, Evropským parlamentem a Evropskou radou s cílem dosažení shody (EUR-Lex 2021).

### 6.3.3 Směrnice Evropského parlamentu a Rady

#### **Směrnice 2003/30/ES**

Tato směrnice, ze dne 8. května 2003, pojednává o podpoře užívání biopaliv nebo jiných obnovitelných pohonných hmot v dopravě. Jednalo se o první opatření EU, které přispělo k rozvoji biopaliv. Směrnice vznikla na základě bílé knihy („Evropská dopravní politika do roku 2010: čas rozhodnutí“), ve které Evropská komise uváděla předpoklad, že v letech 1990 až 2010 by mohly emise CO<sub>2</sub> vzrůst až o 50 %. Zaměření na silniční dopravu při snaze zmírnit celkovou produkci emisí vycházelo z faktu, že silniční doprava tvoří 84 % emisí CO<sub>2</sub> souvisejících s dopravou. Směrnici byl stanoven minimální procentní obsah biopaliv přidaných do fosilních paliv na území členských států Evropské unie. Do konce roku 2005 měla být do fosilních paliv přidávána alespoň 2 % biopaliv, od roku 2006 do roku 2010 pak 5 % (Evropská komise 2003).

#### **Směrnice 2009/28/ES**

Nahradila v roce 2009 směrnici 2003/30/ES. Její celý název zní Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009, o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Směrnice vymezovala společný rámec pro podporu obnovitelné energetiky. Stanovovala celkový podíl obnovitelných zdrojů energie ku celkové spotřebě energie. Směrnice také stanovila kritéria udržitelnosti biopaliv a biokapalin (Evropská komise 2009).

#### **Směrnice 2015/652**

Tato směrnice stanovuje metody výpočtu a požadavky na podávání zpráv o jakosti benzínu a motorové nafty podle směrnice 98/70/ES. Evropská komise a Rada v této směrnici určují hodnoty emisí skleníkových plynů pro jednotlivá fosilní paliva a způsob výpočtu emisí skleníkových plynů (Evropská komise 2015).

#### **Směrnice 2018/2001**

Celým názvem Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018, o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů. Směrnice je často označována jako RED II (Renewable Energy Directive). Tato revidovaná směrnice přináší několik nových funkcí a pokusů o zvýšení podílu obnovitelných zdrojů. Směrnice RED II stanovuje, že do roku 2030 bude podíl obnovitelných zdrojů na konečné spotřebě energie v EU nejméně 32 %. Pokud členské státy těchto 32 % nedosáhnou, může je EU sankcionovat. S cílem usnadnit vstup obnovitelné energie do odvětví vytápění a chlazení by každý členský stát měl usilovat o zvýšení



podílu obnovitelné energie dodávané pro tyto účely o 1,3% bodů ročně (Holzleitner et al. 2020).

## 6.4 Legislativa České republiky v oblasti biopaliv

### **Zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší**

Hlavním účelem zákona o ochraně ovzduší je snaha o snížení emisí skleníkových plynů. Zákon stanovil postupné snižování emisí v přepočtu na energetickou jednotku pohonné hmoty a to následovně: snížení o 2 % od 31. 12. 2014 do 31. 12. 2017, snížení o 3,5 % od 31. 12. 2017 do 31. 12. 2019, snížení o 6 % do 31. 12. 2020 a v následujících letech (Zákon o ochraně ovzduší, MŽP).

V návaznosti na vydání Směrnice 2015/1513 Evropskou unií byla v srpnu roku 2018 schválena novela zákona č. 201/2012 Sb. Změny v oblasti biopaliv byly například upřesnění pojmu „pohonné hmoty“ nebo termín definující pokročilá biopaliva, jako paliva vyrobená z nepotravinářské biomasy či odpadů, k jejichž výrobě není třeba zemědělské půdy nebo lze k jejichž výrobě lze využít půdy zemědělsky nevyužitelné. Poslední podstatnou úpravou bylo stanovení obsahu biopaliv ve fosilních palivech. U benzínu bylo minimální množství stanoveno na 4,1 % celkového objemu, u nafty na 6 % (Zákon o ochraně ovzduší, MZP).

## 7 Budoucnost biopaliv z vodních řas

Za poslední desetiletí kumulativně roste poptávka po energii společně s globálním znečištěním. Výsledkem je globální oteplování a rychlý pokles zásob fosilních paliv, která jsou primárním zdrojem pohonných hmot pro energetický a dopravní sektor. V zájmu zachování přírodního prostředí a vyřešení otázky neobnovitelných fosilních paliv jsou v současnosti ve velkém spektru zkoumána obnovitelná biopaliva. V průběhu let ukázaly výzkumy provedené v oblasti technologické produkce biopaliv první a druhé generace, že pěstování tohoto druhu biomasy je z dlouhodobého hlediska neudržitelné, kvůli konkurenci s potravinářskou produkcí. (Jacob et al. 2021).

