

## KULTIVACE POLÁRNÍCH MIKROŘAS V OTOČNÉM DESKOVÉM FOTOBIOREAKTORU

VOJTĚCH BĚLOHLAV<sup>a</sup>, TOMÁŠ JIROUT<sup>a</sup>, JOSEF ELSTER<sup>b,c</sup>, JIŘÍ LIŠKA<sup>c</sup>, LINDA NEDBALOVÁ<sup>c,d</sup>  
a JANA KVÍDEROVÁ<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, Technická 4, 160 00 Praha, <sup>b</sup> Centrum polární ekologie, Přírodovědecká fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Na Zlaté stoce 3, 370 05 České Budějovice, <sup>c</sup> Centrum pro algologii, Botanický ústav AV ČR, v.v.i., Dukelská 135, 379 01 Třeboň, <sup>d</sup> Katedra ekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Viničná 7, 128 44 Praha, Česká republika  
vojtech.belohlav@fs.cvut.cz

Došlo 26.6.23, přijato 26.7.23.

S postupující urbanizací polárních oblastí roste poptávka po udržitelných technologiích, které jsou schopny přetvářet odpadní látky v produkty s vyšší přidanou hodnotou. Pro produkci mikrořasové biomasy, mohou být využity živiny obsažené v odpadních vodách, nebo oxid uhličitý ve spalínách. Kmeny mikrořas, kterým se podařilo adaptovat k extrémním klimatickým podmínkám polárních oblastí, se jeví jako vhodná alternativa ke konvenčním druhům průmyslově kultivovaných mikrořas. Možné uplatnění technologií pro produkci polárních mikrořas je však také v oblastech střední a východní Evropy, kde nejsou klimatické podmínky příznivé pro celoroční kultivaci konvenčních mikrořas. Pro izolované druhy polárních mikrořas byl navržen otočný deskový fotobioreaktor, který je schopen se natáčet podle aktuální polohy slunce. Otočný fotobioreaktor je tak schopen efektivně využívat dopadající sluneční záření, které je pro růst mikrořas klíčové. Navržená koncepce otočného fotobioreaktoru byla úspěšně testována v extrémních klimatických podmínkách na České arktické stanici na Svalbardu.

Klíčová slova: mikrořasy, fotobioreaktor, Arktida, polární mikrořasy

### Obsah

1. Úvod
2. Kultivace mikrořas
  - 2.1. Druhy mikrořas a jejich využití
  - 2.2. Technologie kultivace
3. Polární mikrořasy
  - 3.1. Vlastnosti polárních mikrořas
  - 3.2. Fotobioreaktor na Svalbardu
4. Závěr

### 1. Úvod

Mikrořasy patří do široké skupiny jednoduchých vodních organismů, které jsou schopny fotosyntézou přeměňovat světelné záření, oxid uhličitý a živiny na biomasu stejným způsobem jako cévnaté rostliny<sup>1,2</sup>. V porovnání s cévnatými rostlinami však mohou růst výrazně rychleji, a to v nejrůznějších vodních prostředích pouze se základními požadavky na živiny<sup>3</sup>. Vynikající růstové a obsahové vlastnosti řas podněcují výzkum, technologický vývoj i realizaci jejich produkce. Mikrořasy lze využít k výrobě biopaliv, hnojiv, doplňků stravy, krmiv nebo produktů pro kosmetický či farmaceutický průmysl<sup>4,5</sup>. Na principu cir-

kulární ekonomiky jsou mikrořasy využívány také v konceptech biorafinérií pro čištění odpadních vod<sup>6</sup> nebo zachytávání odpadního CO<sub>2</sub> ze spalin průmyslových podniků<sup>7</sup>. K řízenému růstu mikrořas se využívají různé kultivační systémy včetně fotobioreaktorů. Přenos technických řešení a experimentálních výsledků z laboratorní a poloprovozních zařízení do provozního komerčního měřítka není zatím příliš úspěšný, zvláště kvůli vysokým investičním a provozním nákladům, které jsou výrazně ovlivněny lokálními podmínkami místa instalace. Většina kultivačních technologií dosahuje komerčního uplatnění pouze v lokalitách s větším množstvím slunečných hodin a přívětivějšími teplotami v průběhu roku (např. Španělsko, Itálie).

