

## MOŽNOSTI REALIZACE FOTOBIOREAKTORŮ V PRŮMYSLOVÉM MĚŘÍTKU

**VOJTĚCH BĚLOHLAV, TOMÁŠ JIROUT  
a LUKÁŠ KRÁTKÝ**

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

Došlo 11.5.17, přepracováno 20.10.17, přijato 27.11.17.

Klíčová slova: kultivace řas, fotobioreaktor, řasy, biomasa, biopaliva

### Obsah

1. Úvod
2. Základní typy fotobioreaktorů
  - 2.1. Otevřené kultivační systémy
  - 2.2. Uzavřené fotobioreaktory
3. Kultivace řas v průmyslovém měřítku
  - 3.1. Objem kultivačního média
  - 3.2. Produkce řas
  - 3.3. Využití oxidu uhličitého
  - 3.4. Ekonomické zhodnocení konstrukčních variant
4. Závěr

### 1. Úvod

Řasy jsou označovány jako biomasa třetí generace a její potenciál spočívá ve výrobě biopaliv, potravin, krmiva nebo chemických produktů. Pro produkci řas se používají v dnešní době různé konstrukční varianty kultivačních systémů. Jejich vzájemné porovnání je však velmi komplikované, neboť samotný proces kultivace je ovlivňován širokým spektrem konstrukčních a provozních parametrů.

Řasy patří mezi nižší vodní organismy, které jsou schopny pomocí procesu fotosyntézy, stejně jako rostliny, přeměňovat světelné záření, oxid uhličitý, vodu a živiny na biomasu. Běžné fotosyntetické organismy dokáží při produkci jednoho kilogramu kyslíku spotřebovat přibližně 0,77 kg oxidu uhličitého<sup>1</sup>. Řasy však mohou spotřebovat až 1,83 kg oxidu uhličitého a dále dosahují vyšší účinnosti fotosyntézy než ostatní rostliny, což může vést až k téměř trojnásobné spotřebě oxidu uhličitého při produkci 1 kg řas. Dalším specifickým je také vysoká rychlost jejich produkce a schopnost růstu v různých podmínkách, kde se vyskytují pouze základní živiny<sup>1</sup>. Je odhadováno, že na

celém světě jsou řasy zastoupeny více jak 50 000 druhy, které jsou schopny růst v nejrůznějších podmínkách životního prostředí. Efektivní růst řas a následná produkce biomasy jsou ovlivněny řadou faktorů jako je světlo, množství kyslíku, živiny, pH, oxid uhličitý a teplota. Vliv těchto faktorů se liší podle jednotlivých druhů řas, některé řasy vyžadují pro růst intenzivnější ozařování, zatímco další mohou být příliš intenzivním světlem ve svém růstu omezovány. Z tohoto důvodu musí být k produkci vybírán druh řas s ohledem na plánované provozní a konstrukční podmínky kultivačního systému, které jsou spojeny hlavně s prostředím, kde je systém instalován.

Obecně lze řasy rozdělit do tří základních skupin podle typu jejich životního cyklu na: autotrofní, heterotrofní a mixotrofní. Pro produkci biopaliv z řas se autotrofní produkce v současnosti jeví jako jediná použitelná varianta z hlediska technického a ekonomického<sup>2</sup>.

### 2. Základní typy fotobioreaktorů

Řasy mohou být kultivovány v různých vodních systémech. Autotrofní kultivační systémy tvoří tři základní skupiny: otevřené kultivační systémy, uzavřené fotobioreaktory a hybridní fotobioreaktory. Hybridní fotobioreaktory kombinují předchozí varianty a vytvářejí tak celek více spojených kultivačních systémů. V literatuře<sup>14–16</sup> jsou popsány výhody a nevýhody jednotlivých kultivačních systémů pro produkci řas. Mnoho prací se zaměřuje nejenom na samotnou kultivaci, ale také na konstrukci těchto systémů. Přehled základních typů kultivačních systémů se v této práci zaměřuje na zařízení, která jsou perspektivní pro použití v průmyslovém měřítku a na vhodnost jejich využití.

