



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

SKLÍZENÍ MIKROŘAS

MICROALGAE HARVESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Drozd

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Lošák, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Jiří Drozd
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Lošák, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijníma zkušebníma řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Sklízení mikrořas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pěstování mikrořas přináší významný ekologický i ekonomický potenciál. Proces však přináší řadu technických výzev, které snižují rentabilitu kultivace. Jednou z významných překážek pro masivní rozšíření mikrořas je jejich sklízení, které je energeticky velice náročné. Bakalářská práce se zaměří na současné možnosti sklízení mikrořas a popsání jejich možností.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše využívaných mikrořas a jejich vlastností
2. Možnosti pěstování mikrořas v oblasti střední Evropy
3. Možnosti sklízení a sušení mikrořas

Seznam doporučené literatury:

RICHMOND, A. a Q. HU, Ed., Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. doi: 10.1002/9781118567166.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá mikrořasami a jejich vlastnostmi. V rámci práce byla provedena rešerše využívaných mikrořas a zkoumány možnosti pěstování v oblasti střední Evropy. Dále byly analyzovány metody sklizení a sušení mikrořas a proveden experiment s využitím perspektivní metody sušení sprejovou sušárnou. V rámci rešerše byly zjištěny vlastnosti a možnosti využití mikrořas. Byly zkoumány různé druhy mikrořas, jejich nutriční hodnoty a možnosti využití v rozsáhlém spektru aplikací. Zkoumány byly také možnosti pěstování mikrořas v oblasti střední Evropy, včetně využití odpadních vod a obnovitelných zdrojů energie. Analyzovány byly metody sklizení a sušení mikrořas. Byly zkoumány výhody a nevýhody různých metod, jako je například flokulace, centrifugace, a sušení sprejovou sušárnou. Experiment byl proveden s využitím metody sušení sprejovou sušárnou. Výsledky experimentu ukázaly, že tato metoda je efektivní a umožňuje dosáhnout vysoké kvality a čistoty sušených mikrořas. Práce se také zabývá možnostmi dalšího vývoje a využití mikrořas. Byly popsány možnosti využití mikrořas jako potravinových doplňků a jako alternativy k tradičním zdrojům bílkovin. Zmíněny byly také možnosti využití mikrořas v oblasti farmacie a kosmetiky. Závěrem, tato práce přinesla informace o využívání mikrořas a metodách pěstování, sklizení a sušení. Z výsledků práce lze usoudit, že mikrořasy mají velký potenciál pro další vývoj a využití v různých odvětvích průmyslu.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrořasy, sušení, sprejová sušárna, atomizace, kultivace, kultivační médium, kultivační zařízení

ABSTRACT

This work describe microalgae and their properties. Within the scope of the work, a research was conducted on the utilized microalgae and the possibilities of cultivation in the Central European region were examined. Furthermore, harvesting and drying methods for microalgae were analyzed, and an experiment was conducted using a promising spray drying method. The research revealed the properties and potential uses of microalgae. Various types of microalgae, their nutritional values, and possibilities of application in a wide range of fields were investigated. The cultivation possibilities of microalgae in the Central European region, including the utilization of wastewater and renewable energy sources, were also examined. Harvesting and drying methods for microalgae were analyzed, considering the advantages and disadvantages of different techniques such as flocculation, centrifugation, and spray drying. An experiment utilizing the spray drying method was conducted, and the results showed that this method is effective and enables the achievement of high quality and purity of dried microalgae. The work also explores the possibilities of further development and utilization of microalgae. It describes the potential use of microalgae as food supplements and as alternatives to traditional protein sources. Additionally, the potential applications of microalgae in the pharmaceutical and cosmetic industries were mentioned. In conclusion, this work provides information on the utilization of microalgae and the methods of cultivation, harvesting, and drying. The results suggest that microalgae have great potential for further development and utilization in various industries.

KEYWORDS

microalgae, drying, spray dryer, atomization, cultivation, cultivation medium, cultivation system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DROZD, Jiří. *Sklízení mikrořas*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149694>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Lošák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji pod vedením Ing. Pavla Lošáka, Ph.D. s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 23.5.2023

.....

Jiří Drozd

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Pavlu Lošákovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, věcné poznámky a vstřícný a konstruktivní přístup při konzultacích. Dále diplomantům za dodání kultivovaných mikrořas a pracovníkům chemické laboratoře CIETEC za možnost experimentu. V neposlední řadě chci poděkovat rodině a přítelkyni za veškerou podporu v průběhu studia.

OBSAH

1	Využívané mikrořasy a jejich vlastnosti.....	10
1.1	<i>Chlorella</i>	10
1.2	<i>Arthrospira (Spirulina)</i>	11
1.3	<i>Dunaliella</i>	12
2	Možnosti pěstování mikrořas v oblastech střední Evropy.....	13
2.1	Kultivační metody	14
2.2	Fotobioreaktory (PBR).....	15
2.3	Heterotrofní fermentory	17
2.4	Otevřené venkovní systémy	17
3	Možnosti sklizení a sušení mikrořas.....	19
3.1	Flokulace	19
3.2	Elektrokoagulace-flotace.....	19
3.3	Odstředění	20
3.3.1	Desková centrifuga.....	21
3.3.2	Vícekomorová centrifuga	22
3.3.3	Trubková centrifuga	22
3.3.4	Dekantační centrifuga.....	23
3.3.5	Cyklon	24
3.4	Sušení rozprašováním.....	26
3.4.1	Sprejová sušárna.....	26
3.4.2	Využití tepla z energeticky náročných procesů.....	31
4	Experiment sprejová sušárna.....	32
5	Ekonomické bilance	35
6	Vybrané možnosti aplikací a dalšího vývoje	35

ÚVOD

Přestože jsou mikrořasy mikroskopické fotosyntetizující organismy, staré přes milion let, problematika s nimi spojená se neustále vyvíjí a objevují se nové možnosti jejich využití. Největší zájem byl projevem při ropné krizi v roce 2008 a od té doby ve světovém měřítku neklesl. Mikrořasy mohou být jedním z řešení potravinové krize v zemích 3. světa. Látky obsažené v mikrořasách jsou také ekonomicky zajímavé, například lipidy, k výrobě biopaliv, či extrakci omega-3 mastných kyselin. Po zpracování jsou tyto cenné látky aplikovány v bioenergetice, potravinářství, akvakultuře, jako doplněk stravy, či v medicíně. Velmi perspektivní je čištění plynů, například ze zařízení na energetické využití odpadu, nebo cementárny, kdy jsou mikrořasy schopny absorbovat CO₂ i některé další plyny, a zároveň je možno využít nízko potenciální zbytkové teplo z provozu pro vyhřívání kultivačního zařízení v chladnějších obdobích. Sekvestrace CO₂ při kultivaci snižuje negativní dopady průmyslových emisí na životní prostředí a také přináší pro firmy profit. Mohou s vykultivovanou biomasou dále obchodovat/nakládat a také jsou jim sníženy náklady potřebné na hrazení poplatků za emise CO₂, jelikož je do okolí vypustí méně. Bylo by potřeba analyzovat složení produkovaných plynů a nasadit vhodnou kulturu, což je problematika, které bych se rád věnoval v navazujícím studiu. Nicméně snížení negativních dopadů průmyslu na životní prostředí je téma, které rezonuje světem a z toho důvodu je globálně podporován výzkum i vývoj v oblasti biotechnologie mikrořas, což lze vidět na obrázku 4. Na pojem mikrořasy jsem poprvé narazil při prezentaci v předmětu Moderní energetické koncepce a bakalářská práce, kde mě téma prezentované doktorem Lošákem zaujalo, a připadalo mi jako perspektivní problematika s prostorem pro další pokrok, proto jsem o toto téma vedoucího požádal.

