

Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku

Vojtěch Bělohav, Tomáš Jirout, Lukáš Krátký

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, e-mail: vojtech.belohlav@fs.cvut.cz

Abstrakt

V dnešní době existuje množství laboratorních a průmyslových systémů pro kultivaci řas. V tomto článku jsou popsány stávající konstrukce systémů pro kultivaci řas a na základě kritické analýzy je vypracováno porovnání použití různých konstrukčních variant fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku. Pro zvolené množství produkce řas jsou určeny základní konstrukční parametry fotobioreaktorů. Pro zvolené konstrukční parametry je následně vypracováno ekonomické zhodnocení variant.

Abstract

Until now a number of various laboratory, as well as industrial systems for algae production have been developed. In the present paper, critical review of existing industrial design alternatives for algae cultivation is elaborated. For a selected quantity of algae production, basic design parameters of various photobioreactors are determined. Moreover, an economic evaluation of designs has been prepared.

Klíčová slova

Kultivace řas, Fotobioreaktor, Řasy, Biomasa, Biopaliva

Keywords

Algae cultivation, Photobioreactor, Algae, Biomass, Biofuels

1. Úvod

Biomasa pro výrobu biopaliv první generace, kam patří například rychle rostoucí dřeviny nebo řepka olejná, již dosáhla komerční úrovně. Výhodou biomasy pro výrobu druhé generace biopaliv je, že přímo nevyužívá ornou půdu a má tedy v porovnání s první generací nižší vliv na životní prostředí. Nevýhodou je však její nižší míra konverze. Řasy jsou označovány jako biomasa třetí generace a její potenciál spočívá ve výrobě biopaliv, potravin, krmiva nebo chemických produktů. V dnešní době existuje řada různých konstrukčních variant kultivačních systémů, které se používají pro produkci řas. Jejich vzájemné porovnání je však velmi komplikované, neboť samotný proces kultivace je ovlivňován širokým spektrem konstrukčních a provozních parametrů.

2. Kultivace řas

Řasy patří mezi nižší vodní organismy, které jsou schopny, stejně jako rostliny, přeměňovat světelné záření, oxid uhličitý, vodu a živiny na biomasu pomocí procesu fotosyntézy. Běžné fotosyntetické organismy dokáží při produkci jednoho kilogramu kyslíku spotřebovat přibližně 0,77 kg oxidu uhličitého. Řasy však mohou dosahovat vyšší účinnosti fotosyntézy než ostatní rostliny, což může vést až k téměř trojnásobné spotřebě oxidu uhličitého při produkci 1 kg biomasy z řas. Dalším specifickým je také vysoká rychlost jejich růstu a schopnost růstu v různých podmínkách, kde se vyskytují pouze základní živiny [1]. Je odhadováno, že na celém světě jsou řasy zastoupeny více jak 50 000 druhy, které jsou schopny růst v nejrůznějších podmínkách životního prostředí. Tyto druhy jsou často rozlišovány dle jejich pigmentace, životního cyklu nebo základní buněčné struktury. Efektivní růst řas a následná produktivita biomasy jsou ovlivněny řadou faktorů, jako je světlo, množství kyslíku, živiny, pH, oxid uhličitý a teplota. Vliv těchto faktorů se liší podle charakteristik jednotlivých druhů řas. Některé řasy vyžadují pro správný růst intenzivnější ozařování, zatímco další mohou být příliš intenzivním světlem ve svém růstu omezovány.

Z tohoto důvodu musí být druh řas vybírán s ohledem na plánované provozní a konstrukční podmínky kultivačního systému, které jsou spojeny hlavně s lokací, kde je systém instalován. Obecně lze řasy rozdělit do tří základních skupin podle typu jejich životního cyklu na: autotrofní, heterotrofní a mixotrofní. V současnosti se autotrofní produkce biomasy z řas jeví jako jediná použitelná varianta z hlediska technického a ekonomického [2]. Řasy mohou být kultivovány v různých vodních systémech. Autotrofní kultivační systémy lze rozdělit do tří základních skupin: otevřené kultivační systémy, uzavřené fotobioreaktory a hybridní fotobioreaktory. Hybridní fotobioreaktory kombinují předchozí varianty a vytvářejí tak celek více spojených kultivačních systémů.

2.1. Otevřené kultivační systémy

Do této skupiny spadá mnoho kultivačních systémů, které jsou často realizovány v poloprovozním i průmyslovém měřítku. Mezi nejvýraznější zástupce této skupiny patří traťové systémy a kaskádové systémy s tenkou stékající vrstvou.

Traťový kultivační systém

Traťový systém je nejčastěji využívaným otevřeným kultivačním systémem. Základním principem tohoto systému je cirkulující voda v oválném kanále, která obsahuje živiny a řasy. Cirkulace zpracovávaného média a jeho promíchávání je zde zajištěno pomocí oběžného kola s lopatkami. Hloubka kanálů je konstruována tak, aby docházelo k prostupu působícího světelného záření do co možná největší vrstvy zpracovávaného média a byl tak intenzifikován proces fotosyntézy. V případě, že nedochází k prozáření celé vrstvy, tak je potřeba zajistit dostatečné promíchávání. Míchání zpracovávaného média příznivě napomáhá také při využívání oxidu uhličitého, který je u těchto systémů získáván převážně z atmosféry. Aerace traťových systémů bývá zajištěna také probubláváním vrstvy proudícího média. Traťové systémy mohou pracovat kontinuálním režimem, kdy jsou voda a živiny dodávány do kanálu a vyprodukované řasy jsou odváděny ze systému pryč. Výhodou těchto systémů je možnost zpracovávání velkého množství média. S rostoucím objemem zpracovávaného média však klesá také možnost prozáření celé vrstvy a celý proces fotosyntézy je tak oslaben. U těchto systémů je komplikované řízení provozních parametrů, které mohou zapříčinit teplotní fluktuaci zpracovávaného média, usazování vyprodukovaných řas na dně kanálu, nedostatečné využívání oxidu uhličitého a neefektivní působení světelného záření. Dále může docházet ke kontaminaci zpracovávaného média z okolního prostředí [3].