#### 2.1. Otevřené kultivační systémy

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

##### *Otevřené nádrže*

Systém s otevřenými nádržemi je nejčastěji využívaným otevřeným kultivačním systémem, který je tvořen horizontálními koryty a oběžným kolem. Základním principem systému je cirkulující voda v oválném kanále, která obsahuje živiny a řasy (obr. 1). Cirkulace kultivačního média a jeho promíchávání je zde zajištěno oběžným kolem s lopatkami. Hloubka kanálů je konstruována tak, aby docházelo k prostupu působícího světelného záření do co

Obr. 1. Otevřené nádrže<sup>4</sup>

možná největší vrstvy kultivačního média a byl tak intenzifikován proces fotosyntézy. V případě, že nedochází k prozáření celé vrstvy, je potřeba zajistit dostatečné promíchávání. Míchání kultivačního média příznivě napomáhá také při využívání oxidu uhličitého, který je u těchto systémů získáván obvykle z atmosféry. Aerace traťových systémů bývá někdy podporována probubláváním vrstvy proudícího média.

Traťové systémy mohou pracovat v kontinuálním režimu, kdy jsou voda a živiny průběžně dodávány do kanálu a vyprodukované řasy jsou ze systému odváděny. Výhodou tohoto uspořádání je možnost zpracovávat velké množství média. S rostoucím objemem kultivačního média však klesá možnost prozáření celé vrstvy a celý proces fotosyntézy je tak oslaben. U těchto systémů je komplikované řízení provozních parametrů, které mohou způsobit usazování vyprodukovaných řas na dně kanálu, nedostatečné využívání oxidu uhličitého a nedostatečné prozáření vrstvy kultivačního média v kanálu. Nedostatečné promíchávání kultivačního média může být důvodem teplotní fluktuační kultivačního média. Otevřené nádrže jsou tepelně regulovány odparem z hladiny nádrže. V tomto uspořádání může docházet ke kontaminaci kultivačního média z okolního prostředí<sup>3</sup>.

#### *Kaskádový kultivační systém*

Kaskádový systém tvoří série kaskádově zapojených panelů, zadržovací nádob, přepad a zařízení, které zajišťuje cirkulaci kultivačního média (obr. 2). Kultivační médium je distribuováno rovnoměrně v tenké vrstvě na nakloněné panely, které jsou vystaveny působení světelného záření. Tloušťka stékající vrstvy může být regulována nastavitelným přepadem, který je situován v horní části kultivačního systému. Tenká vrstva kultivačního média eliminuje nevýhody předešlé varianty prozařování celé vrstvy proudícího média. Možnosti kontaminace média však podobně jako u otevřeného korytového kultivačního systému zůstávají. Budeme-li v obou zmíněných systémech uvažovat srovnatelnou referenční produkci řas vztahenou na objem kultivačního média, tak v případě kaskádového systému bude výraznou nevýhodou nižší množství kultivačního média v systému na stejné zastavěné ploše jako u otevřeného korytového systému<sup>3</sup>.

Obr. 2. Kaskádový systém<sup>5</sup>

## 2.2. Uzavřené fotobioreaktory

Za účelem odstranění nedostatků uzavřených kultivačních systémů byly vyvinuty uzavřené fotobioreaktory. Jejich hlavní výhodou je schopnost dosažení vyšší produktivity kultivace řas, která je zajištěna řízením provozních podmínek jako je teplota, působení oxidu uhličitého nebo pH. K řízení provozních podmínek se převážně využívá vnějších zařízení, která doplňují samotný kultivační systém. Pro tyto účely je možné využít například zadržovacích nádob, které jsou svou konstrukcí přizpůsobeny tak, aby bylo možné vhodně upravovat provozní podmínky. Dále je zde zamezeno kontaminaci kultivačního média z okolního prostředí a je tedy možné kultivovat také druhy řas, které jsou citlivější na okolní prostředí a na provozní podmínky<sup>13</sup>.

Investiční náklady realizovaných uzavřených systémů jsou však v porovnání s otevřenými systémy vyšší. Také provozní náklady a náklady na údržbu zde budou výrazně vyšší než v případě otevřených systémů, neboť provozní náklady jsou ovlivněny hlavně systémem zajišťujícím cirkulaci kultivačního média v systému. Výrazným nedostatkem většiny realizovaných uzavřených fotobioreaktorů je ulpívání řas a nečistot na transparentních plochách, což má za následek snížení efektivity procesu prozařování kultivačního média. Existuje mnoho systémů tohoto typu v laboratorním, ale i v průmyslovém měřítku. Hlavními zástupci této skupiny jsou trubkový fotobioreaktor, deskový fotobioreaktor a válcový fotobioreaktor.