Cílem této práce bylo provést rešerši využívaných mikrořas, jejich vlastností a široké škály aplikací, což je důležité k porozumění této problematice. Vyhledal jsem a popsal nejpoužívanější kultury, které se v Evropě i celosvětově používají. Dále se práce zaměřila na možnosti pěstování mikrořas v oblasti střední Evropy s ohledem na specifické klimatické podmínky regionu.

Hlavním cílem práce bylo zmapování možností sklizení a sušení mikrořas, které jsou klíčové pro získání biomasy s potřebnými vlastnostmi. Procesy sklizení a sušení mohou ovlivnit kvalitu usušené kultury a vhodnost pro konkrétní aplikace. Právě ekonomická náročnost sklizení a sušení vykultivované kultury je jedním z problémů bránící v masivním rozšíření biotechnologie mikrořas.

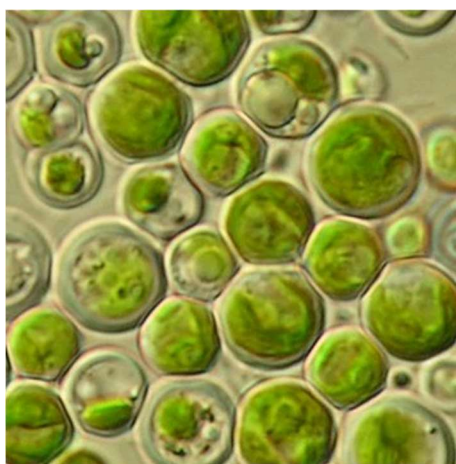
Součástí této bakalářské práce je také praktická část, a to experiment sušení pomocí sprejové sušárny, který byl proveden na CEITECU. Proběhlo také separování kultury pomocí centrifugy a sušení v laboratorní peci, přičemž výsledky jsou dále porovnány. Popsal jsem celý proces, včetně parametrů sušení a také jsem uvedl a zhodnotil výsledky pokusu.

Výsledky této práce by mohly sloužit jako základ diplomové práce zabývající se problematikou konkrétní techniky sklizení či sušení mikrořas.

1 Využívané mikrořasy a jejich vlastnosti

1.1 *Chlorella*

Chlorella, též *chlorophyta* je rod jednobuněčných zelených mikrořas, tvořící kulovité buňky velikosti 2 až 10 μm v průměru viz obrázek 1 [1]. V současné době je izolováno přes 100 druhů *Chlorelly*. Jedná se o velmi rychle rostoucí rod mikrořas, ve kterém jsou kmeny s vysokou teplotní tolerancí v mezích 15 až 40 °C. Díky vysokému růstovému potenciálu je potlačována kontaminace jinými kmeny mikrořas [1],[2]. Při vyvolání stresových podmínek (nedostatek světla, nízké či vysoké pH aj.) je schopna syntetizovat velké množství lipidů, což je vhodné například pro biopaliva. Je také spojována s bioremediací¹ odpadních vod a zachytáváním uhlíku v elektrárnách spalujících fosilní paliva[1].



Obrázek 1 *Chlorella vulgaris* [3]

Chlorella je využívána jako výživový doplněk pro lidi, je přidávána do krmiv pro domácí a užitková zvířata a aplikuje se také ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu. Svým složením je nutričně bohatá na proteiny, polysacharidy, esenciální aminokyseliny, nenasycené mastné kyseliny a karotenoidy, stejně jako na vitamíny a minerály. Poměr výše vyjmenovaných látek se mění dle fáze kultivace a nutričních podmínek [2],[4]. *Chlorella* obsahuje směs bioaktivních látek známou jako *Chlorella Growth Factor* (CGF), jež má prokázané imunostimulační vlastnosti, urychluje hojení tkání, popálenin. Prokázal se i vliv na předcházení vzniku nádorů a mnoho dalších lidem prospěšných vlastností [2].

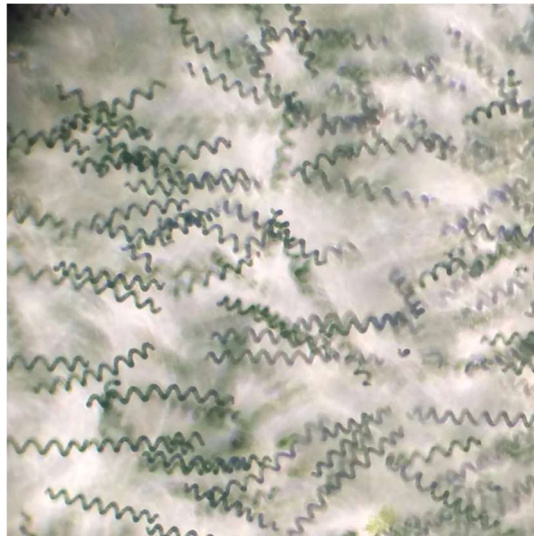
Chlorellu lze kultivovat heterotrofně, bez přístupu světla (např. ve fermentoru), viz kapitola 2.3 ,ale také fototrofně (autotrofně) viz kapitola 2.2, kdy je využívána světelná energie (otevřené kultivační systémy, fotobioreaktory) [1].

Mezi světově nejrozšířenější metody sklizení a sušení *Chlorelly* patří flokulace, flotace a centrifugace. Pokud je zvolena metoda filtrace, která není často využívána, nastává problém s velikostí zachytávaných částic a je potřeba využít modifikovaných způsobů, jako membránová filtrace, ultrafiltrace či cross-flow filtrace [2]. Při sušení rozprašováním (kapitola 3.4) je možné dosáhnout roztržení pevné buněčné stěny *Chlorelly*. Dezintegrace (roztržení) buněk může být žádaná, jelikož je zlepšena dostupnost biologicky zajímavého obsahu [1],[2].

¹ Proces, kdy se za působení živých organismů přemění toxická látka na netoxickou.

1.2 *Arthrospira (Spirulina)*

Je potřeba uvést, že mezi názvy *Spirulina* a *Arthrospira* je rozdíl, i když toto označení je i v odborné literatuře nesprávně zaměňováno jako shodné. *Arthrospira* je označení druhu, zatím co *Spirulina* je označení kmenu, a to kmenu *Arthrospira*, konkrétně *Arthrospira platensis* a *Arthrospira maxima* [1]. Nicméně je název „*Spirulina*“ využíván pro komerční účely a je na něm vybudován marketing prodeje, tedy je znám široké veřejnosti, na rozdíl od *Arthrospira*. Dále bude používáno označení *Spirulina*.



Obrázek 2 *Arthrospira platensis* [3]

Jedná se o vláknitou sinici tvořící vlákna o délce 50 až 500 μm a průměru 3-4 μm (obrázek 2). Původem je z alkalických jezer subtropických oblastí (např. Mexiko, Barma), kde byla také jako první konzumována pod názvem „dihe“. Při kultivaci vyžaduje vyšší teploty pohybující se kolem 35-38 $^{\circ}\text{C}$, pH v rozmezí 9-10,5, dále kultivační médium s vysokou alkalitou uhličitánů (k udržení stabilního pH), vysokým obsahem hydrogenuhličitánů a také závisí na salinitě prostředí. Závislost na výše uvedeném je zásadní pro existenci druhu a jeho kultivaci [1],[2]. *Spirulina* má při určitých podmínkách neobvykle vysokou rychlost fotosyntézy, nejvyšší zaznamenané hodnoty v přírodních systémech byly 47 a 57 mg O_2 za 2 dny. Množství přírodních systémů s druhem *Arthrospira* vlivem lidské činnosti klesá [3].