Řasy jsou naopak vhodným organismem pro kultivaci na nezemědělské půdě nebo v odpadních vodách. Přestože je prodejní cena řasové biomasy stále vysoká (asi 42 Kč/l) oproti fosilním palivům (asi 21 Kč/l), očekává se, že cena biopaliv z vodních řas bude v následujících desetiletích klesat, díky inovacím v postupech jejich kultivace a vývoji technologického zpracování řasové biomasy, až na hodnotu přijatelnou pro masovou produkci. Odhad je, že biopaliva z vodních řas poté budou tvořit až 75 % trhu s palivy (Vo Hoang Nhat et al. 2018).

### 7.1 Ekonomické hledisko

Provozní schopnost řas v dnešní době závisí hlavně na snížení kapitálových a provozních nákladů. Technoekonomické analýzy předpokládají, že biopalivo vyrobené z řas z otevřených systémů bude v budoucnu levnější než biopalivo vyrobené z biomasy z fotobioreaktorů (Davis et al. 2011). Pouze otevřené systémy jsou schopné snížit náklady na produkci dostatečně nízko, aby mohly účinně konkurovat fosilním palivům (Benemann et al. 2018).

Efroymson a kol. (2020) ve svém článku přezkoumávají možnost kultivace řas v nezpevněných otevřených systémech, které jsou podstatně levnější než současně využívané otevřené systémy, které vyžadují velký počáteční kapitál na uvedení do provozu. Mnoho dnešních malých nádrží je vyrobeno z plastů, jako je polyvinylchlorid (PVC) nebo polyuretan (PUR). Alternativními materiály, které se používají ke stavbě otevřených nádrží jsou jíl, beton anebo asfalt (Rogers et al. 2014). Nejčastěji jsou však rybníky vyloženy membránami vyrobenými z plastů. Příkladem těchto plastů je polyethylen s vysokou hustotou (HDPE), chlorovaný polyethylen (PE-C), PVC a pružný polypropylen (Ng 2009). Membrány vytvářejí bariéry odolné vůči chemické a UV degradaci, které mají velmi nízkou propustnost vody a dodávaných živin. Technoekonomické analýzy uvádějí, že tyto plastové vložky představují vysokou část kapitálových nákladů (Hoffman et al. 2017).

Harris a kol. (2013) ve své studii pro NASA uvádějí, že nejvýhodnějším způsobem pro ekonomicky životaschopnou produkci řasové biomasy je důležité propojení dostupných technologií a jejich integrace do jednoho velkého ekosystému. Jako příklad těchto integrací

vedl využití slunečních a větrných elektráren v komplexu, blízkých tepelných elektráren jako zdroje CO<sub>2</sub>, chov ryb a korýšů v komplexu anebo využití odpadních vod z přilehlé aglomerace jako zdroje živin. Zvolením tohoto způsobu integrace se dramaticky omezí počet dostupných výrobních míst.

## 7.2 Environmentální hledisko

Produkce mikro-řasové biomasy může mít rozsáhlé dopady na přírodní prostředí. Mnohé z těchto dopadů by mohly omezit různé návrhy provozů kultivačních systémů vodních řas. Dopady zde uvedené jsou ty, které jsou nejčastěji zmiňované v odborných diskuzích.

### Zásobování vodou

Spolehlivé a levné zásobování vodou je zásadní pro úspěch výroby biopaliv z mikro-řas. K vyrovnaní odtoku vody a odpařování vody z otevřených systému je třeba kontinuálně doplňovat vodu. Jedním z možných způsobů je využívat vodu, která má malé konkurenční použití. Do této kategorie spadá mořská a brakická voda. Brakická voda ale může vyžadovat vyčištění před jejím přidáním do systému, protože může obsahovat sloučeniny inhibující růst řas, což ve výsledku zvýší náklady (Darzins et al. 2010).

Dalším způsobem snížení nákladů na zásobování vodou je využití recirkulace neboli vyčištěné vody. Tento způsob má potenciál snížit spotřebu vody i množství dodávaných živin, ale jsou zde vyšší rizika infekce a inhibice (Slade & Bauen 2013).

### Zásobování živinami

Pěstování řas vyžaduje zásobování živinami, především dusíku a fosforu. Ve většině případů se tedy nelze vyhnout přihnojování kultivačního prostředí. Kompletní nahrazení fosilních paliv biopalivy z vodních řas by vyžadovalo pravidelné vysoké dávky hnojiv pro pěstební systémy. Například, kdyby Evropská unie přešla z fosilních paliv na biopaliva třetí generace, vyžadovalo by to 25 milionů tun dusíku a 4 milion fosforu ročně, tím by se zdvojnásobila současná spotřeba hnojiv v EU (Wijffels & Barbosa 2010).

Recyklace živin z odpadních vod by mohla potenciálně poskytnout živiny potřebné pro kultivaci řas a již existují návrhy systémů, které začleňují využití živin z odpadních vod jako základní aspekt v návrhu a provozu systému (Vo Hoang Nhat et al. 2018).

### Zásobování oxidem uhličitým

Kultivační systémy řas vyžadují zdroj oxidu uhličitého. Za předpoklady, že řasy mají 50% hmotnostní podíl uhlíku, vyžaduje produkce 1 kg suché hmotnosti řasové biomasy přibližně 1,83 kg CO<sub>2</sub>. Ve skutečnosti je však spotřeba několikanásobně vyšší. V závislosti na provozních

podmínkách se teoretická využitelnost CO<sub>2</sub> pohybuje v rozmezí 22-90 % (Weissman et al. 1988).