#### *Trubkový fotobioreaktor*

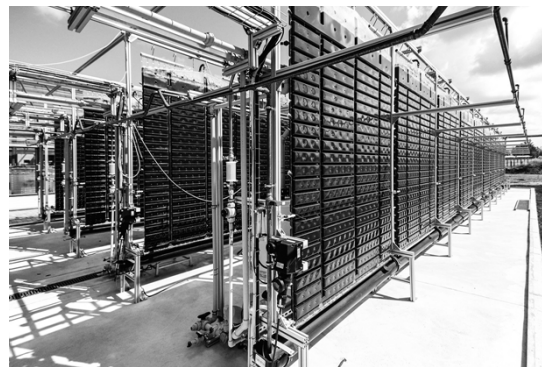
Trubkový fotobioreaktor se skládá ze série průhledných trubek, které umožňují prozáření proudícího kultivačního média (obr. 3). Trubkové fotobioreaktory se rozlišují podle způsobu uložení trubek na horizontální, vertikální, nakloněné nebo spirální. Proudění kultivačního média v trubkách je zajištěno čerpadlem a aeračním systémem, který umožňuje intenzivnější přestup oxidu uhličitého do kultivačního média. Aerační plyn zajišťuje také promíchávání kultivačního média, které je důležité z hlediska zamezení usazování řas.

Obr. 3. Trubkový fotobioreaktor<sup>6</sup>

Celý systém trubkového reaktoru je možné rozdělit na dvě základní sekce: provzdušňovací a ozařovanou. Provzdušňovací systém umožňuje absorpci oxidu uhličitého a zároveň 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.

#### Deskový fotobioreaktor

Fotobioreaktory jsou tvořeny průhlednými deskami, které umožňují prozařování kultivačního média (obr. 4). Proudění média v tenké vrstvě mezi dvěma deskami umožňuje prozáření celé vrstvy, což výrazně intenzifikuje proces fotosyntézy. Z tohoto důvodu je však také důležité odvádět vyprodukované řasy z kultivačního systému tak,

Obr. 4. Deskový fotobioreaktor<sup>7</sup>

aby médium nebylo příliš koncentrované. Velká koncentrace řas v mediu by měla za následek nedostatečné prozáření kultivačního média. Médium s vyprodukovanými řasami musí být nahrazeno čerstvým kultivačním médiem, aby byl zajištěn kontinuální provoz systému. Promíchávání proudícího média je často zajištěno aerací, která je umístěna ve spodní části deskového fotobioreaktoru. Médium je cirkulováno čerpadlem a vyprodukované řasy jsou následně odváděny do zadržovací nádoby. Většina stávajících konfigurací rozděluje systém do dvou částí podobně jako u trubkového fotobioreaktoru. Kultivační médium je tak provzdušňováno v sekci oddělené od ozařovaných desek.

#### Válcový fotobioreaktor

Řasy jsou kultivovány v průhledných válcových nádobách, které jsou zvnějšku ozařovány (obr. 5). Objevují se však také varianty, kde je využíváno vnitřní umělé pro-

#### Tabulka I

##### Výhody a nevýhody konstrukčních variant kultivačních systémů

Kultivační systém	Výhody	Nevýhody
Korytový systém	velké množství zpracovávaného média	sedimentace řas v kanále neefektivní prozáření média možnost kontaminace média malá ozářená plocha
Kaskádový systém	prozáření celého objemu média	malé množství zpracovávaného média možnost kontaminace zpracovávaného média malá ozářená plocha
Trubkový systém	prozáření celého objemu média zamezení kontaminace média velká ozářená plocha	znečištění transparentních ploch
Deskový fotobioreaktor	velké množství zpracovávaného média prozáření celého objemu média zamezení kontaminace média velká ozářená plocha	znečištění transparentních ploch
Válcový fotobioreaktor	velké množství zpracovávaného média zamezení kontaminace média velká ozářená plocha	neefektivní prozáření média sedimentace řas znečištění transparentních ploch

Obr. 5. Válcový fotobioreaktor<sup>8</sup>

zařování. Oxid uhličitý je řasám dodáván aerací, která je umístěna ve spodní části válcových nádob. Nevýhodou válcových fotobioreaktorů je nízká efektivita působení světelného záření. Aby bylo možné prozářit celý zpracovávaný objem média, je potřeba zajistit jeho intenzivní promíchávání. K promíchání je možné využít mechanického nebo pneumatického způsobu míchání (aeraci oxidem uhličitým). V případě mechanického míchání je potřeba zvolit vhodný typ míchadla, které nebude narušovat strukturu řas. Hlavní výhody a nevýhody jednotlivých kultivačních systémů jsou popsány v tab. I.