Obr. 1 Traťový systém [4]



Obr. 2 Kaskádový systém [5]

Kaskádový kultivační systém

Kaskádový systém tvoří série kaskádovitých panelů, zadržovacích nádob, přepadů a systému, který zajišťuje cirkulaci zpracovávaného média. Zpracovávané médium je distribuováno rovnoměrně v tenké

vrstvě na nakloněné panely, které jsou vystaveny působení světelného záření. Tloušťka stékající vrstvy může být regulována pomocí nastavitelného přepadu, který je situován v horní části kultivačního systému. Tenká vrstva zpracovávaného média eliminuje nevýhody předešlé varianty s prozařováním celé vrstvy proudícího média. Nevýhody s možností kontaminace média však zůstávají. Nevýhodou zde však může být také výrazně menší množství zpracovávaného média při stejné zastavěné ploše jako u traťového systému [3].

2.2. Uzavřené fotobioreaktory

Za účelem odstranění nedostatků uzavřených kultivačních systému byly vyvinuty uzavřené fotobioreaktory. Hlavní výhodou těchto systémů je schopnost dosažení vyšší produktivity kultivace řas, která je zajištěna pomocí řízení provozních podmínek jako je teplota, působení oxidu uhličitého nebo pH. Dále je zde zamezeno kontaminaci zpracovávaného média z okolního prostředí a je tedy možné kultivovat také druhy řas, které jsou náročnější na okolní prostředí a jsou citlivější na provozní podmínky. Investiční náklady realizovaných uzavřených systémů jsou však v porovnání s otevřenými systémy vyšší. Také provozní náklady a náklady na údržbu zde budou výraznější než v případě otevřených systémů. Provozní náklady jsou ovlivněny hlavně systémem zajišťujícím cirkulaci zpracovávaného média v systému. Výrazný problém, s kterým se potýká většina realizovaných uzavřených fotobioreaktorů, je ulpívání řas a nečistot na transparentních plochách, což má za následek snížení efektivity procesu prozařování zpracovávaného média. V dnešní době existuje mnoho různých systémů v laboratorním, ale také v průmyslovém měřítku. Hlavními zástupci této skupiny jsou: trubkový fotobioreaktor, deskový fotobioreaktor a válcový fotobioreaktor.

Trubkový fotobioreaktor

Trubkový fotobioreaktor se skládá ze série průhledných trubek, které umožňují prozáření proudícího zpracovávaného média. Trubkové fotobioreaktory se rozlišují podle způsobu uložení trubek na horizontální, vertikální, nakloněné nebo spirální. Proudění zpracovávaného média v trubkách je zajištěno pomocí čerpadla a provzdušňovacího systému, který tak může zajišťovat intenzivnější absorpci oxidu uhličitého mezi kapalinou a aeračním plynem. Aerační plyn zajišťuje také promíchávání zpracovávaného média, které je důležité z hlediska zamezení usazování řas a intenzifikace přestupu hmoty.

Celý systém trubkového reaktoru je možné rozdělit na dvě základní sekce: provzdušňovací a ozařovaná. Provzdušňovací systém umožňuje absorpci oxidu uhličitého, a naopak zajišťuje odvod vyprodukovaného kyslíku, který doprovází proces fotosyntézy. Tato část systému se také využívá k odběru vyprodukovaných řas. Ozařovaná část fotobioreaktoru se skládá ze série průhledných trubek. Průměr trubek je obvykle volen s ohledem na působení světelného záření tak, aby docházelo k prozáření celé vrstvy proudícího média.



Obr. 3 Trubkový fotobioreaktor [6]



Obr. 4 Deskový fotobioreaktor [7]

Deskový fotobioreaktor

Fotobioreaktory jsou tvořeny průhlednými deskami, které umožňují působení ozařování zpracovávaného média. Proudění média v tenké vrstvě mezi dvěma deskami umožňuje prozáření celé vrstvy, což výrazně ovlivňuje proces fotosyntézy. Promíchávání proudícího média je často zajištěné pomocí aeračního systému, který je umístěn ve spodní části deskového fotobioreaktoru. Médium je cirkulováno pomocí čerpadla a vyprodukované řasy jsou následně odváděny do zadržovací nádoby. Většina stávajících konfigurací rozděluje systém do dvou částí podobně jako u trubkového fotobioreaktoru. Zpracovávané médium je tak provzdušňováno v sekci oddělené od ozařovaných desek.