Proto je často využití těchto technologií na území České republiky velmi komplikované až nerealizovatelné, často i v médiích a konferenčních diskuzích nezaslouženě kritizované až odsuzované. Jedna z možností přiblížení k efektivnímu a ekonomicky smysluplnému využití kultivačních systémů pro produkci mikrořas může být využití kmenů polárních mikrořas, které se dokázaly adaptovat na extrémní klimatické podmínky polárních oblastí. Přizpůsobení kultivačních systémů těmto druhům mikrořas by mohlo následně umožnit uplatnění v průmyslovém měřítku a dosáhnout tak komerční úrovně.

## 2. Kultivace mikrořas

Kultivace řas je řízena nároky jednotlivých druhů a složením biomasy, technologickými parametry kultivace a oblastmi využití produktů kultivace.

### 2.1. Druhy mikrořas a jejich využití

Existuje mnoho různých druhů mikrořas, které se liší svou velikostí, tvarem, složením pigmentů a dalšími vlastnostmi. Pod pojem mikrořasy se v aplikované algologii obvykle zahrnují jak prokaryotické sinice, tak eukaryotické řasy z mnoha fylogenetických linií; mezi nejdůležitější skupiny patří zelené řasy (*Chlorophyta*), ruduchy (*Rhodophyta*) a hnědé řasy zahrnující například rozsivky (*Bacillariophyta*)<sup>8</sup>. Většina doposud publikovaných studií, které se věnují průmyslovému využití mikrořas, se zaměřuje na fotosyntetické druhy mikrořas. Existují však také mixotrofní nebo heterotrofní druhy.

V dnešní době je pozornost směřována na technologie zajišťující energetickou soběstačnost a uhlíkovou neutralitu. V předešlých letech bylo cílem nahrazení fosilních paliv biopalivy první, resp. druhé generace. S příchodem kultivačních systémů pro produkci mikrořas (biomasa třetí generace) se výzkum a vývoj zaměřoval také na možnost využití těchto organismů pro produkci kapalných biopaliv<sup>9</sup>. Vysoké investiční náklady na výstavbu inovativních kultivačních systémů a vysoké provozní či údržbové náklady byly však důvodem vysoké ceny vyprodukované mikrořasové biomasy. S ohledem na relativně stále ještě nízkou cenu fosilních paliv a vysokou cenu biopaliv z mikrořas však nikdy nedošlo k plné komercializaci a postupně se od těchto záměrů ustupovalo. Jako vhodnější se jeví využití mikrořas pro produkty s vyšší přidanou hodnotou. Vysoké nutriční hodnoty mikrořas, založené zejména na vysokém obsahu bílkovin a zajímavém lipidovém profilu, zvyšují možnost uplatnění v potravinářském průmyslu<sup>10</sup>. Přítomnost bioaktivních látek, jako jsou např. karotenoidy, fykobiliny, polysacharidy, vitaminy a steroly, příznivě ovlivňuje imunitní reakce, zlepšuje plodnost a kontrolu hmotnosti. Mikrořasy mohou být využity také ve formě krmiva pro ryby a jiné vodní živočichy<sup>5</sup>. Látky obsažené v mikrořasách jsou využívány také v kosmetických přípravcích či pro produkci barviv<sup>11</sup>. Použití pro potravinářské či farmaceutické účely je však v dnešní době z legislativních důvodů limitováno pouze pro několik kmenů mikrořas. Také kultivační technologie a zařízení musí splňovat náročné bezpečnostní předpisy. Použití kultivačních systémů, tzv. fotobioreaktorů, je často využíváno také v konceptech biorafinérií, které se na základě principu cirkulární ekonomiky pokouší přetvářet odpadní látky v produkty s vyšší přidanou hodnotou. Oxid uhličitý obsažený v okolním vzduchu nebo odpadních spalinách může být ve fotobioreaktoru přeměněn v mikrořasovou biomasu, kterou lze následně využít např. jako biohnojivo v zemědělství<sup>12</sup>. Mikrořasy nabízejí také udržitelnou alternativu k technologiím čištění odpadních vod<sup>13</sup>. Mikrořasy jsou v rámci biologického čištění schop-

ny odstraňovat živiny obsažené v odpadní vodě a přeměňovat je v biomasu. Vyprodukovaný kyslík vznikající na základě probíhající fotosyntézy může být použit pro separaci organických či anorganických látek z odpadní vody. Vyprodukované bubliny kyslíku na principu procesu flotace vynášejí tyto látky k volné hladině kultivačního média, odkud mohou být dále separovány<sup>14</sup>.