V současnosti se *Spirulina* využívá jako potrava, krmivo a mimo jiné i jako doplněk stravy [1]. Jako doplněk stravy byla využita i pro astronauty na vesmírných misích NASA, kdy byla přímo na palubě kultivována a sušena pomocí sprejové sušárny [2],[5]. Oproti druhu *Chlorella* nemá *Spirulina* pevnou celulóзовou stěnu, díky čemuž je snadno stravitelná a není potřeba proces narušení buněčné stěny. V klinických studiích byly prokázány účinky protizánětlivé i antialergické. *Spirulina* dokáže modulovat imunitní systém při krytí nutričních nedostatků. Je veden výzkum, kdy bylo prokázáno potlačení a zpomalení šíření buněk viru HIV. Další z příznivých účinků na lidský organismus je snížení krevního LDL (tukového) cholesterolu, zvýšení HDL (bílkovinného, prospěšného) cholesterolu. Při pokusech na křečcích byla prokázána regrese nádoru, ale studie na lidech zatím nejsou dostatečné [5].

Kultivace *Spiruliny* je realizována často v oběžných náhonech, či míchaných nádržích [2]. Kontaminace jinými řasami je vzhledem k extrémnímu prostředí, ve kterém je pěstována, v podstatě vyloučena. Vzhledem k optimální teplotě růstu (35-38 $^{\circ}\text{C}$) jsou kultivační zařízení krytována a často vytápěny odpadním teplem (např. ze zařízení pro energetické využití odpadu, cementárny), nebo jsou v provozu pouze část roku [1]. Další problém s otevřeným kultivačním zařízením jsou srážky, kdy dochází k ředění kultury a ovlivnění kontrolovaných kultivačních podmínek [1]. Lze také využívat otevřených přírodních nádrží, které mají nízké náklady na provoz a údržbu, ale také nižší produktivitu z důvodu špatného využití světla; kdy je nízký pohyb buněk, tedy médium není prosvíceno rovnoměrně a také dochází k difuzi oxidu uhličitého do atmosféry [6]. Pro *Spirulinu* je jedno z ideálních kultivačních prostředí poušť, kde

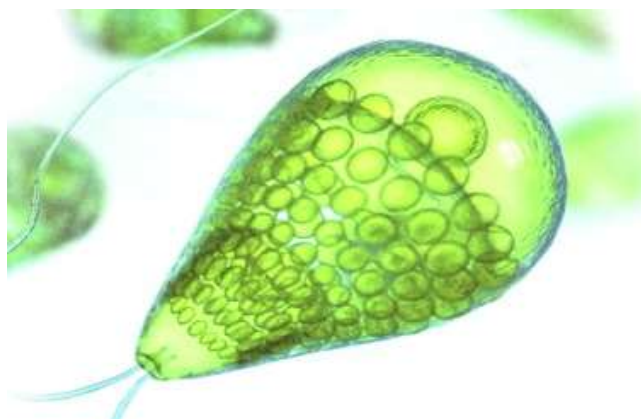
je ovšem problém s doplňováním vody kvůli vypařování [1]. V uzavřených kultivačních zařízeních, jako fotobioreaktor (PBR) je snadnější kontrolovat kultivační podmínky a také je dosahováno vyšší produkce, nicméně se zvyšují i náklady na provoz a údržbu [6].

Spirulina je také využívána pro čištění odpadních vod. Odpadní vody jsou často obohaceny dusíkem a fosforem, což je pro kultivaci vhodné [7]. Při experimentu na odpadních vodách z ocelářského průmyslu bylo dokázáno, že *Spirulina* je schopna přežít a prosperovat i při vysoké koncentraci železa v kultivačním médiu a využít ho pro svůj růst [8]. Schopnost navázání iontů těžkých kovů se nevztahuje pouze pro ionty železa, ale také např. mědi, chromu či niklu [9]. *Spirulina* je používána i pro absorpci toxických těžkých kovů jako kadmium [10]. Přítomnost bakterií v odpadních vodách poskytuje oxid uhličitý (CO₂) nutný pro fotosyntézu během kultivace *Spiruliny*, a zároveň je *Spirulinou* produkovaný kyslík využíván bakteriemi, což vytváří cirkulační zásobovací řetězec kyslíku a CO₂ [7].

Spirulina se běžně sklízí při koncentraci 1 g/l, je tedy nutné v průběhu sklizení odvést velké množství vody [1]. Vzhledem k velikosti a tvaru *Spiruliny* je často využíván způsob dehydratace vícestupňová filtrace spojená s vibračním sítem s hustou tkaninou o jemnosti přibližně 50 μm, kdy se dosahuje suspenze s 5 až 20 % pevných látek [1]. V otevřených kultivačních systémech je nejvhodnější čas pro sklizení *Spiruliny* brzy ráno z důvodu nejvyššího procenta proteinů obsaženého v buňce [6]. Další vhodné metody pro kultivaci *Spiruliny* jsou popsány v kapitole 3.

1.3 Dunaliella

Dunaliella je jednobuněčná mikrořasa mající buňky hruškového tvaru s bičíkem (viz obrázek 3), které nemají na rozdíl od *Chlorelly* pevnou buněčnou stěnu, pouze tenkou elasticitou plazmatickou membránu [11]. Velikost buněk je 5 až 29 μm na délku a na šířku 3,8-20,3 μm [1]. Jedná se o druh, který je považován za jeden z nejlepších zdrojů β-karotenu, ten může představovat až 12 % sušiny [11]. V přírodě *Dunaliella* roste v hypersalinních vodních útvech, má tedy extrémní odolnost a toleranci slanosti, nicméně takto slané prostředí má omezenou rozpustnost CO₂. Teplota optimální pro kultivaci se pohybuje od 0 °C do více než 40 °C [1]. Vysoké množství β-karotenu činí *Dunaliellu* atraktivní k využití pro výrobu přírodních barviv, doplňků stravy, antioxidantů, či krmiv [2].

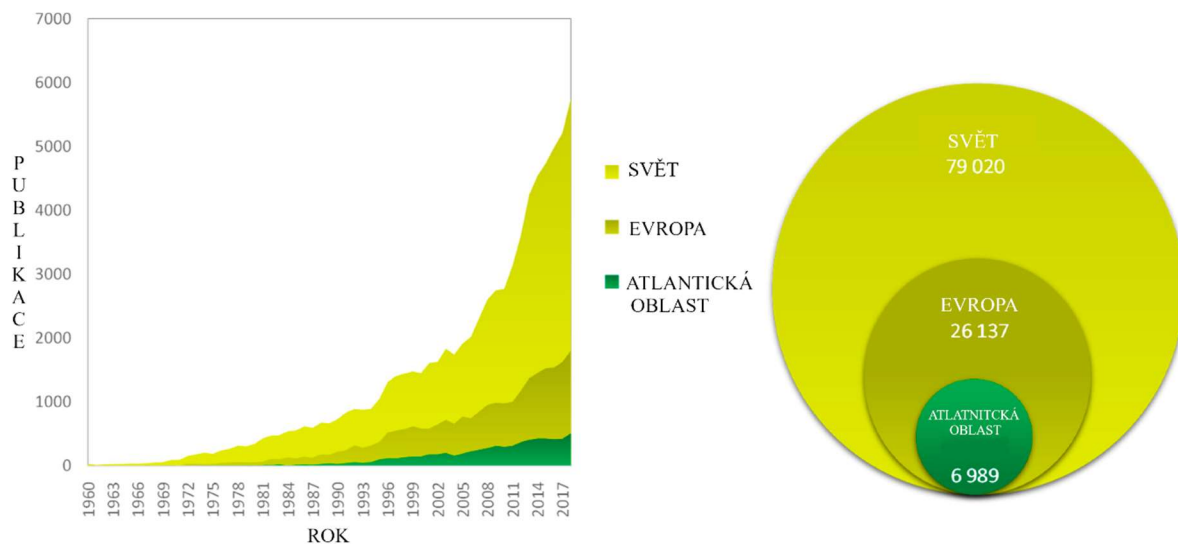


Obrázek 3 *Dunaliella salina* [12]