Potřeba zdroje CO<sub>2</sub> má dopad jak na místo, kde lze umístit výrobu, tak na energetickou bilanci celého systému. Pokud by byl využit oxid uhelnatý produkovaný spalováním, muselo by se výrobní místo nacházet v blízkosti tepelné elektrárny nebo jiného zdroje CO<sub>2</sub>. Tyto zdroje mají tendenci být koncentrovány v blízkosti hlavních průmyslových a městských oblastí a relativně málo z nich se nachází poblíž zdroje vody (Darzins et al. 2010).

### **Půda**

Výhodou využití řas je, že mohou využívat okrajovou část půdy, která není využívána k produkci potravin. Nejvhodnější jsou půdy v okolí rybníků, které vykazují po většinu roku ideální podmínky (Slade & Bauen 2013).

### **Eutrofizace**

Eutrofizace v tomto případě znamená znečištění živinami, které může působit změny ve funkci i struktuře ekosystému, přičemž dopad na akvakulturu může být jak pozitivní, tak negativní, např. pokud by se zbytkové živiny z kultivačního média vyluhovaly do místních vodních systémů. Pokud by ale byla produkce řas zaintegrována do úpravy vod, které mají nadměrný přísun živin, byl by vliv řas pozitivní (Lundquist & Woertz 2010).

### **Toxiny**

Některé druhy řas produkují během svého životního cyklu toxické látky jako například amoniak, ale i fyziologicky aktivní polysacharidy a polypeptidy. Tyto toxiny mohou vyvolávat akutní i chronické toxické účinky. Některé toxiny mohou mít i karcinogenní účinky. Produkce toxinů je ovlivněna mimo druhu či kmene řas také podmínkami prostředí. Jejich přítomnost je tedy velmi složité prokázat (Slade & Bauen 2013).

## 8 Závěr

Mikro-řasy získaly značnou pozornost jako slibné nástroje pro zvládnutí naléhavého problému změny klimatu způsobeného závislostí na fosilních palivech, antropogenními emisemi CO<sub>2</sub> a rostoucí světovou populací. V souladu s jejich vysokou účinností fotosyntetické fixace CO<sub>2</sub>, schopností růst i v odpadních a průmyslových vodách, schopností využívat průmyslem vyprodukovaný CO<sub>2</sub> (z tepelných elektráren) a možnosti pěstování na nezemědělské půdě se na produkci řasové biomasy zaměřuje významná část biotechnologické výzkumné komunity a snaží se umožnit ekonomickou konkurenceschopnost biopaliv třetí generace.

V porovnání efektivity makro- a mikro-řas pro výrobu biopaliv se zjistilo, že mikro-řasy jsou vhodnější, jelikož mají nižší nároky na prostředí a mají rychlejší růst. Také technologické zpracování mikro-řas je méně ekonomicky nákladné.

V oblasti výzkumu druhů vhodných k produkci řasové biomasy je stále spousta nejasností, protože na zemi existují statisíce druhů, a ne všechny zatím byly vyzkoušeny pro účely výroby biopaliv. Zkouší se i využití původních druhů v regionální produkci za účelem lepšího přizpůsobení se řas prostředí.

Jednou z nejslibnějších metod pěstování řas se jeví co největší integrace kultivačních nádrží s jinými výrobami (elektřina z obnovitelných zdrojů, potraviny, čištění odpadních vod atd.). Tímto způsobem se zabýval Projekt OMEGA financovaný americkou agenturou NASA, pod vedením Jonathana Trenta a kol.

Nejnovější inovací ve výzkumu biopaliv z vodních řas je genetické modifikování druhů za účelem zvýšení obsahu požadovaných sloučenin užívaných pro výrobu biopaliv. Genetické inženýrství využívá znalosti hlavních molekul potřebných pro akumulaci metabolitů k vytvoření rekombinantních kmenů mikro-řas, které by pomocí nadměrné exprimace specifických enzymů změnilo metabolismus cílených sloučenin. V současné době je genetické inženýrství využíváno pro zlepšení procesů biochemického inženýrství, které se snaží docílit zvýšení produkce metabolitů pomocí změň fyziologických podmínek, jako je teplota kultivace či negativní dusíková bilance.

## 9 Literatura

Adams JM, Gallagher JA, Donnison IS. 2009. Fermentation study on *Saccharina latissima* for bioethanol production considering variable pre-treatments. 569-574 in *Journal of Applied Phycology*.

Adeniyi OM, Azimov U, Burluka A. 2018. Algae biofuel: Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90:316-335.

Aitken D, Bulboa C, Godoy-Faundez A, Turrion-Gomez JL, Antizar-Ladislao B. 2014. Life cycle assessment of macroalgae cultivation and processing for biofuel production. *Journal of Cleaner Production* 75:45-56.

AKKERMAN I. 2002. Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design. *International Journal of Hydrogen Energy* 27:1195-1208.