Válcový fotobioreaktor

Řasy jsou kultivovány v průhledných válcových nádobách, které jsou z vnějšku ozařovány (obr. 5). Objevují se však varianty, kde je využíváno také vnitřního umělého prozařování. Oxid uhličitý je řasám dodáván pomocí aeračního systému, který je umístěn ve spodní části válcových nádob. Nevýhodou těchto fotobioreaktorů je nízká efektivita působení světelného záření. Aby bylo možné prozářit celý zpracovávaný objem média, tak je potřeba zajistit jeho promíchávání. K promíchání je možné využít mechanického nebo pneumatického způsobu míchání (aerace oxidu uhličitého). V případě mechanického míchání je však potřeba volit typ míchadla, které nebude narušovat strukturu řas. Hlavní výhody a nevýhody jednotlivých kultivačních systémů jsou popsány v tab. 1.



Obr. 5 Válcový fotobioreaktor [8]

	Výhody	Nevýhody
Trašový systém	<ul style="list-style-type: none"> • Velké množství zpracovávaného média 	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentace řas v kanále • Neefektivní prozáření média • Možnost kontaminace média • Malá ozářená plocha
Kaskádový systém	<ul style="list-style-type: none"> • Prozáření celého objemu média 	<ul style="list-style-type: none"> • Malé množství zpracovávaného média • Možnost kontaminace média • Malá ozářená plocha
Trubkový fotobioreaktor	<ul style="list-style-type: none"> • Prozáření celého objemu média • Zamezení kontaminace média • Velká ozářená plocha 	<ul style="list-style-type: none"> • Znečištění transparentních ploch
Deskový fotobioreaktor	<ul style="list-style-type: none"> • Velké množství zpracovávaného média • Prozáření celého objemu média • Zamezení kontaminace média • Velká ozářená plocha 	<ul style="list-style-type: none"> • Znečištění transparentních ploch
Válcový fotobioreaktor	<ul style="list-style-type: none"> • Velké množství zpracovávaného média • Zamezení kontaminace média • Velká ozářená plocha 	<ul style="list-style-type: none"> • Neefektivní prozáření média • Sedimentace řas • Znečištění transparentních ploch

Tabulka 1 Výhody a nevýhody konstrukčních variant kultivačních systémů

3. Konstrukční a provozní parametry

Aby byly systémy pro kultivaci řas schopny dosáhnout průmyslového měřítka, je potřeba, aby byly v první řadě schopny konkurovat systémům produkujícím a zpracovávajícím biomasu první a druhé generace. Jak již bylo zmíněno v úvodu, nevýhodou biomasy první generace je její závislost na množství orné půdy a v případě druhé generace je nevýhodou nízká konverze. U biomasy z řas je tedy cílem dosáhnout vysoké produkce řas na malé zastavěné ploše. Další výhodou kultivačních systémů je schopnost využívání oxidu uhličitého. Vyšší účinnost fotosyntézy tak umožňuje použití kultivačních systémů vedle průmyslových provozů, které produkují velké množství oxidu uhličitého.

Objem zpracovávaného média

Pro konstrukční varianty kultivačních systémů, které byly popsány v odstavci 2.1 a 2.2, byly napočítány teoretické objemy zpracovávaného média na jednotku zastavěné plochy. Při uvažování realizace systémů v průmyslovém měřítku byla zastavěná plocha zvolena 1 hektar. Následně byly pro jednotlivé konstrukční varianty zvoleny základní konstrukční parametry, které umožňují výpočet objemu zpracovávaného média. V případě trašového kultivačního systému (obr. 1) byla volena výška hladiny 0,25 m. Z principu konstrukce tohoto systému je možné při správném konstrukčním uspořádání využít téměř celé zastavěné plochy. Pro teoretický výpočet je možné velikost nezastavěné plochy zanedbat. Ozářená plocha kultivačního systému je v tomto případě rovna velikosti zastavěné plochy. Objem zpracovávaného média je 2 500 m³.

V případě kaskádového systému (obr. 2) je možné dosáhnout srovnatelné ozářené plochy. Využití zastavěného prostoru je zde v podstatě maximální. Při uvažování sklonu desek je možné dosáhnout větší ozářené plochy systému než je zastavěná plocha. Pro teoretický výpočet je sklon desek zanedbán a ozářená plocha je srovnatelná jako v případě trašového systému. Objem zpracovávaného média je však výrazně nižší. V případě kaskádového systému byla zvolena výška hladiny tenké stékající vrstvy 25 mm. Objem zpracovávaného média je tak na 1 ha zastavěné plochy 250 m³.

Pro konstrukci trubkového fotobioreaktoru (obr. 3) byly uvažováno použití trubek o vnějším průměru 50 mm a tloušťce stěny 3 mm. Rozteč trubek v jedné horizontální řadě byl zvolen 60 mm a rozteč

jednotlivých řad je 1 m. Aby nedocházelo k vzájemnému stínění jednotlivých řad, tak je výška jedné řady 1,98 m. Při výpočtu nejsou uvažovány tvarovky spojující horizontální řady trubek. Objem zpracovávaného média na zastavěné ploše 1 ha je 502 m³ a ozářená plocha fotobioreaktoru je 51 836 m².

Výška deskového fotobioreaktoru (obr. 4) a rozteč rovnoběžných řad desek byla zvolena stejná jako u trubkového fotobioreaktoru. Vnitřní rozteč rovnoběžných desek, která určuje hloubku proudícího média, byla zvolena 50 mm. Pro zvolené konstrukční parametry je objem zpracovávaného média na 1 ha zastavěné plochy 990 m³ a ozářená plocha fotobioreaktoru je 39 600 m².