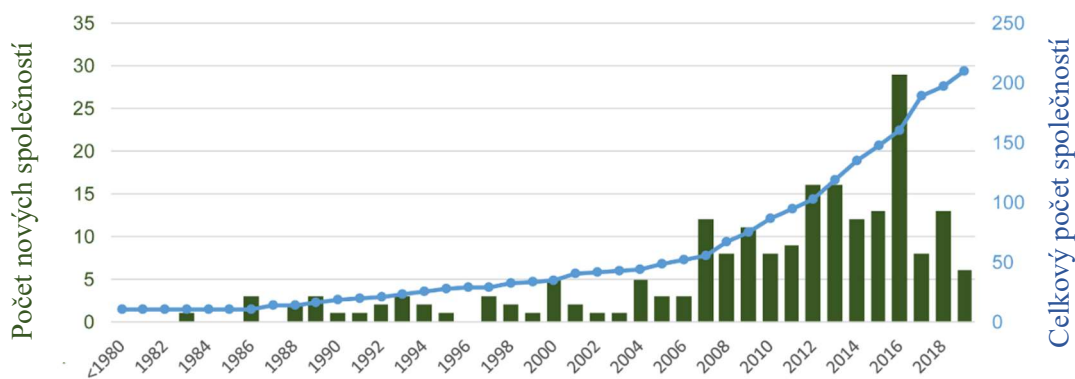
Díky vysokému obsahu lipidů je *Dunaliella* jednou z nejvhodnějších mikrořas pro výrobu biopaliv. Díky tomu, že mikrořasy nejsou primárně určeny pro konzumaci, jedná se o biopaliva 2. generace, tedy nekonkurující potravinám (jako např. bioetanol z kukuřičného škrobu) [13]. Výhody biopaliv jsou zvýšená mazačí schopnost, biologická odbouratelnost, a také snížená emise oxidu uhelnatého (CO) [12]. V roce 2021 byl proveden pokus výroby bionafty z *Dunaliella tertiolectabilis*, kdy byla dosažena výtěžnost kultivované biomasy 1,244 g/l a obsah lipidů byl 37 %. Při laboratorních pokusech bylo dosaženo provozních nákladů 3,19 USD/l na výrobu biodieselu a průmyslovým nasazením a komercializací výroby by mohly být náklady sníženy ještě o 0,77 USD/l [13].

2 Možnosti pěstování mikrořas v oblastech střední Evropy

Současné politické priority EU směřují vývoj k udržitelnější ekonomice, ochraně přírodního prostředí a také reagují na růst populace zavedením biohospodářství, mezi které je zahrnuta i kultivace mikrořas [14]. Podporu a perspektivu výzkumu tohoto odvětví lze vidět z grafické závislosti na obrázku 4, kdy je stoupající trend počtu publikací. Společně s počty výzkumů a publikací roste také počet společností zabývajících se touto problematikou, jak lze vidět v grafické závislosti na obrázku 5.

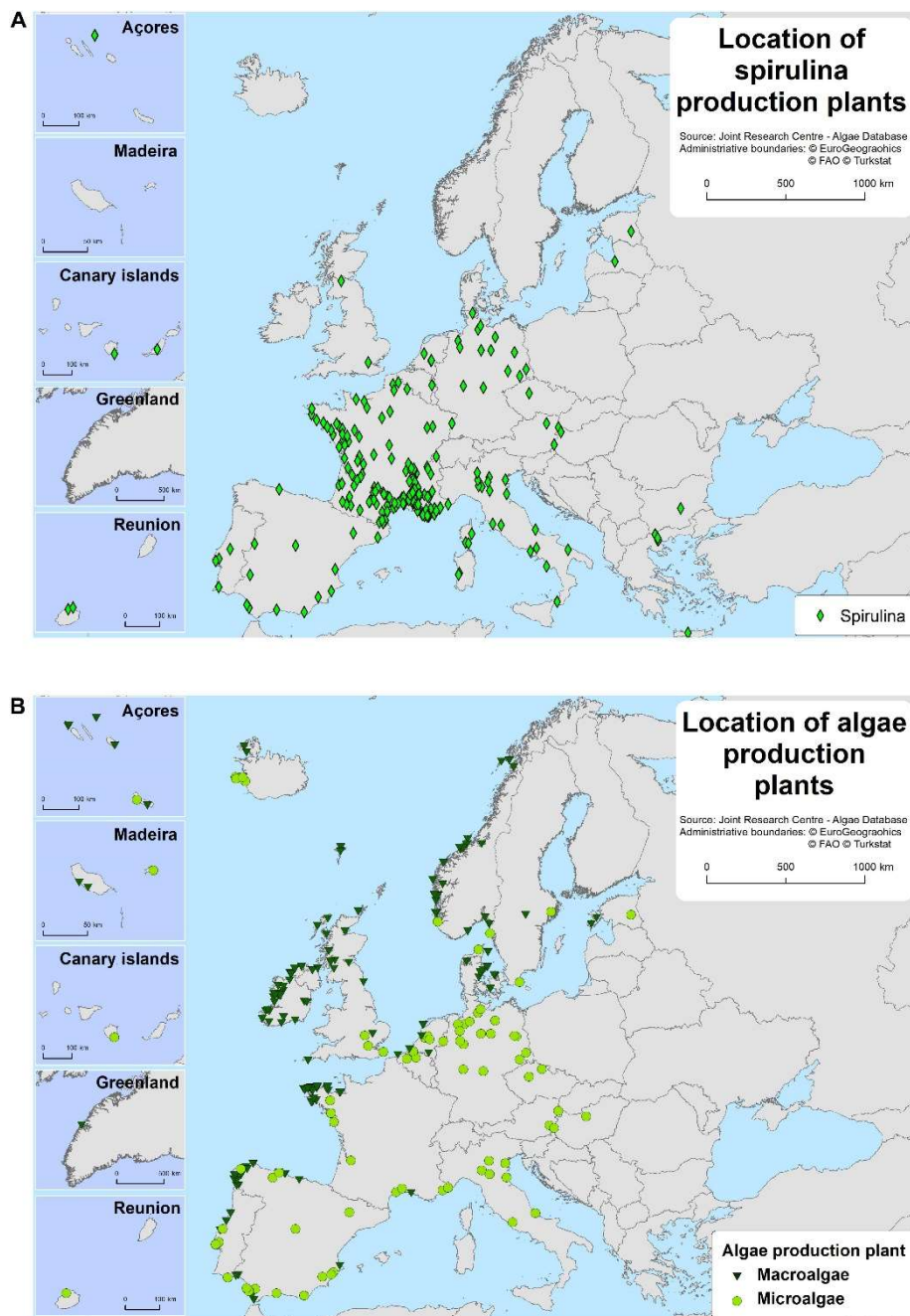


Obrázek 4 Počet publikací o mikrořasách a fytoplanktonu [15]



Obrázek 5 Počet společností produkující řasy v Evropě [16]

V Evropě patří mezi největší producenty mikrořas Německo, Francie a Španělsko, které mají na svém území největší počet producentů mikrořas. Tyto země spolu s Itálií mají nejvyšší množství producentů *Spiruliny*, kde dominuje Francie s 65 % zmapovaných výrobních jednotek v Evropě [16]. Množství a rozmístění firem zabývajících se produkcí mikro a makrořas lze vidět na obrázku 6.



Obrázek 6 Umístění firem produkujících A) *Spirulinu* B) mikro/ makro řasy [16]

Na obrázku 6 lze také vidět, že produkce mikrořas a *Spiruliny* je umístěna převážně do vnitrozemí a makrořasy jsou pěstovány v přímořských oblastech, kdy je ke kultivaci využívána mořská voda.