### 2.2. Technologie kultivace

Kultivační systémy lze rozdělit na tři základní skupiny dle konstrukčního uspořádání: otevřené kultivační systémy, uzavřené fotobioreaktory a systémy kombinující specifika otevřených a uzavřených systémů. Otevřené nádrže, průtočné kanály nebo nakloněné tenkovrstvé systémy jsou nejčastěji využívanými otevřenými kultivačními systémy. V uzavřených fotobioreaktorech je kultivační médium odděleno od okolního prostředí pomocí transparentních ploch. Výhodou uzavřených systémů je možnost snáze kontrolovat provozní podmínky, což umožňuje eliminovat kontaminaci zpracovávaného kultivačního média. Ve studii Bělohav a spol.<sup>15</sup> byly popsány různé koncepty kultivačních systémů a jejich specifika. Kultivace mikrořas zahrnuje několik faktorů, které ovlivňují růst a produkci těchto mikroorganismů. Mezi klíčové parametry, které zajišťují správný růst fotosyntetických mikrořas, patří světelné záření (sluneční, umělé), oxid uhličitý, živiny (zejména dusík, fosfor, draslík a hořčík) a vhodná teplota kultivačního média. Různé druhy mikrořas mají odlišné nároky na intenzitu a spektrum světelného záření<sup>9</sup>. Koncentrace oxidu uhličitého a živin v kultivačním médiu může výrazně ovlivnit rychlost růstu mikrořas, které je možné ve fotobioreaktorech dosáhnout<sup>16,17</sup>. Mikrořasy jsou schopny růst v poměrně širokém pásmu teplot kultivačního média. Pro nejrozšířenější mikrořasy (*Chlorella*) se nejčastěji uvádí rozsah kultivačních teplot od 15 do 40 °C jako optimální pro růst. Některé druhy mikrořas (*Phaeodactylum*) jsou však schopny růst pouze v úzkém rozsahu teplot od 20 do 25 °C (cit.<sup>18</sup>). Optimální teplota pro kultivaci většiny druhů mikrořas výrazně limituje dobu provozu kultivačních systémů. Nižší nebo vyšší teploty mohou způsobit zamezení růstu a následné znehodnocení kultivované kultury mikrořas vlivem zahnívání<sup>19</sup>. V uzavřených kultivačních systémech je možné teplotu kultivace řídit pomocí vestavěných tepelných výměníků, případně je možné upravovat tepelné podmínky prostoru, kde je fotobioreaktor instalován. V otevřených systémech je však teplota kultivace přímo ovlivněna lokálními klimatickými podmínkami. S ohledem na průměrné denní teploty v České republice, které přesahují hranici 15 °C pouze v letních měsících přibližně od června do srpna<sup>28</sup>, je kultivace mikrořas ve venkovním prostředí značně limitována. Při teplotách nižších než 15 °C funguje proces kultivace neefektivně a celkové výtěžnosti mikrořas jsou velmi malé<sup>20</sup>. Požadavky na zmíněné provozní podmínky se výrazně liší dle kultivovaného druhu mikrořas a je tedy potřeba vždy citlivě volit vhodný kultivační systém, v kterém lze zajistit odpovídající kultivační podmínky.