### 3. Kultivace řas v průmyslovém měřítku

Aby bylo možné systémy pro kultivaci řas realizovat v průmyslovém měřítku, musí být 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 u průmyslových provozů, které produkují velké množství oxidu uhličitého, např. cementárny, železářny, uhelné elektrárny nebo provozny zpracovávající ropu.

Tabulka II

Základní konstrukční parametry kultivačních systémů na 1 ha zastavěné plochy;  $V_{\text{PBR}}$  – objem zpracovávaného média,  $S_{\text{PBR}}$  – ozářená plocha kultivačního systému

Parametr	Korytový systém	Kaskádový systém	Trubkový fotobioreaktor	Deskový fotobioreaktor	Válcový fotobioreaktor
$V_{\text{PBR}}$ [m <sup>3</sup> ]	2500	250	502	990	2103
$S_{\text{PBR}}$ [m <sup>2</sup> ]	10 000	10 000	51 836	39 600	34 834

#### 3.1. Objem kultivačního média

Pro konstrukční varianty kultivačních systémů, které byly popsány v odstavci 2.1. a 2.2., byly odhadnuty teoretické objemy kultivačního média na jednotku zastavěné plochy. Při uvažování realizace systémů v průmyslovém měřítku byla referenční velikost zastavěné plochy zvolena 1 ha. Následně byly pro jednotlivé konstrukční varianty zvoleny základní konstrukční parametry, které umožňují výpočet objemu kultivačního média. V případě traťového kultivačního systému (obr. 1) byla zvolena výška hladiny 0,25 m. Z principu konstrukce tohoto systému je možné při optimálním uspořádání využít téměř celé zastavěné plochy a velikost nezastavěné plochy zanedbat. Ozářená plocha kultivačního systému je v tomto případě rovna velikosti zastavěné plochy. Objem kultivačního média je 2500 m<sup>3</sup>.

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 traťového systému. Objem kultivačního média je však výrazně nižší. V případě kaskádového systému byla zvolena výška hladiny tenké stékající vrstvy 25 mm (cit.<sup>14,17</sup>). Objem kultivačního média je tak na 1 ha zastavěné plochy 250 m<sup>3</sup>.

Pro konstrukci trubkového fotobioreaktoru (obr. 3) bylo uvažováno použití trubek o největším průměru 50 mm a tloušťce stěny 3 mm. Rozteč trubek v jedné horizontální řadě byla zvolena 60 mm a rozteč jednotlivých řad je 1 m. Aby nedocházelo k vzájemnému stínění jednotlivých řad, je uvažována výška jedné řady 1,98 m. Do výpočtu nejsou zahrnuty tvarovky spojující horizontální řady trubek. Objem kultivačního média na zastavěné ploše 1 ha je 502 m<sup>3</sup> a ozářená plocha fotobioreaktoru je 51 836 m<sup>2</sup>.

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 kultivačního média na 1 ha zastavěné plochy 990 m<sup>3</sup> a ozářená plocha fotobioreaktoru je 39 600 m<sup>2</sup>.

Válcový fotobioreaktor (obr. 5) je tvořen válci o největším průměru 0,28 m a tloušťce stěny 10 mm. Výška válců a rozteč rovnoběžných řad je zvolena srovnatelné

s deskovým a trubkovým fotobioreaktorem. Rozteč válců v jedné řadě je 500 mm. Pro zvolené konstrukční parametry je objem kultivačního média 2103 m<sup>3</sup> a ozářená plocha fotobioreaktoru je 34 834 m<sup>2</sup>.

Celkové porovnání základních konstrukčních parametrů jednotlivých kultivačních systémů je uvedeno v tab. II.