Válcový fotobioreaktor (obr. 5) je tvořen válci o vnějším průměru 0,28 m a tloušťce stěny 10 mm. Výška válců a rozteč rovnoběžných řad je zvolena srovnatelně s deskovým a trubkovým fotobioreaktorem. Rozteč válců v jedné řadě je 500 mm. Pro zvolené konstrukční parametry je objem zpracovávaného média 2 103 m³ a ozářená plocha fotobioreaktoru je 34 834 m². Celkové porovnání základních konstrukčních parametrů jednotlivých kultivačních systémů je zobrazeno v tab. 2.

	Traťový systém	Kaskádový systém	Trubkový fotobioreaktor	Deskový fotobioreaktor	Válcový fotobioreaktor
$V_{PBR} [m^3]$	2 500	250	502	990	2 103
$S_{PBR} [m^2]$	10 000	10 000	51 836	39 600	34 834

Tabulka 2 Základní konstrukční parametry kultivačních systémů na 1 ha zastavěné plochy.

V_{PBR} – objem zpracovávaného média, S_{PBR} – ozářená plocha kultivačního systému

Z porovnání je zřejmé, že traťový systém a válcový fotobioreaktor pracuje s výrazně vyšším objemem zpracovávaného média. V případě uzavřených systémů je také zřetelné využití větší ozářené plochy než u systémů otevřených. Největší ozářené plochy je dosaženo v trubkovém fotobioreaktoru.

Produkce řas

Pro srovnání konstrukčních a provozních parametrů kultivačních systémů je zvolena stejná teoretická produkce řas. Z literatury je známo, že ve všech zmíněných systémech je možné dosáhnout produkce 1 gram řas na litr zpracovávaného média a den. Produktivita kultivačního systému je ale výrazně ovlivněna možností prozařování celého objemu zpracovávaného média. Hloubka prozáření zpracovávaného média pomocí slunečního záření je maximálně 5 cm [9]. Důležitým provozním parametrem je schopnost kontinuálního promíchávání zpracovávaného média v průběhu kultivace. Je potřeba zajistit dostatečné promíchávání v celém objemu kultivačního systému tak, aby bylo možné prozářit celý objem média. Pro porovnání teoretické výtěžnosti řas kultivačních systémů byl určen objem systému, který je neustále prozařován. Porovnání jednotlivých systémů je zobrazeno v tab. 3.

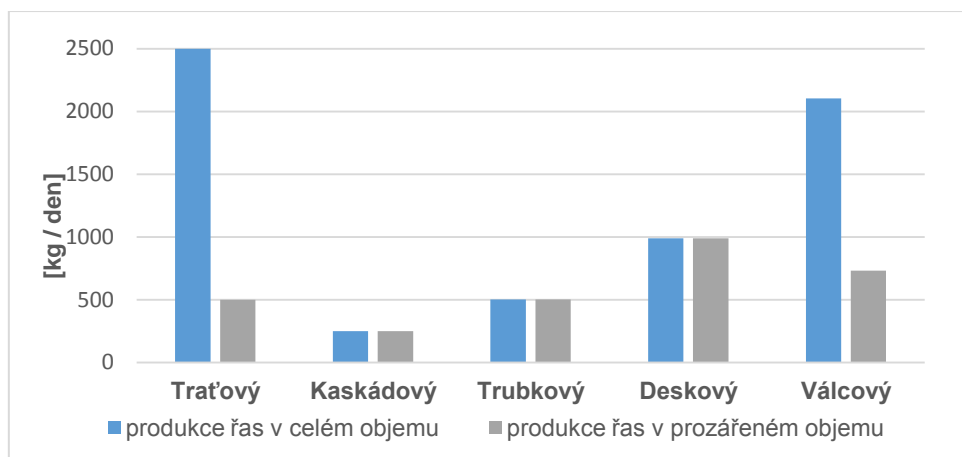
	Traťový systém	Kaskádový systém	Trubkový fotobioreaktor	Deskový fotobioreaktor	Válcový fotobioreaktor
$V_{light} [m^3]$	500	250	502	990	731
$\frac{V_{light}}{V_{PBR}} [\%]$	20	100	100	100	34,8
$P [kg/den]$	2 500	250	502	990	2 103
$P_{light} [kg/den]$	500	250	502	990	731

Tabulka 3 Porovnání teoretické výtěžnosti kultivačních systémů na 1 ha zastavěné plochy.

V_{light} – prozářený objem zpracovávaného média, P – teoretická produkce řas v celém objemu

kultivačního systému, P_{light} – teoretická produkce řas v prozářeném objemu kultivačního systému

Z poměru prozářeného objemu a celkového objemu kultivačního systému je zřejmé, že u traťového a válcového fotobioreaktoru dochází k prozáření výrazně menšího množství zpracovávaného média, což bude mít vliv na celkovou produkci řas. V případě uvažování teoretické produkce řas pouze v ozářeném objemu dosahuje deskový fotobioreaktor nejvyšší produktivity řas na 1 ha zastavěné plochy. Poměr produktivit jednotlivých fotobioreaktorů je graficky znázorněn na obr. 6.



Obr. 6 Teoretická produkce řas na 1 ha zastavěné plochy

4. Využití oxidu uhličitého

U systémů pro kultivaci řas lze využití oxidu uhličitého rozdělit na dva základní procesy. Část oxidu uhličitého se rozpouští ve zpracovávaném médiu a část se zachytává přímo v řasách.