### 3. Polární mikrořasy

Ve vyšších zeměpisných šířkách je s ohledem na optimální provozní parametry konvenčních mikrořas velmi komplikované dosáhnout efektivní kultivace v poloprovozním či průmyslovém měřítku. Kultivace je často limitována pouze na krátké letní období, kdy jsou teploty a intenzity slunečního záření dostatečné pro efektivní růst mikrořas. V opačném případě je nutné fotobioreaktory doplnit o výměníky tepla, které jsou schopny udržovat teplotu kultivačního média na požadovaných teplotních hladinách. V některých případech je možné využít také umělého osvětlování fotobioreaktorů<sup>21</sup>. Nutnost ohřevu kultivačního média nebo umělého osvětlování však v době rostoucích cen energií výrazně navyšuje provozní náklady, což v podstatě zamezuje dalšímu komerčnímu uplatnění<sup>20</sup>. Pod teplotním optimem se rychlost metabolismu mikrořas s klesající teplotou snižuje.

#### 3.1. Vlastnosti polárních mikrořas

Výzkumné aktivity prokázaly, že existují druhy mikrořas, které jsou schopny se adaptovat k nízkým provozním teplotám a zmírnit tak jejich negativní vliv na účinnost probíhajících bioprocésů<sup>22</sup>. Mikroorganismy vyskytující se trvale v chladných klimatických podmínkách se vyznačují řadou fyziologických adaptací, což umožňuje dosáhnout efektivního růstu i při extrémně nízkých teplotách. Jednou z těchto adaptací je například zvýšený výskyt polynenasycených mastných kyselin v lipidech<sup>23</sup>.

Ze vzorků pocházejících z obou polárních oblastí a severských zemí byly izolovány kmeny mikrořas, které jsou schopny odolávat extrémním klimatickým podmínkám (sbírka fototrofních mikroorganismů v Botanickém ústavu AV ČR v Třeboni udržuje kolem 400 polárních kmenů sinic a řas). Polární mikrořasy jsou schopny růst při teplotách blížících se bodu mrazu. Vedle nízké teploty kultivace jsou schopny využívat i nízké intenzity dopadajícího slunečního záření<sup>24</sup>. Také tyto kmeny polárních mi-

krořas jsou schopny dosahovat vysokých produkcí cenných látek, např. polynenasycené mastné kyseliny, antioxidanty, karotenoidy nebo fenolové sloučeniny a další bioaktivní látky<sup>25</sup>. Studie prokázaly, že je možné dosahovat srovnatelných výtěžností mikrořas jako v systémech kultivujících konvenční kmeny mikrořas při teplotách nad 20 °C (cit.<sup>19,23</sup>). Vedle použití pro potravinové doplňky nebo krmivo je však možné využít polární mikrořasy také v oblasti čištění odpadních vod<sup>24</sup>. S ohledem na zmíněné možnosti využití mikrořas mohou být fotobioreaktory jedním z klíčových zařízení při urbanizaci Arktidy, což je v současné době jeden z hlavních směrů ve výzkumu v arktických zemích<sup>29</sup>.

Výrazný potenciál má ovšem také využití polárních mikrořas v oblastech střední Evropy, konkrétně např. České republiky. Polární mikrořasy by mohly v zimních měsících, kdy průměrné teploty klesají k bodu mrazu, nahradit konvenční mikrořasy a prodloužit tak celkovou dobu kultivační kampaně. Prodloužení doby kultivace a s tím spojené navýšení produkce mikrořas by pomohlo vylepšit celkovou ekonomickou bilanci kultivačních systémů a přiblížit tak proces kultivace komerčnímu průmyslovému uplatnění.

#### 3.2. Fotobioreaktor na Svalbardu

Při návrhu technologie pro kultivaci polárních mikrořas byl kladen důraz na přizpůsobení koncepce fotobioreaktoru klimatickým podmínkám a vnějším vlivům (např. prašnost, vlhkost) Svalbardu. Česká arktická výzkumná stanice Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích se nachází na souostroví Svalbard (obr. 1), v nejseverněji položeném městě na světě Longyearbyen (obr. 2).