Anto S, Mukherjee SS, Muthappa R, Mathimani T, Deviram G, Kumar SS, Verma TN, Pugazhendhi A. 2020. Algae as green energy reserve: Technological outlook on biofuel production. *Chemosphere* 242.

Assunção J, Malcata FX. 2020. Enclosed “non-conventional” photobioreactors for microalga production: A review. *Algal Research* 52.

Baerdemaeker TD, Lemmens B, Dotremont C, Fret J, Roef L, Goiris K, Diels L. 2013. Benchmark study on algae harvesting with backwashable submerged flat panel membranes. *Bioresource Technology* 129:582-591.

Banerjee S, Banerjee S, Ghosh AK, Das D. 2020. Maneuvering the genetic and metabolic pathway for improving biofuel production in algae: Present status and future prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133.

Barbier EB, Burgess JC. 2015. *Sustainable Development: An Economic Perspective*. :823-827. Elsevier.

Baudry G, Macharis C, Vallée T. 2018. Can microalgae biodiesel contribute to achieve the sustainability objectives in the transport sector in France by 2030? A comparison between first, second and third generation biofuels through a range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. *Energy* 155:1032-1046.

Beale SI, Appleman D. 1971. Chlorophyll Synthesis in *Chlorella*. *Plant Physiology* 47:230-235.

Benemann JR, Woertz I, Lundquist T. 2018. Autotrophic Microalgae Biomass Production: From Niche Markets to Commodities. *Industrial Biotechnology* **14**:3-10.

Bernard O, Mairet F, Chachuat B. 2016. Modelling of Microalgae Culture Systems with Applications to Control and Optimization. *Microalgae Biotechnology*:59-87. Springer International Publishing, Cham.

Boulanger P-M. 2008. Sustainable development indicators: a scientific challenge, a democratic issue. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society* **1**:59-73.

Braungart M, McDonough W, Bollinger A. 2007. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production* **15**:1337-1348.

Brennan L, Owende P. 2010. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**:557-577.

Bretschger L, Meulemann M, Stünzi A. 2018. Climate Policy Based on the Paris Agreement. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier.

Brodhag C, Taliere S. 2006. Sustainable development strategies: Tools for policy coherence. *Natural Resources Forum* **30**:136-145.

Budarin VL, Zhao Y, Gronnow MJ, Shuttleworth PS, Breeden SW, Macquarrie DJ, Clark JH. 2011. Microwave-mediated pyrolysis of macro-algae. *Green Chemistry* **13**.

Buhr HO, Miller SB. 1983. A dynamic model of the high-rate algal-bacterial wastewater treatment pond. *Water Research* **17**:29-37.

Campagnolo L, Carraro C, Eboli F, Farnia L, Parrado R, Pierfederici R. 2018. The Ex-Ante Evaluation of Achieving Sustainable Development Goals. *Social Indicators Research* **136**:73-116.

Cantrell KB, Ducey T, Ro KS, Hunt PG. 2008. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. *Bioresource Technology* **99**:7941-7953.

Carlsson AS, Beilen JB van, Möller R, Clayton D. 2007. MICRO- AND MACRO-ALGAE: UTILITY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS. CPL Press, The Sydings, Speen, Newbury, Berks RG14 1RZ, UK.

Carney LT, Lane TW. 2014. Parasites in algae mass culture. *Frontiers in Microbiology* **5**.

- Clark JH, Deswarte F. 2014. Introduction to Chemicals from Biomass. 2nd ed. John Wiley.
- Coomer J. 1981. Quest for a Sustainable Society: Pergamon Policy Studies on Business and Economics. Elsevier, Oxford.
- Cooper PJ de, Vargas CM. 2004. Implementing Sustainable Development: From Global Policy to Local Action. Rowman & Littlefield Publishers.
- Crackner R. 2008. Biofuels for Road transport: Shell Global Solutions. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences.
- Culaba AB, Ubando AT, Ching PML, Chen W-H, Chang J-S. 2020. Biofuel from Microalgae: Sustainable Pathways. Sustainability **12**.
- Culaba AB, Ubando AT, Ching PML, Chen W-H, Chang J-S. 2020. Biofuel from Microalgae: Sustainable Pathways. Sustainability **12**.
- Daly HE. 1992. U.N. Conferences on Environment and Development: Retrospect on Stockholm and Prospects for Rio. Ecological Economics **5**:9-14.
- Darzins A, Pienkos P, Edye L. 2010. Current Status and Potential for Algal Biofuels Production: A REPORT TO IEA BIOENERGY TASK 39. International Energy Agency (IEA).
- Davis R, Aden A, Pienkos PT. 2011. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. Applied Energy **88**:3524-3531.
- Davy R. 2020. Climate of the High Arctic. Encyclopedia of the World's Biomes:457-464. Elsevier.
- Dębowski M, Zieliński M, Grala A, Dudek M. 2013. Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies—Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews **27**:596-604.
- DeLoyde CNM, Mabee WE. 2020. Environmental Governance. International Encyclopedia of Human Geography:1-6. Elsevier.
- Demirbas A, Fatih Demirbas M. 2011. Importance of algae oil as a source of biodiesel. Energy Conversion and Management **52**:163-170.
- Dernbach. 2003. Achieving Sustainable Development: The Centrality and Multiple Facets of Integrated Decisionmaking. Indiana Journal of Global Legal Studies **10**.