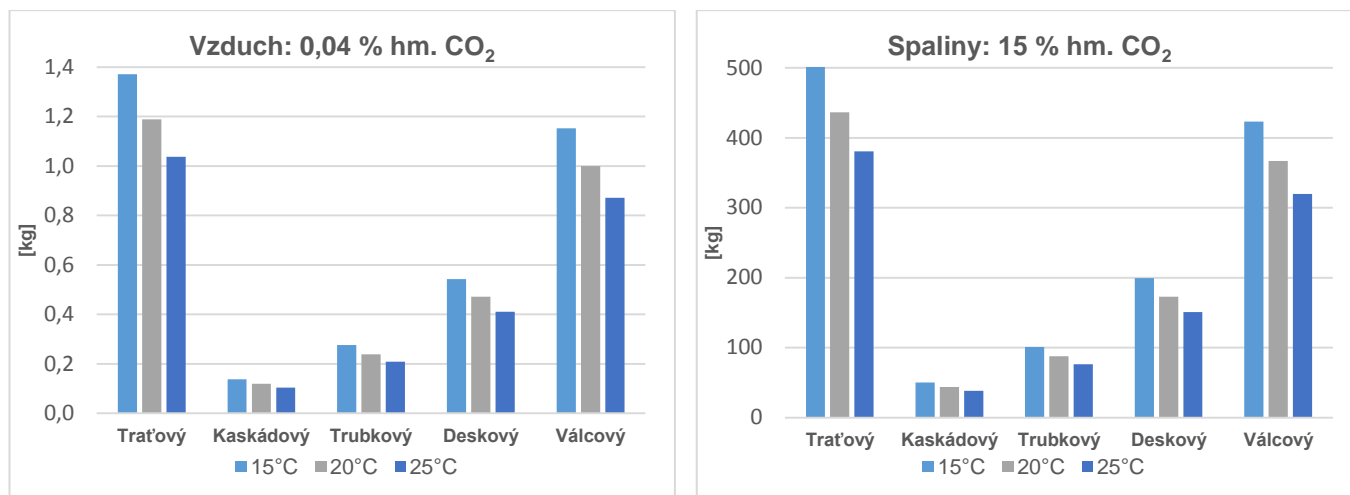
Absorpce oxidu uhličitého

Rozpustnost plynu v kapalině obecně udává rovnovážnou koncentraci plynné složky v kapalně fázi o daném složení za dané teploty a tlaku. Z Henryho zákona vyplývá, že při konstantní teplotě je rozpustnost plynu přímo úměrná parciálnímu tlaku tohoto plynu nad kapalinou

$$p_i = H_i \cdot x_i \quad (1)$$

kde p_i je parciální tlak složky i v plynné fázi, H_i – Henryho konstanta a x_i je molová koncentrace složky i v kapalně fázi.

Při určení teoretického absorbovaného množství CO_2 v kultivačních systémech bylo uvažováno, že je každý systém provzdušňován aeračním plynem. Složením aeračního plynu by měly být simulovány podmínky využitelné v průmyslovém měřítku. Výpočet absorbovaného množství je proveden pro dvě různé koncentrace CO_2 v aeračním plynu. První výpočet byl proveden pro koncentraci 0,04 % hm. CO_2 , který simuluje využití vzduchu jako aeračního plynu. Další výpočet simuluje využití spalin o koncentraci CO_2 15 % hm. Působení světelného záření a vliv okolního prostředí na kultivační systémy bude ovlivňovat také teplotu zpracovávaného média. Změna teploty je zahrnuta také do výpočtu absorpce CO_2 . Celý výpočet je proveden pro použití systémů při atmosférickém tlaku a jako zpracovávané médium je uvažována čistá voda. Výsledky výpočtu rozpustnosti CO_2 ve vodě pro uvedené podmínky je zobrazena na obr. 7.



Obr. 7 Množství rozpuštěného oxidu uhličitého ve zpracovávaném médiu v kultivačním systému na 1 ha zastavěné plochy

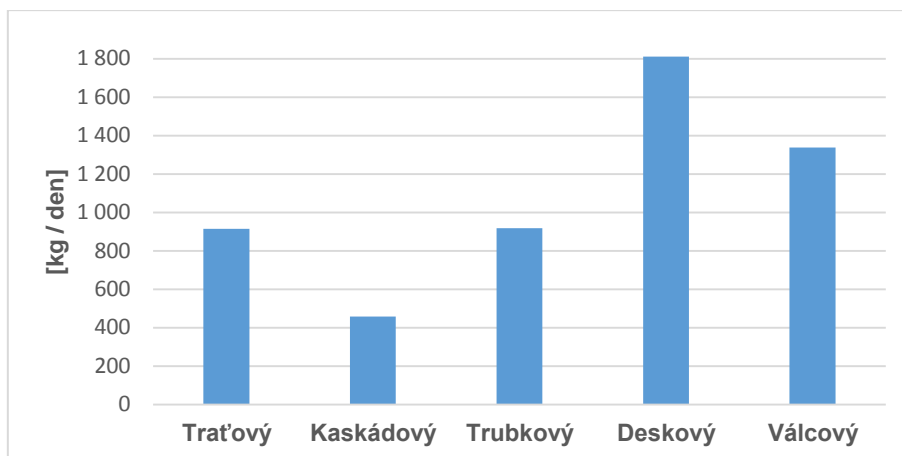
Rozpuštěný oxid uhličitý mohou využívat řasy ke svému růstu. Část rozpuštěného CO₂ odchází ve zpracovávaném médiu společně s vytěženými řasami a v závislosti na podmínkách okolního prostředí následně dochází k jeho částečné desorpci. K rozpuštění dalšího CO₂ pak dochází při doplnění kultivačního systému čerstvým médiem. Množství rozpuštěného CO₂ tak zůstává v kultivačním systému téměř na konstantní hodnotě a mění se v podstatě pouze při změně okolních podmínek. K nejvyšším hodnotám rozpustnosti CO₂ ve zpracovávaném médiu se dosahuje u traťových a válcových systémů. S klesající teplotou média roste rozpustnost CO₂. Vhodné tepelné podmínky pro kultivaci jsou závislé na druhu kultivovaných řas, a tak je potřeba volit odpovídající druh podle prostředí, v kterém je systém provozován. Nejčastěji kultivované řasy jsou *Chlorella vulgaris*, které jsou schopny růst v poměrně širokém rozmezí teplot od 15 až do 45 °C [10].