2.1 Kultivační metody

Pro kultivaci jsou využívány kultivační prostředí otevřená (rybníky, kaskádové systémy) uzavřená (fotobioreaktory (PBR), fermentory) a hybridní řešení, kombinující obě metody [1]. Porovnání jednotlivých metod je pro *Spirulinu* shrnuto v tabulce 1.

Tabulka 1 Srovnání kultivačních faktorů *Spiruliny* v otevřeném, uzavřeném a hybridním systému [6]

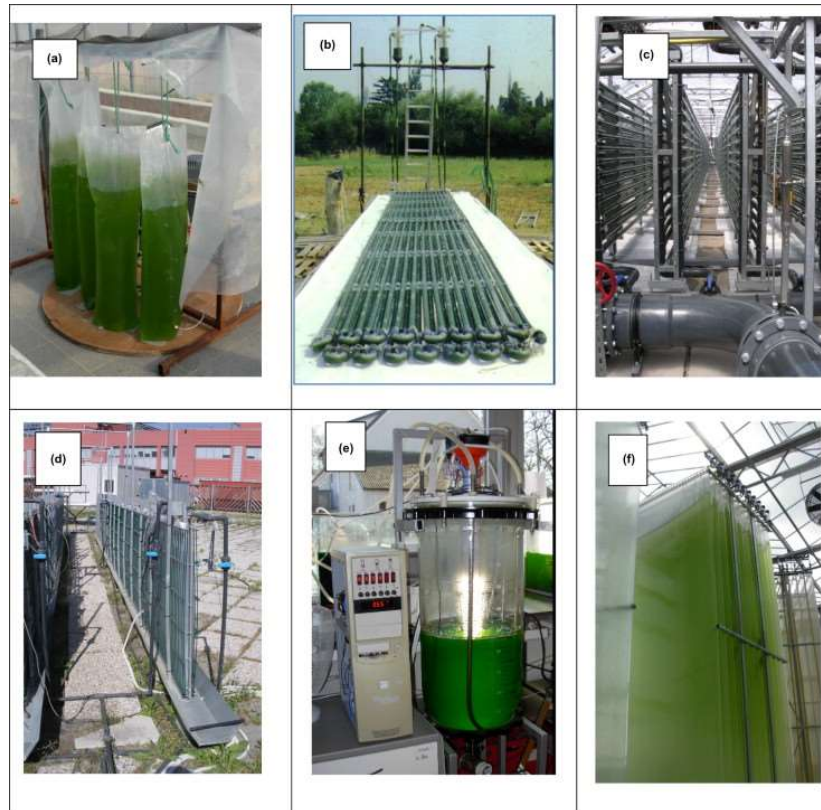
Faktor	Otevřené systémy (návodní rybníky)	Uzavřené systémy (fotobioreaktory)	Hybridní systém (Otevřené + PBR)
Požadovaný prostor	vysoký	nízký	vysoký
Poměr plocha/objem	nízký (5–10 m ⁻¹)	vysoký (20–200 m ⁻¹)	variabilní
Vypařování	vysoké	žádné odpařování	minimalizováno
Ztráta vody	velmi vysoká	nízká	minimalizováno
CO ₂ -ztráta	vysoká	nízká	minimalizováno
Teplota	vysoce variabilní	nutné chlazení	kontrolováno
Závislost na počasí	vysoká	nízká	nízká
Kontrola procesu	obtížná	snadná	obtížná
Čištění	snadné	požadované	obtížné
Kvalita biomasy	variabilní	reprodukovatelné	lepší
Koncentrace mikrořas	střední	vysoká	střední
Účinnost sklizně	střední	vysoká	vysoká
Náklady na sklizeň	vysoké	nízké	vysoké
Účinnost využití světla	špatná	dobrá	lepší
Nejnákladnější parametry	míchání	řízení kyslíku a teploty	kontrola teploty
Kontrola kontaminace	obtížná	snadná	snadná
Kapitálové investice	nízké	vysoké	nízké
Produktivita	nízká	3–5krát produktivnější	5–7krát produktivnější

2.2 Fotobioreaktory (PBR)

Fotobioreaktor (obrázek 7) je nejvyužívanějším systémem pro kultivaci mikrořas v Evropě (71 %) [16]. Jedná se o systém pro fototrofní řasy, kde jsou fotony záření hlavním zdrojem pro růst. PBR je uzavřen vůči prostředí a nedochází k látkové výměně. Nicméně průhlednými stěnami reaktoru musí projít záření, a proto je materiál těla PBR nejčastěji plast, či sklo [1]. Směs je skrz reaktor čerpána pomocí čerpadla [1]. Čerpadlo musí být voleno tak, aby nedocházelo k narušení buněk mikrořas, z čehož plyne, že není vhodné využít vysokorychlostní odstředivá čerpadla, z důvodu vysokých odstředivých účinků a také možnosti vzniku kavitace. K buňkám šetrnější jsou čerpadla peristaltická (využito i pro sprejovou sušárnu v kapitole 4) či membránová [11].

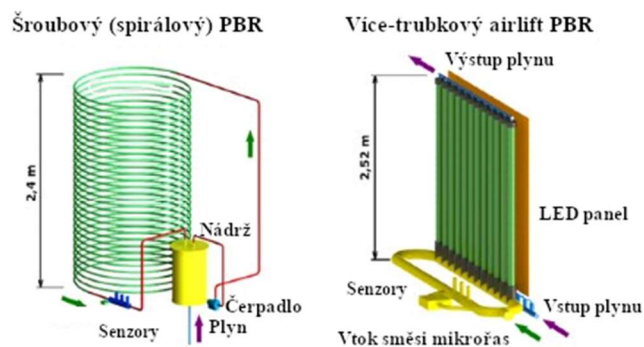
Největší výhodou tohoto typu kultivačního systému je velmi přesná schopnost řízení procesu, jako dávkování oxidu uhličitého, vody, nutrientů, optimální teplota a množství světla ozařující řasy. Dále může být kontinuálně měřena hustota kultury, provzdušnění, či množství plynů, které nedifundují do atmosféry. Kontaminace bakteriemi, nebo jiným druhem mikrořas je při dodržení vhodných postupů prakticky vyloučena. [6]

Mezi nevýhody patří náročné čištění, snížení prostupu světla do trubic a nutnost odkysličení, jelikož přebytek kyslíku snižuje růst. Náklady na výstavbu jsou přibližně o řád vyšší, než u systémů otevřených. [11]



Obrázek 7 Fotobioreaktory a) polybasy b) vertikální c) horizontální d) deskový e) vertikální s vnitřním osvětlením f) fóliový [17]

Vícetrubkové airlift PBR nemají čerpadlo k čerpání směsi mikrořas, ale k uvedení směsi do pohybu je využíváno probublávání plynů přivedených spodní části reaktoru. Kromě PBR uvedených výše jsou i reaktory spirálové (obrázek 8), které ale podle studie Sukačová a kol. (2021) [18] vykazují vyšší spotřebu energie např. v porovnání s vícetrubkovým airlift PBR při podobné produkci. [18]



Obrázek 8 Schéma šroubového PBR a více-trubkového airlift PBR [18] (upraveno)

2.3 Heterotrofní fermentory

V současnosti jsou v Evropě využívány minoritně přibližně pouze v 10 % [16]. Kultura je pěstována heterotrofně, tedy bez přístupu světla; tuto vlastnost mají např. *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Haemato-coccus* a další. Kultivační médium musí obsahovat anorganické soli a organický substrát jako zdroj energie [2]. Požadavkem je, aby pěstovaná kultura nebyla nijak kontaminována a fermentor a kultivační médium byly před kultivací sterilizovány [11].