Deutz P. 2020. Circular Economy. International Encyclopedia of Human Geography:193-201. Elsevier.

Du Q, Kang JT. 2016. Tentative ideas on the reform of exercising state ownership of natural resources: Preliminary thoughts on establishing a state-owned natural resources supervision and administration commission. Jiangxi Social Science:160.

Edwards M, Watson L. 2015. Aquaculture Explained: Cultivating *Laminaria digitata*. Available at [doi.org/10.13140/RG.2.1.2153.3283](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2153.3283)

Efroymson RA, Pattullo MB, Mayes MA, Mathews TJ, Mandal S, Schoenung S. 2020. Exploring the sustainability and sealing mechanisms of unlined ponds for growing algae for fuel and other commodity-scale products. Renewable and Sustainable Energy Reviews **121**.

Gerde JA, Yao L, Lio JY, Wen Z, Wang T. 2014. Microalgae flocculation: Impact of flocculant type, algae species and cell concentration. Algal Research **3**:30-35.

Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production **114**:11-32.

Glosář shrnutí: Bílá kniha. Available at [https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/white\\_paper.html](https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/white_paper.html) (accessed April 3, 2021).

Glosář shrnutí: Zelená kniha. Available at [https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/green\\_paper.html?locale=cs](https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/green_paper.html?locale=cs) (accessed April 3, 2021).

González-López CV, Acién Fernández FG, Fernández-Sevilla JM, Sánchez Fernández JF, Molina Grima E. 2012. Development of a process for efficient use of CO<sub>2</sub> from flue gases in the production of photosynthetic microorganisms. Biotechnology and Bioengineering **109**:1637-1650.

Griffiths M, Harrison STL, Smit M, Maharajh D. 2016. Major Commercial Products from Micro- and Macroalgae. 269-300 in Algae Biotechnology. Springer International Publishing, Cham.

Gupta VK, Tuohy MG. 2013. Biofuel Technologies: Recent Developments. Springer-Verlag, London.

Gutiérrez-Antonio C, Gómez-Castro FI, de Lira-Flores JA, Hernández S. 2017. A review on the production processes of renewable jet fuel. Renewable and Sustainable Energy Reviews **79**:709-729.

Gutiérrez-Antonio C, Romero-Izquierdo AG, Gómez-Castro FI, Hernández S, Briones-Ramírez A. 2016. Simultaneous energy integration and intensification of the hydrotreating process to produce biojet fuel from *Jatropha curcas*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **110**:134-145.

Harmon VL, Wolfrum E, Knoshaug EP, Davis R, Laurens LML, Pienkos PT, McGowen J. 2021. Reliability metrics and their management implications for open pond algae cultivation. *Algal Research* **55**.

Harris L, Tozzi S, Wiley P, Young C, Richardson T-MJ, Clark K, Trent JD. 2013. Potential impact of biofouling on the photobioreactors of the Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA) system. *Bioresource Technology* **144**:420-428.

Hartmann P et al. 2014. Growth Rate Estimation of algae in Raceway Ponds: A novel Approach. *IFAC Proceedings Volumes* **47**:6216-6221

Hoffman J, Pate RC, Drennen T, Quinn JC. 2017. Techno-economic assessment of open microalgae production systems. *Algal Research* **23**:51-57.

Holzleitner M, Moser S, Puschnigg S. 2020. Evaluation of the impact of the new Renewable Energy Directive 2018/2001 on third-party access to district heating networks to enforce the feed-in of industrial waste heat. *Utilities Policy* **66**.

Hossain ABMS, Salleh A, Boyce AN, Chowdhury P, Naqiuddin M. 2008. Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology* **4**:250-254.

Hromádka J, Hromádka J, Miler P, Hönig V, Cindr M. 2010. TECHNOLOGIE VÝROBY BIOPALIV DRUHÉ GENERACE. *Chemické Listy*:784-790.

Hu Y, Monroy CR. 2012. Chinese energy and climate policies after Durban: Save the Kyoto Protocol. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**:3243-3250.

Chaudhary L, Pradhan P, Soni N, Singh P, Tiwari A. 2014. Algae as a feedstock for bioethanol production: New entrance in biofuel world. *International Journal of ChemTech Research* **6**:1381-1389. ChemTech, School of Biotechnology (An Autonomous University Teaching Department), Rajiv Gandhi Proudhyogiki Vishwavidyalaya, State Technological University of Madhya Pradesh, Airport Road, Bhopal-462033, India.

Chen H, Zhou D, Luo G, Zhang S, Chen J. 2015. Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **47**:427-437.

Chen P, Min M, Chen Y, Wang L, Li Y, Chen Q. 2009. Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*:1-30.

Chisti Y, Craggs RJ, Shilton AN. 2008. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology* **26**:126-131.

Jacob A, Ashok B, Alagumalai A, Chyuan OH, Le PTK. 2021. Critical review on third generation micro algae biodiesel production and its feasibility as future bioenergy for IC engine applications. *Energy Conversion and Management* **228**.

James SC, Boriah V. 2010. Modeling Algae Growth in an Open-Channel Raceway. *Journal of Computational Biology* **17**:895-906.