Zachytávání oxidu uhličitého v řasách

Řasy jsou tvořeny převážně z uhlíku, který je získáván z oxidu uhličitého [11]. Jeden mol CO₂ má hmotnost 44 gramů a z toho je 12 gramů tvořeno uhlíkem. Sušina řas je téměř z 50 % celkové hmotnosti tvořena uhlíkem [12]. Teoretická spotřeba oxidu uhličitého na vyprodukování 1 gramu řas může být určena podle následujícího vztahu

$$\frac{44 \text{ g/mol}_{\text{CO}_2}}{12 \text{ g/mol}_{\text{uhlík}}} \cdot \frac{0,5 \text{ g}_{\text{uhlík}}}{1 \text{ g}_{\text{řas}}} = 1,83 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{g}_{\text{řas}} \quad (2)$$

Pro porovnání množství zachyceného oxidu uhličitého v jednotlivých kultivačních systémech byl výpočet vztažen k produkci řas v prozářeném objemu zpracovávaného média. Porovnání je graficky zobrazeno v obr. 8.



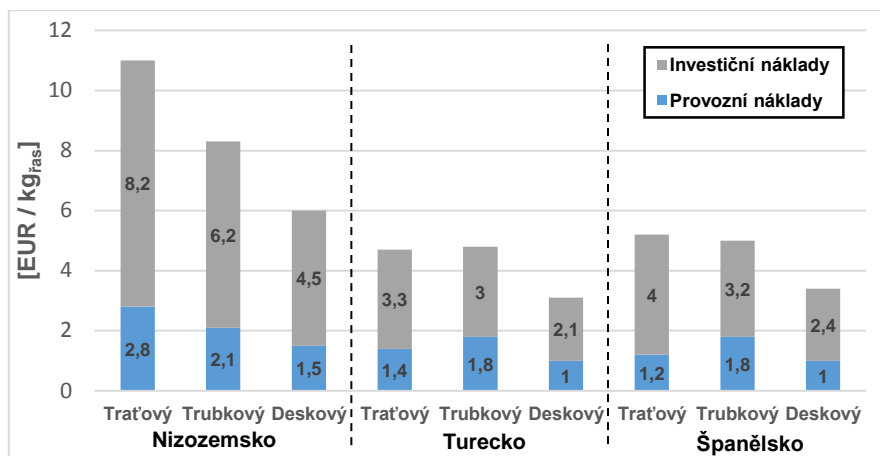
Obr. 8 Množství zachyceného oxidu uhličitého v řasách na 1 ha zastavěné plochy

Z porovnání teoretické spotřeby oxidu uhličitého v kultivačních systémech vychází nejefektivněji deskový fotobioreaktor, který je schopen za určitých provozních podmínek absorbovat a zachytit až přes 2 tuny oxidu uhličitého za jeden den na 1 ha zastavěné plochy. Naopak nejméně efektivní je kaskádový systém.

5. Ekonomické zhodnocení konstrukčních variant

Při hodnocení možnosti realizace kultivačních systémů je důležité také ekonomické hledisko. Obecně lze toto hledisko rozdělit na investiční náklady a na náklady, které jsou spojeny se samotným provozem systému. Traťové systémy, které jsou již realizovány v průmyslovém měřítku, často využívají starší zásobníky vody, které dříve sloužily potřebám průmyslových závodů nebo čistíren odpadních vod. Samotná konstrukce je pak tvořena pouze několika oběžnými koly a systémy zajišťující proudění zpracovávaného média. Provozní a investiční náklady budou tedy u traťových systémů nejnižší. Vyšších nákladů je však dosahováno u kaskádových systémů. Konstrukce je tvořena převážně z ocelových plechů, které jsou svařeny dohromady a tvoří tak kaskádovou trať. Čerpadla distribuují zpracovávané médium k přepadům v horní části kultivačních systémů. V závislosti na výšce vrstvy stékajícího média je potřeba zajistit dostatečný průtok, což bude výrazně ovlivňovat provozní a investiční náklady. Uzavřené fotobioreaktory vyžadují velké množství transparentních součástí, které jsou většinou z plastu nebo skla. Tyto součásti jsou dále doplňovány tvarovkami a strojními prvky, které jsou potřeba pro správné spojení a utěsnění jednotlivých součástí. Čerpadla a aerační systémy dále navyšují investiční a provozní náklady. Při pohledu na konstrukce otevřených a uzavřených systémů se investiční náklady jeví výrazně vyšší pro případ uzavřených fotobioreaktorů. Jejich konstrukce je komplikovanější a strukturovanější. Také provozní náklady budou mít výraznější vliv na celkové ekonomické zhodnocení variant.