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

### 3.2. Produkce řas

Pro srovnání konstrukčních a provozních parametrů kultivačních systémů byla zvolena stejná teoretická produkce řas. Z literatury<sup>14</sup> je známo, že ve všech zmíněných systémech je možné dosáhnout produkce 1 g řas na litr kultivačního média a den. Vliv geometrie a provozních podmínek je u všech těchto systémů odlišný. V dané práci je jako referenční produkce volena právě tato hodnota, aby bylo následně možné vzájemně porovnat jednotlivé systémy. Produktivita kultivačního systému je ale výrazně ovlivněna možností prozařování celého objemu kultivačního média. V případě, že je koncentrace řas v kultivačním médiu udržována na hodnotě, kdy nedochází k eliminaci působení záření, je hloubka prozářené vrstvy kultivačního média pomocí slunečního záření maximálně 5 cm (cit.<sup>9</sup>). Důležitým provozním parametrem je schopnost kontinuálního promíchávání kultivačního média v průběhu kultivace. Je potřeba zajistit dostatečné promíchávání v celém objemu kultivačního systému tak, aby bylo možné prozářít celý objem média. Pro porovnání teoretické výtěžnosti řas jednotlivých kultivačních systémů byl určen objem systému, který je neustále prozařován. Porovnání jednotlivých systémů je uvedeno v tab. III.

Z poměru prozářené objemu a celkového objemu kultivačního systému je zřejmé, že u traťového a válcového fotobioreaktoru dochází k prozáření výrazně menšího množství kultivačního 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 plo-

chy. Poměr produktivit jednotlivých fotobioreaktorů je graficky znázorněn na obr. 6.

### 3.3. Využití oxidu uhličitého

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

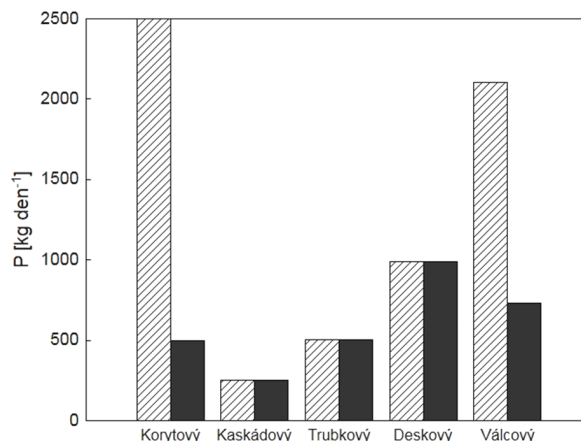
#### Absorpce oxidu uhličitého

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  $x_i$  molární zlomek složky  $i$  v kapalně fázi.

Při určení teoretického absorbovaného množství CO<sub>2</sub> v kultivačních systémech bylo předpokládáno, že každý systém je provzdušňován aeračním plynem. Složením aeračního plynu by měly být simulovány podmínky využitel-



Obr. 6. Teoretická produkce řas na 1 ha zastavěné plochy. Šrafovane – produkce řas v celém objemu, plně – produkce řas v prozářeném objemu

Tabulka III

Porovnání teoretické výtěžnosti kultivačních systémů na 1 ha zastavěné plochy;  $V_{\text{light}}$  – prozářený objem zpracovávaného média,  $P$  – teoretická produkce řas v celém objemu kultivačního systému,  $P_{\text{light}}$  – teoretická produkce řas v prozářeném objemu kultivačního systému

Parametr	Korytový systém	Kaskádový systém	Trubkový fotobioreaktor	Deskový fotobioreaktor	Válcový fotobioreaktor
$V_{\text{light}}$ [m <sup>3</sup> ]	500	250	502	990	731
$V_{\text{light}}/V_{\text{PBR}}$ [%]	20	100	100	100	35
$P$ [kg den <sup>-1</sup> ]	2500	250	502	990	2103
$P_{\text{light}}$ [kg den <sup>-1</sup> ]	500	250	502	990	731

né v průmyslovém měřítku. Výpočet absorbovaného množství byl proveden pro dvě různé koncentrace CO<sub>2</sub> v aeračním plynu. První výpočet byl proveden pro koncentraci 0,04 hm.% CO<sub>2</sub>, který simuluje využití vzduchu jako aeračního plynu. Další výpočet simuluje využití spalin o koncentraci CO<sub>2</sub> 15 hm.%. Působení světelného záření a vliv okolního prostředí na kultivační systémy bude ovlivňovat také teplotu kultivačního média. Změna teploty je zahrnuta také do výpočtu absorpce CO<sub>2</sub>. Celý výpočet je proveden pro použití systémů při atmosférickém tlaku a jako kultivační médium je uvažována čistá voda. Při obsahu 0,04 hm.% CO<sub>2</sub> v aeračním plynu bylo u systémů s otevřenou nádrží dosaženo na 1 ha zastavěné plochy hodnoty 1,4 kg rozpuštěného CO<sub>2</sub> při teplotě 15 °C. Při obsahu 15 hm.% CO<sub>2</sub> v aeračním plynu dochází při stejné teplotě k rozpuštění až 500 kg oxidu uhličitého.