Na této stanici byl navržený prototyp fotobioreaktoru testován v průběhu celého polárního léta od května do září roku 2022. S ohledem na požadavky na nízké zástavbové nároky a možnosti snadné kontroly provozních parametrů byla vybrána desková konstrukce fotobioreaktoru. V letních měsících od května do srpna je zde nepřetržitě



Obr. 1. Longyearbyen na Svalbardu<sup>30</sup>

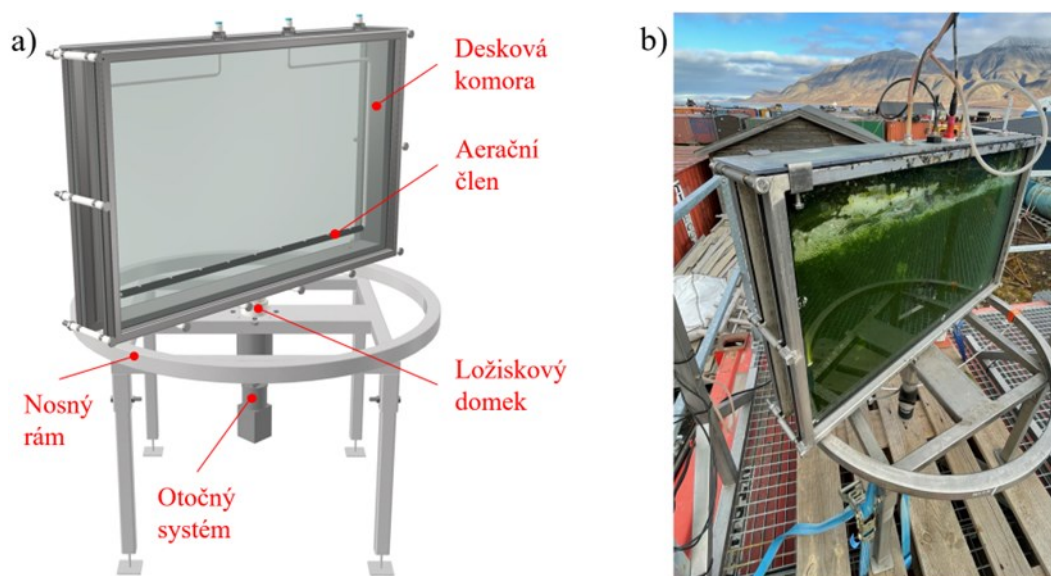


Obr. 2. Česká arktická stanice v Longyearbyenu

denní svit. Jako v přímořské oblasti je zde však poměrně silná oblačnost, což způsobuje, že množství hodin slunečního svitu (suma radiace) je velice podobné jako v letních měsících v České republice. Při konstrukci deskového fotobioreaktoru bylo tedy zásadním úkolem maximalizovat využití slunečního svitu pro ozařování buněk polárních mikrořas. Slegers a spol.<sup>26</sup> ve své studii popisuje redukci dopadajícího slunečního záření od transparentních ploch fotobioreaktoru. Část světelného záření, které nedopadá kolmo na transparentní plochy se odrazí a část záření prochází skrz transparentní stěnu do vrstvy kultivačního média. Proto byla konstrukce deskového fotobioreaktoru navržena jako otočná. Cílem bylo navrhnout automatizovaný rotační mechanismus, který by umožňoval natáčení deskové komory fotobioreaktoru podle pohybu slunce. Sluneční paprsky by tak byly v průběhu celého dne směro-

vány kolmo k transparentní ploše deskového fotobioreaktoru. Vysoká prašnost v blízkém okolí arktické stanice způsobená končící těžbou uhlí byla dalším faktorem, který bylo potřeba brát v potaz při konstrukci otočného fotobioreaktoru. Všechny otočné části musely být z tohoto důvodu uzpůsobeny tak, aby v nich nedocházelo ke vstupu jemných částic.

Pro účely prvotních kultivačních testů v extrémních klimatických podmínkách byl navržen otočný deskový fotobioreaktor, který vznikl ve spolupráci Botanického ústavu AV ČR v Třeboni, Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích – Centra polární ekologie a Českého vysokého učení technického v Praze, Fakulty strojní – Ústavu procesní a zpracovatelské techniky (obr. 3). Otočný deskový fotobioreaktor se skládá ze tří klíčových částí: desková komora, otočný systém a nosný rám.