Výhody fermentoru jsou podobné jako u PBR, tedy možnost řídit teplotu, pH, zajistit rovnoměrné míchání a vysokou kontrolu nad procesem. Další výhodou je vysoká koncentrace biomasy a to až 100 g/l s produktivitou 10 g/l za den. [2]

Nevýhodou jsou vysoké náklady spojeny s nutnou čistotou procesu a zamezení kontaminace, dále se tvrdí, že použití uhlíkových substrátů má vyšší uhlíkovou stopu než autotrofní produkce. [16]

2.4 Otevřené venkovní systémy

Otevřené systémy vyžadují nižší investiční a energetické náklady. Dnes jsou otevřené systémy nejčastěji využívané pro masovou produkci *Spiruliny* či *Chlorelly* v Evropě. Většina zemí v Evropě má suboptimální podmínky pro venkovní kultivaci; tedy nelze kultivovat celoročně kvůli nutnosti udržování teploty a ekonomické nevýhodnosti [16].

Mezi otevřené systémy se řadí umělá jezírka, náplavky, kaskády. Je vyžadována velká plocha dle požadovaného množství biomasy od stovek metrů čtverečních až po stovky hektarů [11]. Jakákoliv kontrola a ovlivňování kultivačních podmínek je velmi náročná. Je potřeba zajistit míchání k optimální distribuci slunečního záření, což bývá zajištěno oběžnými čerpadly, rotujícími rameny, lopatovými koly, či pomocí stlačeného vzduchu [2]. Problém vznikající s otevřenými systémy je kontaminace jinými organismy [6]. Kvalita promíchávání výrazně ovlivňuje množství vyprodukovaných mikrořas a to hlavně v hlubších systémech, obecně je snaha dosáhnout co nejmenší hloubky a nejlepší cirkulace, aby se dosáhlo optimálního prosvícení [11].

Systémem splňující tyto kritéria byl vyvinut v Mikrobiologickém ústavu Akademie věd v Třeboni (obrázek 9c). Jedná se o systém s nakloněnými kaskádovými povrchy. Tloušťka vrstvy suspenze je pod 1cm, kde proudí turbulentně, aby se zabránilo samo zastínění. Díky této vlastnosti je možno dosahovat vysoké hustoty biomasy 25 až 35 g/l. Produktivita 40 g·m⁻²·den⁻¹ sušiny lze dosáhnout i v mírných podnebných pásmech. Systém není dosud rozšířen, dle výzkumných pracovníků z důvodu vyšších staveních nákladů oproti klasickým jezírkům. [11]



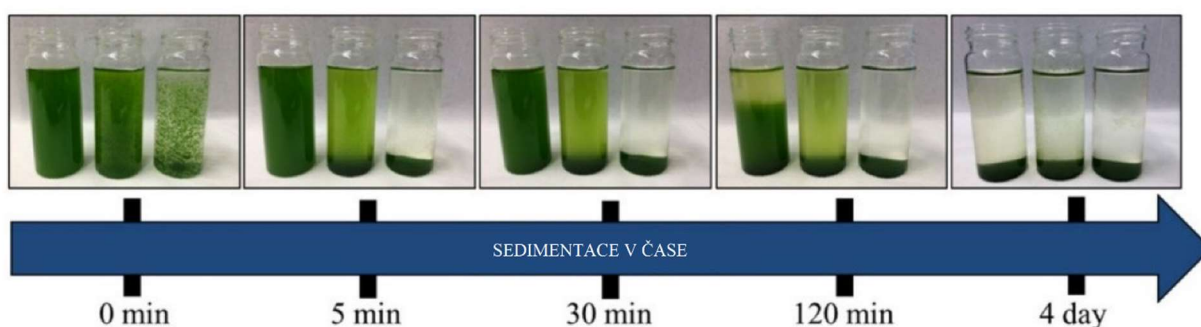
Obrázek 9 Otevřené kultivační systémy a) "Raceway" rybník s lopatkovým kolem 2500 l b) kruhový rybník s rotačním ramenem 100 l c) systém nakloněných ploch uspořádaných do kaskád (Třeboň) tři modely po 2200 l

3 Možnosti sklizení a sušení mikrořas

3.1 Flokulace

Flokulace je rozšířený způsob, který je používán nejen pro sklizení mikrořas, ale také např. v čistírnách odpadních vod (ČOV). Princip je založen na tvorbě agregátů (vloček, anglicky flocs). Flokulaci je možno vyvolat různými způsoby a to chemicky, např. přidáním Zn^{2+} , Al^{2+} , Fe^{3+} , polymeru, nebo jiných flokulantů [19]. „Ideální flokulační činidlo by mělo být levné, netoxické, účinné při nízkých koncentracích a nemělo by negativně ovlivňovat následné zpracování biomasy.“ [20] Dalším způsobem je změna kultivačních podmínek aplikací extrémního pH, zamezení přísunu živin, nebo změnami teploty. Takto vyvolaná flokulace se nazývá autoflokulace. Buňky mikrořas mají na povrchu negativní náboj, který zabraňuje jejich shlukování. Přidáním koagulačního činidla dodáme kladný náboj, na kterém začnou vznikat agregáty mikrořas [19].

Na obrázku 10 lze vidět průběh procesu flokulace a následnou sedimentaci 3 různých vzorků s různým množstvím flokulantu.



Obrázek 10 Znárodnění flokulace a sedimentace [21]

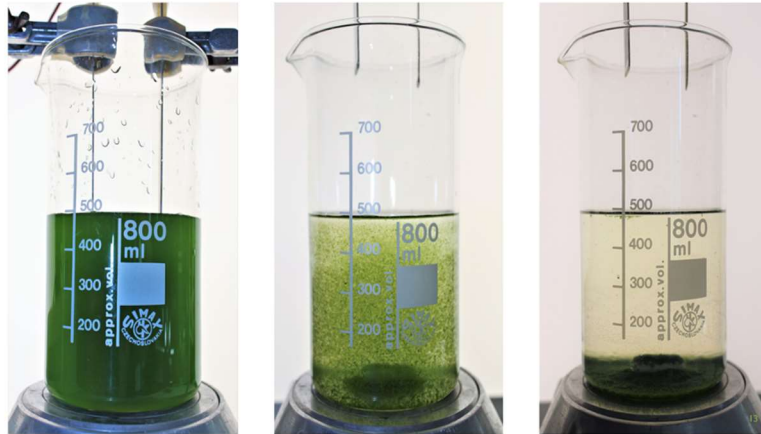
Jedná se o snadnou a efektní metodu, která ale není pro mikrořasy vhodná v průmyslovém měřítku, kvůli nutnosti odstranění činidla z média, aby mohlo být znovu použito, což zvyšuje náklady a čas potřebný na sklizení [22]. U metod, kdy měníme pH, zamezíme přísunu živin, či měníme teplotu, vzniká riziko ztráty kontroly nad procesem a nežádoucí změny ve složení buněk a taktéž je třeba následná úprava média [1].

Třetí metodou flokulace je biologicky indukovaná flokulace bakteriemi, také aplikována např. u ČOV. Při výběru vhodné mikrořasy a bakterie, není potřeba přidávat chemický flokulant a upravovat médium, což snižuje výsledné náklady. Produktivita takto flokulujících mikrořas se ale ukázala jako nižší a ekonomicky nezajímavá. [19]

V průmyslovém měřítku se v dnešní době často používá kombinace flokulace a centrifugy. Flokulace výrazně zmenší objem až na 30% tuhé složky, který projde procesem centrifugace, čímž se výsledné náklady snižují [23].