Jankowska E, Sahu AK, Oleskowicz-Popiel P. 2017. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **75**:692-709.

John RP, Anisha GS, Nampoothiri KM, Pandey A. 2011. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. *Bioresource Technology* **102**:186-193.

Kerrison PD. 2017. Algae as Crops Seaweed. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*:148-152. Elsevier.

Ketheesan B, Nirmalakhandan N. 2011. Development of a new airlift-driven raceway reactor for algal cultivation. *Applied Energy* **88**:3370-3376.

Kliman RM. 2016. *Encyclopedia of Evolutionary Biology*. Academic Press, 225 Wyman Street, Waltham MA, 02451.

Kučera P. 2003. Sinice a řasy tekoucích a stojatých vod přírodního parku "Pod Štědrým." *Czech Phycology* **3**:79-86. Botanický ústav AV ČR Brno, Květná 8, CZ - 603 65 Brno.

Kumar K, Mishra SK, Shrivastav A, Park MS, Yang J-W. 2015. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **51**:875-885.

Kumar S, Raizada A, Biswas H. 2013. Prioritising development planning in the Indian semi-arid Deccan using sustainable livelihood security index approach. **21**:332-345.

Larson ED. 2006. A review of life-cycle analysis studies on liquid biofuel systems for the transport sector. *Energy for Sustainable Development* **10**:109-126.

Lee OK, Lee EY. 2016. Sustainable production of bioethanol from renewable brown algae biomass. *Biomass and Bioenergy* **92**:70-75.

Lee S, Shah YT. 2013. *Biofuels and Bioenergy: Processes and Technologies*. CRC Press, CRC Press 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300.

Leite GB, Hallenbeck PC. 2014. Engineered Cyanobacteria. 389-406 in *Bioenergy Research: Advances and Applications*. Elsevier.

Li S, Luo S, Guo R. 2013. Efficiency of CO<sub>2</sub> fixation by microalgae in a closed raceway pond. *Bioresource Technology* **136**:267-272.

Li-Beisson Y, Peltier G. 2013. Third-generation biofuels: current and future research on microalgal lipid biotechnology. *OCL* **20**.

Lindsey Zemke-White W, Ohno M. 1999. *Journal of Applied Phycology* **11**:369-376.

Liu G, Yan B, Chen G. 2013. Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **25**:59-70.

Liu L, Ramakrishna S. 2021. *An Introduction to Circular Economy*. Springer Nature, Singapore.

Lobo M-J, Pietriga E, Appert C. 2015. An Evaluation of Interactive Map Comparison Techniques. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*:3573-3582. ACM, New York, NY, USA.

Lundquist TJ, Woertz IC. 2010. *A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production*. University of California Berkeley, California, Energy Biosciences Institute.

Malek A, Zullo LC, Daoutidis P. 2016. Modeling and Dynamic Optimization of Microalgae Cultivation in Outdoor Open Ponds. **55**:3327-3337.

Maneein S, Milledge JJ, Nielsen BV, Harvey PJ. 2018. A Review of Seaweed Pre-Treatment Methods for Enhanced Biofuel Production by Anaerobic Digestion or Fermentation. *Fermentation* **4**.

Matsumoto M, Yokouchi H, Suzuki N, Ohata H, Matsunaga T. 2003. Saccharification of Marine Microalgae Using Marine Bacteria for Ethanol Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*:105-108. Humana Press.

- Mensah J, Ricart Casadevall S. 2019. Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action. *Cogent Social Sciences* **5**.
- Millock K. 2013. Clean Development Mechanism. *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics*:15-21. Elsevier.
- Mohsenpour SF, Hennige S, Willoughby N, Adeloje A, Gutierrez T. 2021. Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review. *Science of The Total Environment* **752**.
- Moodley P. 2021. Sustainable biofuels: opportunities and challenges. 1-20 in *Sustainable Biofuels*. 4th ed. Elsevier, 525 B Street, Suite 1650, San Diego, CA 92101, United States.
- Nahak S, Nahak G, Pradhan I, Sahu RK. 2011. Bioethanol from Marine Algae: A Solution to Global Warming Problem. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* **4**:74-80. Text Road.
- Nautiyal P, Subramanian KA, Dastidar MG. 2014. Recent Advancements in the Production of Biodiesel from Algae: A Review. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier.
- Ng HB. 2009. HDPE Lined Water Reservoirs for Power Generating Stations. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*:769-774. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Nigam PS, Singh A. 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science* **37**:52-68.
- Odlare M, Nehrenheim E, Ribé V, Thorin E, Gavare M, Grube M. 2011. Cultivation of algae with indigenous species – Potentials for regional biofuel production. *Applied Energy* **88**:3280-3285.
- Oswald WJ, Golueke CG. 1960. Biological Transformation of Solar Energy. *Advances in Applied Microbiology Volume 2*:223-262.
- Ošljaj M, Muršec B. 2010. Biogas as a renewable energy source. *Tehnički vjesnik* **17**:109-114. Faculty of Mechanical Engineering in Slavonski Brod, Faculty of Electrical Engineering in Osijek, Faculty of Civil Engineering in Osijek, Croatia, University of Maribor, Faculty of Agriculture and Life Sciences, 2311 Hoce, Pivola 10 Slovenija, Slovenia.
- Park JBK, Craggs RJ, Shilton AN. 2011. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology* **102**:35-42.