Důležitým parametrem ekonomického zhodnocení konstrukčních variant je také produktivita řas, kterých jsou tyto varianty schopny dosáhnout. V uzavřených fotobioreaktorech je možné dosáhnout více jak dvojnásobné produkce řas než u otevřených systémů [13], což je patrné z porovnání teoretických výtěžností zobrazených v tab. 3 a obr. 6. Produktivita řas se tedy výrazně promítne do celkového ekonomického zhodnocení jednotlivých konstrukčních variant kultivačních systémů. Porovnání tří základních konstrukčních variant je graficky zobrazeno v obr. 9. Z porovnání je zřejmé, že u deskových fotobioreaktorů bylo dosaženo ve všech lokalitách nejnižších nákladů vztahených na kilogram vyprodukovaných řas. Naopak u traťových systémů náklady výrazně vzrostly.



Obr. 9 Investiční a provozní náklady kultivačních systémů vztážené na kilogram vyprodukovaných řas [13]

Z porovnání teoretické produkce řas v prozářeném objemu kultivačních systémů, které je zobrazené v tab. 2, vychází nejefektivněji deskový fotobioreaktor. Pro přímé porovnání nákladů kultivačních systémů popsaných v kapitole 3 je tedy možné použít teoretické produkce řas deskového fotobioreaktoru: 990 kg/den. Pro zvolenou produkci řas byla vypočítána zastavěná plocha S_{area} zbývajících kultivačních systémů, která by byla potřeba k dosažení srovnatelné teoretické produkce. Porovnání investičních a provozních nákladů pro realizaci v různých lokalitách a pro zvolenou produkci řas je zobrazeno v tab. 4. Zastavěná plocha potřebná pro dosažení srovnatelné produktivity řas u traťového systému a trubkového fotobioreaktoru je téměř dvojnásobná v porovnání s deskovým fotobioreaktorem.

	Nizozemsko		Turecko		Španělsko		S_{area} [ha]
	PN [EUR]	IN [EUR]	PN [EUR]	IN [EUR]	PN [EUR]	IN [EUR]	
Traťový	2 772	8 118	1 386	3 267	1 188	3 960	1,98
Trubkový	2 079	6 138	1 782	2 970	1 782	3 168	1,97
Deskový	1 485	4 455	990	2 079	990	2 376	1,00

Tabulka 4 Porovnání nákladů a potřebné zastavěné plochy pro zvolenou produkci řas: 990 kg/den, PN – provozní náklady, IN – investiční náklady

6. Závěr

Cílem tohoto článku bylo popsání možností realizace kultivačních systémů v průmyslovém měřítku. V první části je zpracován přehled a kritická analýza konstrukčních variant, které se v dnešní době nejvíce vyskytují.

Pro zvolenou zastavěnou plochu kultivačních systémů byly určeny základní konstrukční a provozní parametry, na základě kterých bylo vypracováno porovnání. Obecně lze u traťového systému a válcového fotobioreaktoru zpracovávat největší množství média. Na srovnatelné zastavěné ploše lze však u uzavřených fotobioreaktoru pracovat s výrazně větší ozářenou plochou systémů. Pro zvolenou produkci řas byla určena teoretická produkce v závislosti na množství zpracovávaného média a v závislosti na množství média, které je v systému prozařováno. Z poměru prozářeného objemu a celkového objemu kultivačního systému je zřejmé, že u traťového a válcového fotobioreaktoru dochází k prozáření výrazně menšího množství zpracovávaného média, což bude mít vliv na celkovou produkci

řas. V případě uvažování teoretické produkce řas pouze v ozářeném objemu dosahuje deskový fotobioreaktor nejvyšší produktivity řas. Výhody a nevýhody jednotlivých konstrukčních variant je zobrazeno v tab. 4.

Dále byla popsána spotřeba oxidu uhličitého v kultivačních systémech. Samotná spotřeba byla rozdělena na proces absorpce ve zpracovávaném médiu a na proces zachytávání v řasách. K nejvyšším hodnotám rozpustnosti oxidu uhličitého ve zpracovávaném médiu se dosahuje v systémech pracujících s největším objemem média: traťový a válcový systém. Celý výpočet byl proveden pro dva zdroje oxidu uhličitého, které mohou být využity v kultivačních systémech: vzduch a spaliny z průmyslového provozu. Pro porovnání množství zachyceného oxidu uhličitého v jednotlivých kultivačních systémech byl výpočet vztažen k produkci řas v prozářeném objemu zpracovávaného média. Z porovnání teoretické spotřeby oxidu uhličitého v kultivačních systémech vychází nejefektivněji deskový fotobioreaktor. Naopak nejméně efektivní je kaskádový systém.