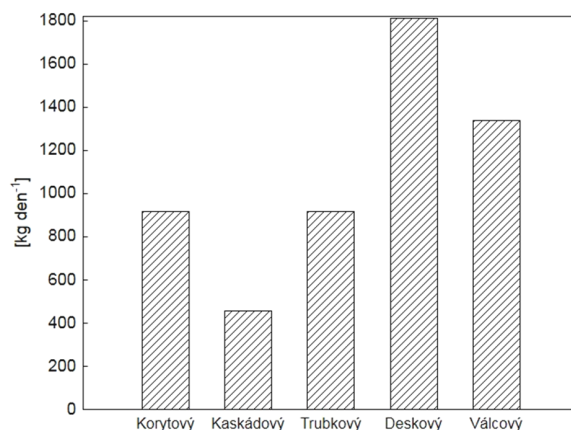
Rozpuštěný oxid uhličitý mohou řasy využívat ke svému růstu. Část rozpuštěného CO<sub>2</sub> odchází v kultivačním médiu společně s vytěženými řasami a v závislosti na podmínkách okolního prostředí následně dochází k jeho částečné desorpci. K rozpuštění dalšího CO<sub>2</sub> pak dochází při doplnění kultivačního systému čerstvým médiem. Množství rozpuštěného CO<sub>2</sub> tak zůstává v kultivačním systému téměř na konstantní hodnotě a mění se v podstatě pouze při změně okolních podmínek. K nejvyšším hodnotám rozpustnosti CO<sub>2</sub> v kultivačním médiu se dosahuje u traťových a válcových systémů, neboť množství kultivačního média je v těchto systémech největší. S klesající teplotou média roste rozpustnost CO<sub>2</sub>. Vhodné teplotní 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 (cit.<sup>3</sup>).

#### Zachytávání oxidu uhličitého v řasách

Řasy jsou tvořeny převážně z uhlíku, který je získáván z oxidu uhličitého<sup>10</sup>. Jeden mol CO<sub>2</sub> má hmotnost 44 g a z toho je 12 g tvořeno uhlíkem. Sušina řas je téměř z 50 % celkové hmotnosti tvořena uhlíkem<sup>10</sup>. Teoretická spotřeba oxidu uhličitého na vyprodukování 1 g 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 kultivačního média. Výsledné porovnání je zobrazeno v obr. 7. 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.



Obr. 7. Množství zachyceného oxidu uhličitého v řasách na 1 ha zastavěné plochy

#### 3.4. Ekonomické zhodnocení konstrukčních variant

Při hodnocení možnosti realizace kultivačních systémů je důležité 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 zajišťujícími proudění kultivačního 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 distribují kultivační 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 veliké množství transparentních součástí, které jsou většinou z plastu nebo skla. Tyto součásti jsou dále doplňovány tvarovkami a strojními prvky, pro spojení a utěsnění jednotlivých součástí. Čerpadla a aerační systémy 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 produkce řas, kterých jsou tyto varianty schopny dosáhnout. V uzavřených fotobioreaktorech je možné dosáhnout více jak dvojnásobné produkce řas než u otevřených systémů<sup>11</sup>, což je patrné z porovnání teoretických výtěžností uvedených v tab. III a na obr. 6. Výtěžnost řas se tedy výrazně promítne do celkového ekonomického zhodnocení jednotlivých konstrukčních variant

kultivačních systémů. Ruiz<sup>12</sup> ve své práci popisuje srovnání nákladů základních kultivačních systémů na produkci jednoho kilogramu řas. Srovnání je vztaženo také na různé lokality, které mají na produkci výrazný vliv. Porovnání tří základních konstrukčních variant je zobrazeno na obr. 8. Z porovnání je zřejmé, že u deskových fotobioreaktorů bylo dosaženo ve všech lokalitách nejnižších nákladů vztažených na kilogram vyprodukovaných řas. Naopak u traťových systémů náklady výrazně vzrostly<sup>12</sup>.