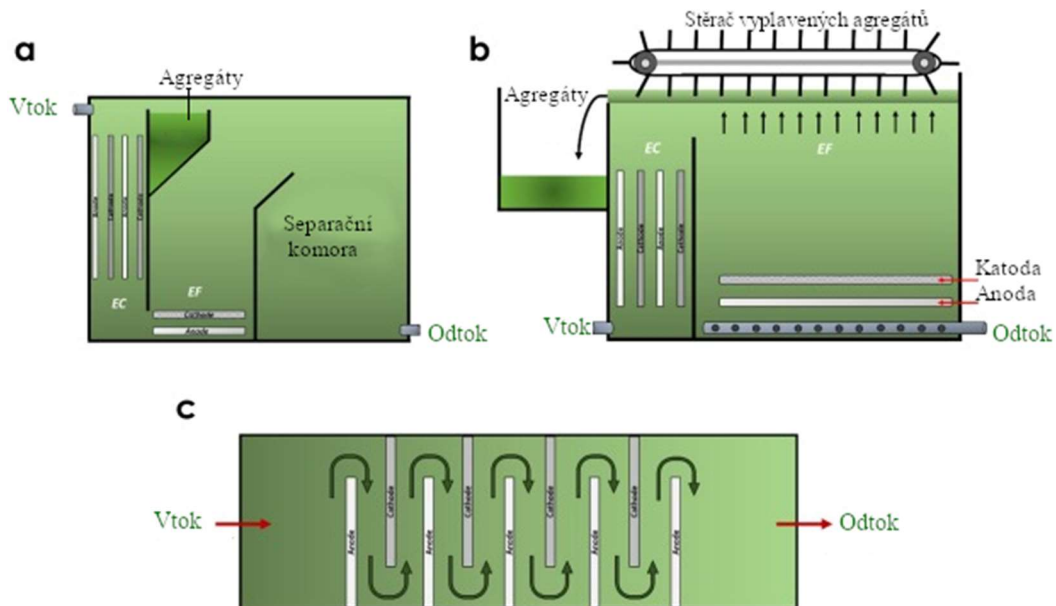
3.2 Elektrokoagulace-flotace

Elektrokoagulace-flotace (ECF) (obrázek 11) je založena, obdobně jako flokulace na uvolňování kationtů, ale tentokrát pomocí elektrochemické reakce, což usnadňuje kontrolu procesu a předchází ztrátě kultury. Během ECF se se ionty hliníku a/nebo železa uvolňují do roztoku oxidací anody a tvoří hydroxidy kovů, které působí jako koagulační/flokulační činidla, ale vzniká problém s kontaminací produktu a kultivačního média [23]. Vznik hydroxidů kovů výrazně ovlivňuje také pH, které udává poměr mezi kladnými a zápornými ionty v roztoku [24]. V průběhu procesu je přiváděn do roztoku OH^- , který vytváří mikrobubliny, a ty vyplaví agregáty mikrořas na hladinu, což usnadňuje jejich následný sběr [23].



Obrázek 11 Proces elektrokoagulace I (zleva elektrolyza, koagulace, sedimentace)

Na obrázku 12 jsou znázorněny druhy EFC reaktorů, které mohou být připojeny přímo na bioreaktor [23].

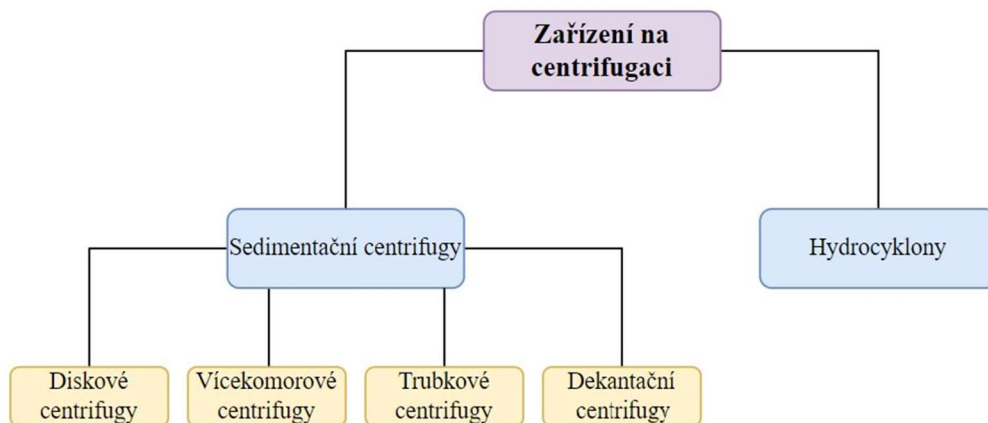


Obrázek 12 Základní konstrukce EFC reaktorů [23]

Systém ECF má velký vliv hlavně z hlediska kontinuálního bioreaktoru, suspenze neustále protéká harvestorem a proces sklizení a následného růstu je nepřetržitý. Tento proces lze snadněji integrovat do rozsáhlých kultivačních systémů ve velkých měřítkách [23].

3.3 Odstředění

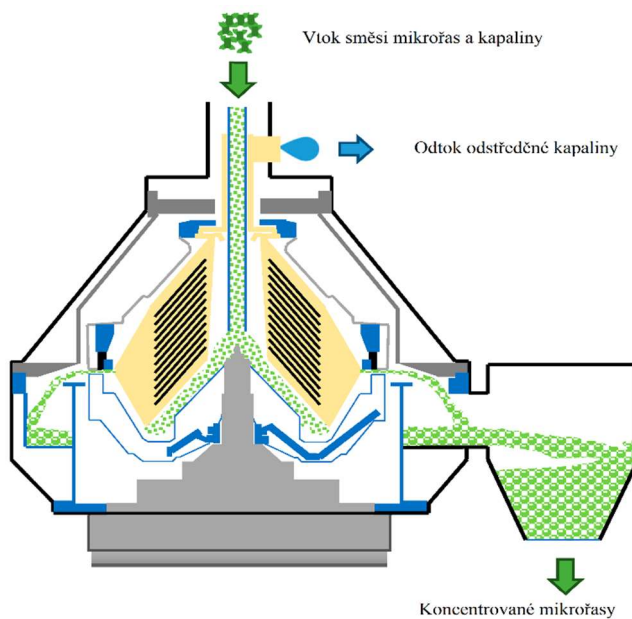
Jde o rozšířenou metodu s účinností blížíící se 100 %. Kultivační medium a mikrořasy mají rozdílnou hustotu, což vede k různému působení odstředivých sil a k separaci biomasy od média. Odstředění (centrifugace) se vzhledem k velkému objemu a relativně nízké hustotě mikrořas v médiu používá jako 2. stupeň separace kvůli energetické náročnosti procesu, kdy může být dodaná energie vyšší než přijatá. Například energie spotřebovaná na sklizeň a odvodnění může být i 4krát větší, než energie, kterou bychom z mikrořas dostali přeměnou na biodiesel [25]. Proto je vhodné předradit centrifugaci separační techniky a snížit objem, který projde přes centrifugu a tím zlepšit energetickou bilanci. Jeden z problémů může být poškození buněk kvůli vysokým silám, což může zapříčinit snížení účinnosti a koncentrace, ale ne vždy poškození musí vadit. Druhy centrifug lze rozdělit dle obrázku 13 [26].