Pawar S. 2016. Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **62**:640-653.

Peralta-Ruiz Y, González-Delgado A-D, Kafarov V. 2013. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. *Applied Energy* **101**:226-236.

Philippesen A, Wild P, Rowe A. 2014. Energy input, carbon intensity and cost for ethanol produced from farmed seaweed. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **38**:609-623.

Polprasert C, Kottatep T. 2017. *Organic Waste Recycling: TECHNOLOGY, MANAGEMENT AND SUSTAINABILITY*. 4th ed. IWA Publishing, 12 Caxton Street London SW1H 0QS, UK.

Prioritising development planning in the Indian semi-arid Deccan using sustainable livelihood security index approach. **21**:332-345.

Raeisossadati M, Moheimani NR, Parlevliet D. 2019. Luminescent solar concentrator panels for increasing the efficiency of mass microalgal production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **101**:47-59.

Rarrek A, Mostertz M, Kistenmacher H, Rehfeldt S, Klein H. 2016. Simulation and optimization of large open algae ponds. *Chemical Engineering Research and Design* **114**:220-235.

Rarrek A, Rehfeldt S, Klein H. 2017. Evaluation of the performance of a simulation model for open algae ponds and investigation of the operating behavior of open algae ponds over a one-year period for different locations. *Chemical Engineering Research and Design* **125**:523-537.

Retchless DP, Brewer CA. 2016. Guidance for representing uncertainty on global temperature change maps. *International Journal of Climatology* **36**:1143-1159.

Rogers JN, Rosenberg JN, Guzman BJ, Oh VH, Mimbela LE, Ghassemi A, Betenbaugh MJ, Oylar GA, Donohue MD. 2014. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Research* **4**:76-88.

Rosillo-Calle F, de Groot P, Hemstock SL, Woods J. 2007. *The Biomass Assessment Handbook: Bioenergy for a Sustainable Environment*. Earthscan, 22883 Quicksilver Drive, Sterling, VA 20166-2012, US.

Sambusiti C, Bellucci M, Zabaniotou A, Beneduce L, Monlau F. 2015. Algae as promising feedstocks for fermentative biohydrogen production according to a biorefinery approach: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **44**:20-36.

Scott SA, Davey MP, Dennis JS, Horst I, Howe CJ, Lea-Smith DJ, Smith AG. 2010. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology* **21**:277-286.

SDG Indicators: Statistics Division. 2018. United Nations Statistics Division Development Data and Outreach Branch, New York, NY 10017. Available at <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/> (accessed April 2, 2021).

Schmidt T. 2019. *Encyclopedia of Microbiology*. 4th ed. Academic Press, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB.

Schneider J, Grube C, Herrmann A, Rönsch S. 2016. Atmospheric entrained-flow gasification of biomass and lignite for decentralized applications. *Fuel Processing Technology* **152**:72-82.

Singh RN, Sharma S. 2012. Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**:2347-2353.

Slade R, Bauen A. 2013. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy* **53**:29-38.

Slegers PM, van Beveren PJM, Wijffels RH, van Straten G, van Boxtel AJB. 2013. Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. *Applied Energy* **105**:395-406.

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/2001: o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=CS> (accessed April 3, 2021).

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2003/30/ES: o podpoře užívání biopaliv nebo jiných obnovitelných pohonných hmot v dopravě. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0030&from=CS> (accessed April 3, 2021).

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/28/ES: o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=CS> (accessed April 3, 2021).

SMĚRNICE RADY (EU) 2015/652: kterou se stanoví metody výpočtu a požadavky na podávání zpráv podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 98/70/ES o jakosti benzínu a motorové nafty. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0652&from=CS> (accessed April 3, 2021).

Smith BT, Davis RH. 2013. Particle concentration using inclined sedimentation via sludge accumulation and removal for algae harvesting. *Chemical Engineering Science* **91**:79-85.

Stechmann A, Cavalier-Smith T. 2003. The root of the eukaryote tree pinpointed. *Current Biology* **13**:R665-R666.

Steneck RS. 2001. Functional Groups. 121-139 in *Encyclopedia of Biodiversity*. 2nd ed. Elsevier, Princeton University, Princeton, New Jersey, USA.

Su Y. 2021. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. *Science of The Total Environment* **762**.

Subramaniam Y, Masron TA, Azman NHN. 2019. The impact of biofuels on food security. *International Economics* **160**:72-83.

Suganya T, Varman M, Masjuki HH, Renganathan S. 2016. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **55**:909-941.

Sun Y, Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology* **83**:1-11.

Tabak J. 2009. *Energy and The Environment: Biofuels*. Facts On File, 132 West 31st Street New York NY 10001.

Taylor SJ. 2016. *A review of sustainable development principles: Centre for environmental studies*. University of Pretoria, South Africa.

Timilsina GR, Shrestha A. 2010. *Biofuels: Markets, Targets And Impacts*.