Obr. 3. Otočný deskový fotobioreaktor; a) 3D model, b) testovací provoz na České arktické stanici

Desková komora je tvořena dvojicí transparentních skleněných desek tloušťky 10 mm, které jsou pomocí stahovacích rámu přichyceny ke svařenci nerezových U-profilů. Šířka profilů vymezuje vzájemnou vzdálenost transparentních desek, která je 60 mm. Obě transparentní desky (šířka 863 mm a výška 532 mm) jsou po obvodu opatřeny plochým těsněním a staženy šrouby k nerezovým profilům. Horní část komory je uzavřena odnímatelnou PVC deskou, v které jsou umístěny průchozí hrdla pro měřicí sondy a přichycení aeračního členu. Celkový objem deskové komory je téměř 28 litrů. S ohledem na zadrž provzdušňovacího plynu v průběhu kultivace je maximální objem zpracovávaného kultivačního média pouze 20 litrů. Poměr ozářené transparentní plochy fotobioreaktoru a objemu zpracovávaného kultivačního média je  $46 \text{ m}^{-1}$ . Obecně je cílem dosáhnout co nejvyšších hodnot tohoto poměru, neboť čím větší poměr je, tím lze ve fotobioreaktoru dosáhnout vyšších koncentrací a objemových produkcí mikrořas<sup>27</sup>. Ve spodní části deskové komory je připevněna hřídel, která je uložena v ložiskovém domku nosného rámu. Nosný rám je tvořen prstencem, po jehož obvodu jsou umístěny čtyři stojny, které jsou vzájemně vzdáleny 565 mm. Tento rozestup zajišťuje stabilitu celého fotobioreaktoru a odolnost vůči vnějším vlivům (nárazy větru, neopatrná manipulace při údržbě). Ve střední části nosného rámu je přivařen ložiskový domek tvořený dvojicí ložisek. Radiálně axiální ložisko zajišťuje usazení deskové komory v nosném rámu a přídavné radiální ložisko napomáhá celkové stabilitě komory při jejím otáčení. Rozměry nosného rámu definují celkovou zastavěnou plochu otočného fotobioreaktoru, která je  $0,5 \text{ m}^2$ . Hřídel deskové komory je pomocí spojky propojena s otočným systémem. Otočný systém je tvořen krokovým elektromotorem ESS 59-3 (Phyton GmbH, Německo) s vestavěnou planetovou převodovkou, která svým převodovým poměrem 100 zajišťuje pomalé otáčení deskové komory. Krokový elektromotor je certifikován pro použití v extrémních podmínkách (teploty  $-40$  až  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , vlhkost okolního vzduchu až 95 %). Digitální ovladač propojený s elektromotorem nastavuje dle aktuální polohy instalace fotobioreaktoru a času přesnou polohu deskové komory. Digitální ovladač s instalovanou knihovnou SolTrack dokáže v závislosti na aktuální poloze slunce přesně nastavit úhel otočení deskové komory tak, aby dopadající sluneční záření vždy směřovalo kolmo na transparentní plochy fotobioreaktoru.

Po skončení prvotní dlouhodobé kultivační kampaně (obr. 2b), která probíhala od června do srpna roku 2022, byla konstrukce otočného deskového fotobioreaktoru podrobena kontrole opotřebení a funkčnosti všech prvků. Po rozmontování všech částí fotobioreaktoru včetně ložiskového domku nebylo shledáno žádné zásadní opotřebení rotačních součástí. Na základě prvotních vyhodnocení výsledků z kultivace mikrořas bylo upraveno naprogramování digitálního ovladače, který umožňuje odklonit deskovou komoru fotobioreaktoru od přímého slunečního záření ve chvíli, kdy je intenzita světelného záření příliš vysoká a mohlo by tak docházet k fotoinhibici kultivovaného kmenu mikrořas. Navržená koncepce otočného fotobioreaktoru

a jeho technické řešení je chráněno užitným vzorem CZ 36383 U1. Součástí dalšího technického vývoje bude vytvoření metodologie zvětšování měřítka fotobioreaktoru do poloprovazního, případně průmyslového měřítka.