V rámci ekonomického zhodnocení konstrukčních variant kultivačních systémů byly popsány základní parametry, které budou nejvíce ovlivňovat investiční a provozní náklady. Investiční náklady jsou u otevřených kultivačních systémů nižší než v případě uzavřených systémů. U traťových systémů jsou nižší také provozní náklady, neboť není potřeba využívat zařízení přečerpávající zpracovávané médium. Provozní náklady otevřených systémů však mohou být výrazně ovlivněny požadavky na údržbu, které jsou spojeny s možností kontaminace zpracovávaného média z okolního prostředí. Investiční a provozní náklady uzavřených systémů jsou ovlivněny množstvím transparentních součástí a zařízeními, které zajišťují proudění média. Také v případě uzavřených systémů je nutné uvažovat značné požadavky na údržbu, které zahrnují hlavně čištění transparentních ploch. Důležitým parametrem ekonomického zhodnocení konstrukčních variant je také produktivita řas, kterých jsou systémy schopny dosáhnout. Při uvažování produktivity řas, která může být více jak dvojnásobná u otevřených systémů, se z ekonomického hlediska výrazně mění efektivita jednotlivých kultivačních systémů. V závislosti na teoretické produkci řas byly zpracovány náklady tří základních variant systémů, které jsou nejčastěji realizovány v průmyslovém měřítku. Nejnižších nákladů lze dosáhnout u deskových fotobioreaktorů, zatímco u traťových systémů náklady v závislosti na produkci řas výrazně vzrostly.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/149.

Seznam symbolů

p_i	parciální tlak složky i v plynné fázi	[Pa]
P_{light}	teoretická produkce řas v prozářeném objemu kultivačního systému	[kg. den ⁻¹]
S_{area}	zastavěná plocha systému	[ha]
S_{PBR}	ozářená plocha kultivačního systému	[m ²]
V_{light}	prozářený objem zpracovávaného média	[m ³]
V_{PBR}	objem zpracovávaného média	[m ³]
x_i	molová koncentrace složky i v kapalně fázi	[-]
IN	investiční náklady	[EUR]
P	teoretická produkce řas v celém objemu kultivačního systému	[kg. den ⁻¹]
PN	provozní náklady	[EUR]

Seznam použité literatury

- [1] Milano, Jassinnee, Hwai Chyuan Ong, H.H. Masjuki, W.T. Chong, Man Kee Lam, Ping Kwan Loh, and Viknes Vellayan. 2016. "Microalgae Biofuels as an Alternative to Fossil Fuel for Power Generation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58. Elsevier: 180–97. doi:10.1016/j.rser.2015.12.150.
- [2] Brennan, Liam, and Philip Owende. 2010. "Biofuels from Microalgae-A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co- Products." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2): 557–77. doi:10.1016/j.rser.2009.10.009.
- [3] Bělohlay, Vojtěch, "Design of pilot-plant effective photobioreactors". Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2016
- [4] Matamoros, Víctor, Raquel Gutiérrez, Ivett Ferrer, Joan García, and Josep M Bayona. 2015. "Capability of Microalgae-Based Wastewater Treatment Systems to Remove Emerging Organic Contaminants : A Pilot-Scale Study." *Journal of Hazardous Materials* 288. Elsevier B.V.: 34–42. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.02.002.
- [5] Detail instalovaného fotobioreaktoru v ZD Dublovice [online] Biom.cz [vid. 26.1.2017]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/obrazek/obr-detail-instalovaneho-fotobioreaktoru-v-zd-dublovice>
- [6] Hernández-Calderón, Oscar Martín, José María Ponce-Ortega, Jesús Raúl Ortiz del Castillo, Maritza E. Cervantes Gaxiola, Jorge Milán-Carrillo, Medardo Serna González, and Eusiel Rubio Castro. 2016. "Optimal Design of Distributed Algae-Based Biorefineries Using CO₂ Emissions from Multiple Industrial Plants." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, acs.iecr.5b01684. doi:10.1021/acs.iecr.5b01684.
- [7] Sforza, Eleonora, Mattia Enzo, and Alberto Bertucco. 2014. "Design of Microalgal Biomass Production in a Continuous Photobioreactor: An Integrated Experimental and Modeling Approach." *Chemical Engineering Research and Design* 92 (6). Institution of Chemical Engineers: 1153–62. doi:10.1016/j.cherd.2013.08.017.
- [8] Control of CO₂ input conditions during outdoor culture of *Chlorella vulgaris* in bubble column photobioreactor [online] Oilgae [vid. 26.1.2017]. Dostupné z: <http://www.oilgae.com/blog/2015/03/control-of-co2-input-conditions-during-outdoor-culture-of-chlorella-vulgaris-in-bubble-column-photobioreactors.html>
- [9] Huang, J., Li, Y., Wan, M., Yan, Y., Feng, F., Qu, X., ... Wang, W. (2014). Bioresource Technology Novel flat-plate photobioreactors for microalgae cultivation with special mixers to promote mixing along the light gradient. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 159, 8–16.
- [10] Masojídek, J. 2014. "Mass Cultivation of Freshwater Microalgae." *Earth Systems and Environmental Sciences*, no. June: 1–13. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.09373-8.
- [11] Mohsenpour, S. F., & Willoughby, N. (2016). Effect of CO₂ aeration on cultivation of microalgae in luminescent photobioreactors. *Biomass and Bioenergy*, 85, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.002>
- [12] Novoveská, L., Zapata, A. K. M., Zabolotney, J. B., Atwood, M. C., & Sundstrom, E. R. (2016). Optimizing microalgae cultivation and wastewater treatment in large-scale offshore photobioreactors. *Algal Research*, 18, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.033>
- [13] Ruiz, J., Olivieri, G., de Vree, J., Bosma, R., Willems, P., Reith, J. H., ... Fu, P. (2016). Towards industrial products from microalgae. *Energy Environ. Sci.*, 24, 405–413. <https://doi.org/10.1039/C6EE01493C>