Tsoglin LN, Gabel' BV, Fal'kovich TN, Semenko VE. 1996. Closed Photobioreactors for Microalgal Cultivation: From upstream cultivation to downstream processing. *Russian Journal of Plant Physiology* **43**:131-136.

Ugwu CU, Aoyagi H, Uchiyama H. 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology* **99**:4021-4028.

Ullah K, Ahmad M, Sofia, Sharma VK, Lu P, Harvey A, Zafar M, Sultana S. 2015. Assessing the potential of algal biomass opportunities for bioenergy industry: A review. *Fuel* **143**:414-423.

Vega-Estrada J, Montes-Horcasitas MC, Domínguez-Bocanegra AR, Cañizares-Villanueva RO. 2005. *Haematococcus pluvialis* cultivation in split-cylinder internal-loop airlift photobioreactor



under aeration conditions avoiding cell damage. *Applied Microbiology and Biotechnology* **68**:31-35.

Vo Hoang Nhat P, Ngo HH, Guo WS, Chang SW, Nguyen DD, Nguyen PD, Bui XT, Zhang XB, Guo JB. 2018. Can algae-based technologies be an affordable green process for biofuel production and wastewater remediation? *Bioresource Technology* **256**:491-501.

Walsh B, Ciais P, Janssens IA, Peñuelas J, Riahi K, Rydzak F, van Vuuren DP, Obersteiner M. 2017. Pathways for balancing CO<sub>2</sub> emissions and sinks. *Nature Communications* **8**.

Wang B, Lan CQ, Horsman M. 2012. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances* **30**:904-912

Weissman JC, Goebel RP, Benemann JR. 1988. Photobioreactor design: Mixing, carbon utilization, and oxygen accumulation. *Biotechnology and Bioengineering* **31**:336-344.

Wen Z, Liu J, Chen F. 2011. Biofuel from Microalgae. *Comprehensive Biotechnology*:127-133. Elsevier.

Wijffels RH, Barbosa MJ. 2010. An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science* **329**:796-799.

Wijffels RH, Kruse O, Hellingwerf KJ. 2013. Potential of industrial biotechnology with cyanobacteria and eukaryotic microalgae. *Current Opinion in Biotechnology* **24**:405-413.

Xu D, Qin Y, Fang Y, Chen M, Li X, Cai J. 2021. Stainless steel membranes for harvesting cyanobacteria: Performance, fouling and cleaning. *Bioresource Technology* **319**.

Yadala S, Cremaschi S. 2016. A Dynamic Optimization Model for Designing Open-Channel Raceway Ponds for Batch Production of Algal Biomass. *Processes* **4**.

Yang A. 2011. Modeling and Evaluation of CO<sub>2</sub> Supply and Utilization in Algal Ponds. **50**:11181-11192.

Yew GY, Lee SY, Show PL, Tao Y, Law CL, Nguyen TTC, Chang J-S. 2019. Recent advances in algae biodiesel production: From upstream cultivation to downstream processing. *Bioresource Technology Reports* **7**.

Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší. Available at <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0&action=openDocument> (accessed March 3, 2021).

Zhai T, Chang Y-C. 2018. Standing of Environmental Public-Interest Litigants in China: Evolution, Obstacles and Solutions. *Journal of Environmental Law* **30**:369-397.

Zhao L-S, Su H-N, Li K, Xie B-B, Liu L-N, Zhang X-Y, Chen X-L, Huang F, Zhou B-C, Zhang Y-Z. 2016. Supramolecular architecture of photosynthetic membrane in red algae in response to nitrogen starvation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* **1857**:1751-1758.

Ziolkowska JR. 2020. Biofuels technologies: An overview of feedstocks, processes, and technologies. 1-19in *Biofuels for a More Sustainable Future*. Elsevier.

## 9.1 Seznam obrázků

Obr. 3.1 – Tři základní pilíře trvale udržitelného rozvoje (Mensah 2019).....	11
Obr. 3.2 – Koloběh dusíku (Biology dictionary 2021).....	14
Obr. 3.3 – Oběh dusíku v průmyslu (Epea 2021) .....	14
Obr. 3.4 – Schematické znázornění efektu předběžné úpravy (Hsu et al. 1980; Mosier et al. 2005).....	18
Obr. 4.1 – Vertikální a horizontální způsob pěstování makro-řas (Ghadiryfar et al. 2015) .	24
Obr. 4.2 – Model otevřených nádrží na kultivaci řas (Rarrek et al. 2016, vlastní zpracování) .	26
Obr. 4.3 – Schématický nákres podlouhlých míchaných nádrží (Polprasert & Kooattatep 2017) .....	28
Obr. 4.4 – Typy fotobioreaktorů (Assunção & Malcata 2020).....	30
Obr. 4.5 – Schématický nákres systému HRAP (Park & Craggs 2011).....	33
Obr. 5.1 – Transesterifikace lipidů (Anto et al. 2020, vlastní zpracování) .....	35

## 9.2 Seznam tabulek

Tab. 4.1 – Archaické rozdělení řas (Bold a Wynne 1978).....	21
Tab. 4.2 – Současné rozdělení řas (Burki et al. 2007) .....	22