#### 4. Závěr

Podařilo se izolovat kmeny polárních mikrořas, které jsou adaptované na extrémní klimatické podmínky polárních oblastí. Jedná se zejména o nízké teploty blížící se bodu mrazu a nízké intenzity dopadajícího slunečního záření. Při těchto podmínkách jsou polární mikrořasy schopny produkovat cenné látky využitelné v potravinářském, chemickém či farmaceutickém průmyslu. Za účelem výzkumu vlivu provozních podmínek na růst polárních mikrořas byl navržen a zkonstruován otočný deskový fotobioreaktor, který byl instalován na České arktické stanici na Svalbardu. Současné výzkumné aktivity jsou směřovány pouze na proces kultivace. Využití vyprodukovaných mikrořas pro výrobu konkrétních produktů není v současné době uvažováno. Do budoucna je však plánováno využití fotobioreaktorů v polárních oblastech zejména pro čištění odpadních vod a spalin. Díky otočnému mechanismu je navržený fotobioreaktor schopen v průběhu polárního dne nepřetržitě sledovat pohyb slunce a využívat tak maximálně potenciál slunečního záření pro růst mikrořas. Slibné prvotní výsledky kultivační kampaně prokázaly vhodnost použití navrženého fotobioreaktoru. Cílem další práce by měl být návrh metodologie zvětšování měřítka, která by přiblížila tyto kultivační systémy průmyslovému uplatnění.

*Tento výzkum byl podpořen z projektu OP VVV č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000753 „Centrum výzkumu nízkouhlíkových energetických technologií“. Tento výzkum byl podpořen výzkumným záměrem BÚ AV ČR č. RVO67985939. Tento výzkum byl podpořen z projektu MŠMT INTER-EXCELLENCE LTAIN19139.*

#### LITERATURA

1. Singh. D. V., Bhat R. A., Upadhyay A. K., Singh R., Singh D. P.: Environ. Technol. Innov. 21, 101340 (2021).
2. Milano J., Ong H. C., Masjuki H. H., Chong W. T., Lam M. K., Loh P. K., Vellayan V.: Renew. Sust. Energ. Rev. 58, 180 (2016).
3. Aliyu A., Lee J. G. M., Harvey A. P.: Bioresour. Technol. Rep. 14, 100676 (2021).
4. Okeke E. S., Ejeromedoghene O., Okoye C. O., Ezeorba T. P. C., Nyaruaba R., Ikechukwu C. K., Oladipo A., Orege J. I.: Energy Convers. Manage.: X 16, 100323 (2022).
5. Ferreira de Oliveira A. P., Bragotto A. P. A.: Future Foods 6, 100157 (2022).
6. Chen J., Dai L., Mataya D., Cobb K., Chen P., Ruan R.: Bioresour. Technol. 366, 128188 (2022).