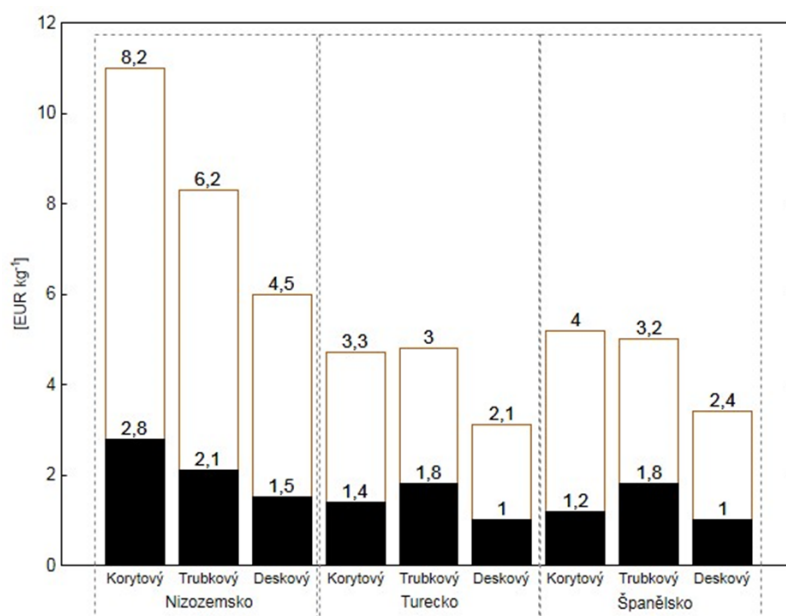
Z porovnání teoretické produkce řas v prozářeném objemu kultivačních systémů, které je zobrazeno v tab. III, vychází neefektivněji deskový fotobioreaktor. Pro přímé porovnání nákladů kultivačních systémů popsanych v kap. 3 je možné použít teoretické produkce řas deskového fotobioreaktoru  $990 \text{ kg den}^{-1}$ . Pro zvolenou produkci řas byla vypočítána zastavěná plocha  $S_{\text{area}}$  zbývajících kultivačních systémů, která by byla potřeba k dosažení srovnatelné teoretické produkce. Porovnání investičních a provozních nákladů pro realizace v různých lokalitách a pro zvolenou produkci řas je zobrazeno v tab. IV. Zastavěná plocha potřebná pro dosažení srovnatelné produktivity řas

u traťového systému a trubkového fotobioreaktoru je téměř dvojnásobná v porovnání s deskovým fotobioreaktorem.

#### 4. Závěr

Obecně lze u traťového systému a válcového fotobioreaktoru zpracovávat největší množství média. Na srovnatelné zastavěné ploše lze však u uzavřených fotobioreaktorů pracovat s výrazně větší ozářenou plochou systémů. Z poměru prozářeného objemu a celkového objemu kultivačního systému je zřejmé, že u traťového a válcového fotobioreaktoru dochází k prozáření výrazně menšího množství kultivačního média, což bude mít vliv na celkovou produkci řas. V případě teoretické produkce řas pouze v ozářeném objemu dosahuje deskový fotobioreaktor nejvyšší výtěžnosti řas. Výhody a nevýhody jednotlivých konstrukčních variant jsou uvedeny v tab. I.

Spotřeba oxidu uhličitého v kultivačních systémech byla rozdělena na proces absorpce v kultivačním médiu a na proces zachytávání v řasách. Nejvyšších hodnot roz-



Obr. 8. Náklady kultivačních systémů vztažené na kilogram vyprodukovaných řas<sup>12</sup>. Plně – provozní náklady, bez výplně – investiční náklady

Tabulka IV

Porovnání nákladů a potřebné zastavěné plochy pro zvolenou produkci řas:  $990 \text{ kg den}^{-1}$ ; PN – provozní náklady, IN – investiční náklady

Kultivační systém	Nizozemsko		Turecko		Španělsko		$S_{\text{area}}$ [ha]
	PN [Eur]	IN [Eur]	PN [Eur]	IN [Eur]	PN [Eur]	IN [Eur]	
Korytový	2772	8118	1386	3267	1188	3960	1,98
Trubkový	2079	6138	1782	2970	1782	3168	1,97
Deskový	1485	4455	990	2079	990	2376	1,00

pustnosti oxidu uhličitého v kultivačním médiu se dosahuje v systémech pracujících s největším objemem média, jedná se o traťový a válcový systém. Z porovnání teoretické spotřeby oxidu uhličitého v kultivačních systémech vychází neefektivněji deskový fotobioreaktor. Naopak nejméně efektivní je kaskádový systém.

Investiční náklady jsou u otevřených kultivačních systémů nižší než v případě uzavřených systémů. Při uvažování výtěžnosti řas, která může být více jak dvojnásobná u uzavřených systémů, se z ekonomického hlediska výrazně mění efektivita jednotlivých kultivačních systémů. Nejnižších nákladů lze dosáhnout u deskových fotobioreaktorů, zatímco u traťových systémů náklady v závislosti na produkci řas výrazně rostou.

*Tento výzkum byl podpořen z projektu OP VVV č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000753 „Centrum výzkumu nízkouhlikových energetických technologií“.*

#### Seznam symbolů

$p_i$ [Pa]	parciální tlak složky $i$ v plynné fázi
$P_{\text{light}}$ [kg den <sup>-1</sup> ]	teoretická produkce řas v prozářeném objemu kultivačního systému
$S_{\text{area}}$ [ha]	zastavěná plocha systému
$S_{\text{PBR}}$ [m <sup>2</sup> ]	ozářená plocha kultivačního systému
$V_{\text{light}}$ [m <sup>3</sup> ]	prozářený objem zpracovávaného média
$x_i$ [–]	molární zlomek složky $i$ v kapalně fázi
IN [EUR]	investiční náklady
$P$ [kg den <sup>-1</sup> ]	teoretická produkce řas v celém objemu kultivačního systému
PN [EUR]	provozní náklady

#### LITERATURA

- Milano J., Ong H. C., Masjuki H. H., Chong W., Lam M. K., Loh P. K., Vellayan V.: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 180 (2016).
- Brennan L., Owende P.: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 557 (2010).
- Masojídek J., Torzillo G.: *Earth Syst. Environ. Sci. June*, 1 (2014)
- Matamoros V., Gutiérrez R., Ferrer I., García J., Bayona J. M.: *J. Hazard. Mater.* 288, 34 (2015).
- [http://biom.cz/cz/obrazek/obr-detail-instalovaneho-fotobioreaktoru-v-zd-dublovice,\\_staženo](http://biom.cz/cz/obrazek/obr-detail-instalovaneho-fotobioreaktoru-v-zd-dublovice,_staženo) 26. 1. 2017.

- Hernández-Calderón O. M., Ponce-Ortega J. M., Ortiz-del-Castillo J. R., Cervantes-Gaxiola M. E., Milán-Carrillo J., Serna-González M., Rubio-Castro E.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 55, 2345 (2016).
- Sforza E., Enzo M., Bertuccio A.: *Chem. Eng. Res. Des.* 92, 1153 (2014).
- [http://biom.cz/cz/obrazek/obr-detail-instalovaneho-fotobioreaktoru-v-zd-dublovice,\\_staženo](http://biom.cz/cz/obrazek/obr-detail-instalovaneho-fotobioreaktoru-v-zd-dublovice,_staženo) 26. 1. 2017.
- Huang J., Li Y., Wan M., Yan Y., Feng F., Qu X., Wang J., Shen G., Li W., Fan J.: *Bioresour. Technol.* 159, 8 2(2014).
- Mohsenpour S. F., Willoughby N.: *Biomass Bioenergy* 85, 168 (2016).
- Novoveská L., Zapata A. K. M., Zabolotney J. B., Atwood M. C., Sundstrom E. R.: *Algal Res.* 18, 86 (2016).
- Ruiz J., Olivieri G., de Vree J., Bosma R., Willems P., Reith J. H., Eppink M. H. M., Kleinegris D. M. M., Wijffels R. H., Barbosa M. J.: *Energy Environ. Sci.* 24, 405 (2016).
- Molina E., Fernández J., Acién F. G., Chisti Y.: *J. Biotechnol.* 92 (2), 113 (2001).
- Olivieri G., Salatino P., Marzocchella A.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 89, 178 (2013).
- Wang B., Lan Ch. Q., Horsman M.: *Biotechnol. Adv.* 30, 904 (2012).
- Mata T. M., Martins A. A., Caetano N. S.: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 217 (2010).
- Richmond A. (ed.): *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*, Blackwell Science Ltd., Oxford 2004.

**V. Bělohav, T. Jirout, and L. Krátký** (Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Process Engineering): **Possibilities of Implementation of Photobioreactors on Industrial Scale**

In the present paper, a critical review of the alternatives of existing industrial design for microalgae cultivation is presented. For a chosen quantity of microalgae produced, basic design parameters of various photobioreactors are determined. Moreover, an economic evaluation of the designs has been performed.