7. Ighalo J. O., Dulta K., Kurniawan S. B., Omoarukhe F. O., Ewuzie U., Eshiemogie A. U., Abdullah S. R. S.: *Clean. Chem. Eng.* **3**, 100044 (2022).
8. Khan M. I., Shin J. H., Kim J. D.: *Microb. Cell Fact.* **17**, 1 (2018).
9. Mata T. M., Martins A. A., Caetano N. S.: *Renew. Sust. Energ. Rev.* **14**, 217 (2010).
10. Martínez-Sanz M., Garrido-Fernández A., Mijlkovic A., Krona A., Martínez-Abad A., Coll-Marqués J. M., López-Rubio A., Lopez-Sanchez P.: *Algal Res.* **49**, 101960 (2020).
11. Ruiz J., Olivieri G., de Vree J., Bosma R., Willems P., Reith J. H., Eppink M. H. M., Kleinegriss D. M. M., Wijffels R. H., Barbosa M. J.: *Energy Environ. Sci.* **24**, 405 (2016).
12. Zhuang L. L., Li M., Hao Ngo H.: *Bioresour. Technol.* **308**, 123320 (2020).
13. Hussain F., Shah S. Z., Ahmad H., Abubshait S. A., Abubshait H. A., Laref A., Manikandan A., Kusuma H. S., Iqbal M.: *Renew. Sust. Energ. Rev.* **137**, 110603 (2021).
14. Goswami R. K., Mehariya S., Verma P., Lavecchia R., Zuurro A.: *J. Water Process Eng.* **40**, 101747 (2021).
15. Bělohav V., Jirout T., Krátký L.: *Chem. Listy* **112**, 183 (2018).
16. Kunjapur A. M., Eldridge R. B.: *Ind. Eng. Chem. Res.* **49**, 3516 (2010).
17. Wang B., Lan C. Q., Horsman M.: *Biotechnol. Adv.* **30**, 904 (2012).
18. Masojídek J., Torzillo G.: *Ref. Module Earth Syst. Environ. Sci. I* (2014).
19. Cheregi O., Ekendahl S., Engelbrektsson J., Strömberg N., Godhe A., Spetea C.: *Physiol. Plant.* **166**, 438 (2019).
20. Moody J. W., McGinty C. M., Quinn J. C.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **111**, 8691 (2014).
21. Krátký L., Jirout T., Bělohav V.: *Int. J. Environ. Sci. Technol.* (2023), <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04804-0>.
22. Lyon B. R., Mock T.: *Biology* **3**, 56 (2014).
23. Hulatt C. J., Berecz O., Egeland E. S., Wijffels R. H., Kiron V.: *Bioresour. Technol.* **235**, 338 (2017).
24. Ferro L., Gentili F. G., Funk C.: *Algal Res.* **32**, 44 (2018).
25. León-Vaz A., León R., Vigará J., Funk C.: *New Biotechnol.* **73**, 1 (2023).
26. Slegers P. M., Wijffels R. H., van Straten G., van Boxtel A. J. B.: *Appl. Energy* **88**, 3342 (2011).
27. Lee Y. K., v knize: *Algae Biotechnology* (Bux F., Chisti Y., ed.), kap. 1, str. 1–19. Springer, Cham 2016.
28. <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>, staženo 9. 3. 2023.
29. [https://www.irozhlaz.cz/veda-technologie/priroda/arktida-klimaticka-zmena-oteplovani-osidleni-clovek-josef-elster-vyzkum\\_2303111220\\_kac](https://www.irozhlaz.cz/veda-technologie/priroda/arktida-klimaticka-zmena-oteplovani-osidleni-clovek-josef-elster-vyzkum_2303111220_kac), staženo 7. 6. 2023.
30. <https://mapy.cz/zakladni?x=26.0551795&y=68.5181768&z=4>, staženo 30. 3. 2023.

**V. Bělohav<sup>a</sup>, T. Jirout<sup>a</sup>, J. Elster<sup>b,c</sup>, J. Liška<sup>c</sup>, L. Nedbalová<sup>c,d</sup>, and J. Kvidero<sup>b,c</sup>** (<sup>a</sup> Department of Process Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, <sup>b</sup> Centre for polar ecology, Faculty of Science, University of South Bohemia in České Budějovice, České Budějovice, <sup>c</sup> Centre for Phycology, Institute of Botany CAS, Třeboň, <sup>d</sup> Department of Ecology, Faculty of Science, Charles University, Prague, Czech Republic): **Cultivation of Polar Microalgae in a Rotating Flat-Panel Photobioreactor**

With the increasing urbanisation of the polar regions, the demand for sustainable technologies that are able to transform waste materials into high-value products is growing. For the production of microalgal biomass, nutrients contained in wastewater or carbon dioxide in flue gas can be used. Microalgae strains that have adapted to the extreme climatic conditions of polar regions appear to be a suitable alternative to conventional industrially cultivated microalgae species. Nevertheless, technologies for the production of polar microalgae can also be applied in areas of central and eastern Europe where climatic conditions are not suitable for year-round cultivation of conventional microalgae. For isolated polar microalgae species, a photobioreactor able to rotate according to the current position of the sun has been designed. The rotating flat-panel photobioreactor is able to efficiently use the incident solar radiation, which is crucial for microalgae growth. The designed concept of the rotating photobioreactor has been successfully tested in extreme climatic conditions at the Czech Arctic Research Station in Svalbard.

**Keywords:** microalgae, photobioreactor, Arctic, polar microalgae, sustainable technologies



Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs>), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.