Obrázek 13 Rozdělení centrifug [25]

3.3.1 Desková centrifuga

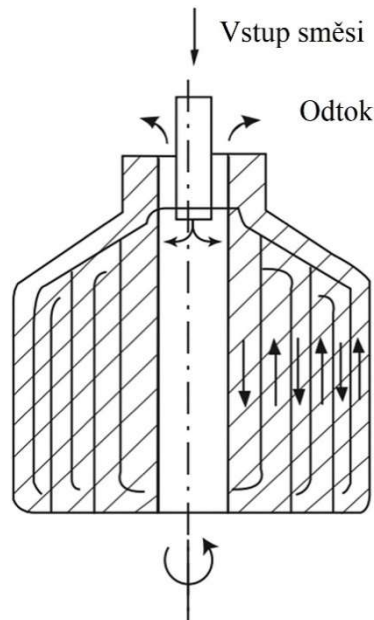
Jedná se o nejběžnější druh odstředivky pro separaci biomasy. Je složena z mělké válcové nádoby umístěné mezi dvěma disky [25]. Jde použít nejen pro separaci pevných látek z kapaliny, ale i pro separaci kapalin o různé hustotě při výrazném zvýšení odstředivých sil [27]. Separace je velmi účinná a rychlá, vzhledem k odstředivé síle 4000krát až 14000krát vyšší, než je síla gravitační. Pevné částice s vyšší hustotou jsou vytlačovány od osy otáčení směrem na stěny nádoby. Vytlačený materiál může zůstat v těle centrifugy, nebo může být vypuštěný dle mechanismu vypouštění. Největší nevýhodou diskové centrifugy (obrázek 14) je také vysoká energetická náročnost [25].



Obrázek 14 Desková centrifuga [28]

3.3.2 Vícekomorová centrifuga

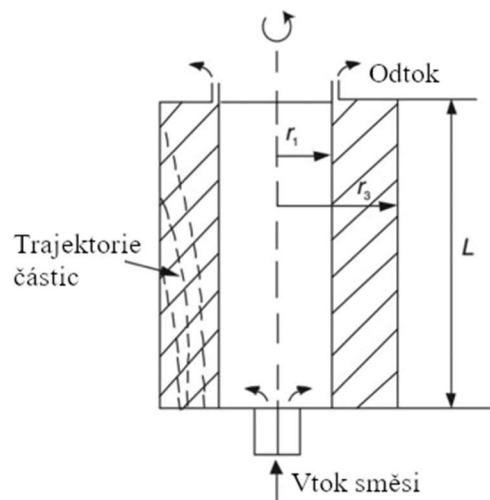
Je složena z více komor, konkrétně trubkových misek uspořádaných koaxiálně. Toto uspořádání zapříčiňuje, že v každé komoře jsou vlivem odlišných odstředivých sil zachyceny částice o různých velikostech. Vstupní směs vtéká trubicí k deskám na nejmenším průměru a postupuje až k největšímu. Zrychlení působící na směs se tedy při průchodu zařízením zvyšuje. Tato konfigurace není pro biomasu a odstředování pevných látek velmi vhodná z důvodu častého zapřádání a nutnosti ručního a časově náročného čištění [25]. Vícekomorová centrifuga (obrázek 15) není pro sběr mikrořas vhodná.



Obrázek 15 Vícekomorová centrifuga [25]

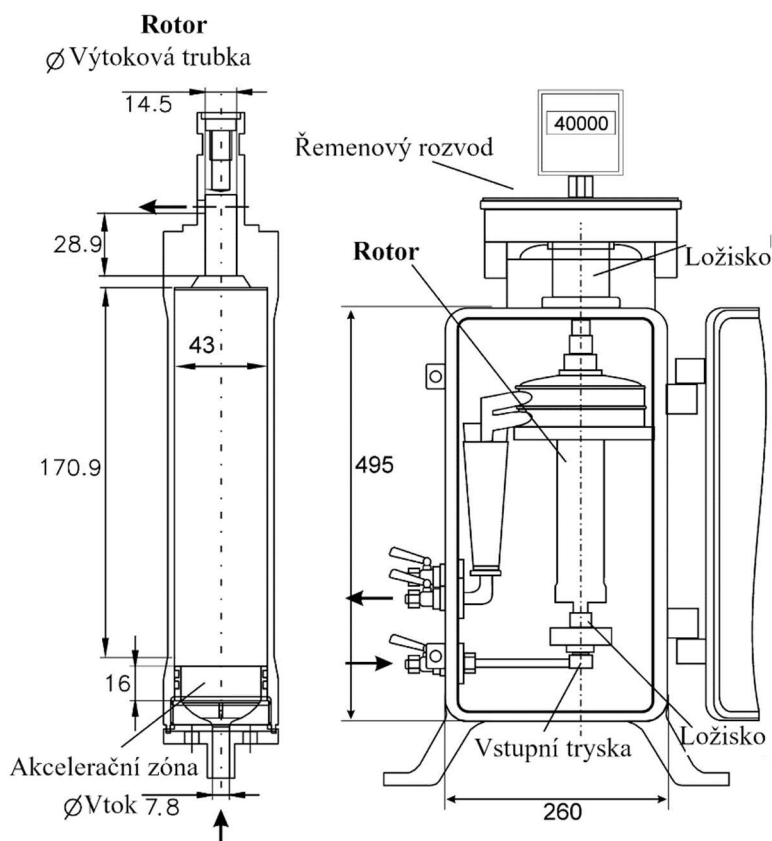
3.3.3 Trubková centrifuga

Je založena na velmi jednoduché geometrii. Skládá se z trubky, kde délka je mnohem větší než průměr. Zařízení je vertikálně uloženo v ložiscích na obou koncích. Vstupní směs vtéká dnem, tok je vertikální, s výjimkou oblastí vstupu a výstupu. Trubková centrifuga (obrázek 16) pracuje při nejvyšších otáčkách ze všech uvedených typů centrifug. V důsledku vysoké odstředivé síly se pevné částice chtějí pohybovat v radiálním směru, zatímco kapalina ve směru axiálním. [25]



Obrázek 16 Trubková centrifuga [25]

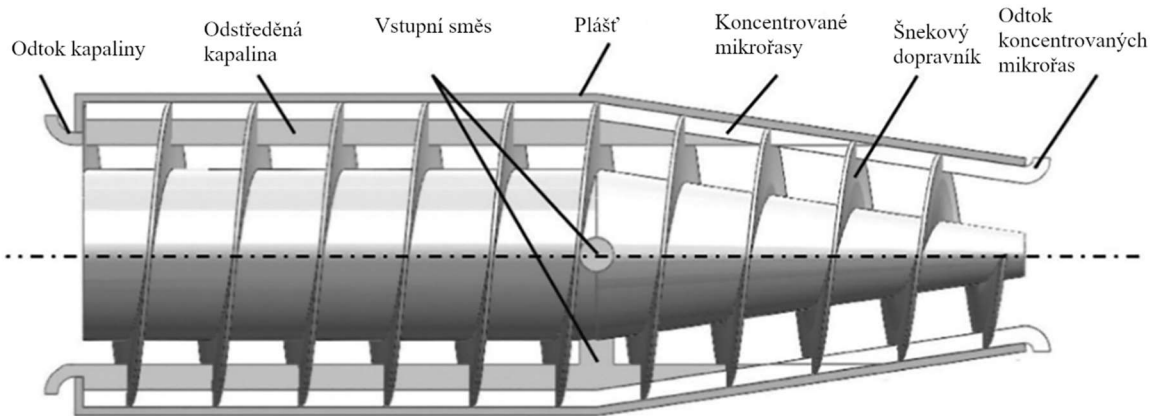
Tato centrifuga je považována za jednu z neúčinnějších pro částice o velikosti jednotek μm . Výzkum proveden Gerardem a kol. (2015) [29] uvádí účinnost sklizně blíží se 100% při použití centrifugy pracující při 13 000 g [29]. Lze vygenerovat přetížení až 45 000g [25]. Řez trubkové odstředivky (obrázek 17) popisuje rozměrovou konfiguraci laboratorní centrifugy pro separaci biologických produktů [30]. Na obrázku 17 lze vidět, že výtokový otvor pro kapalinu a suspenzi s částicemi je různý. Pro kapalinu je využit výtok umístěný výše, jelikož kapalina bude mít menší hustotu. Směs kapaliny a mikrořas využívá výtok umístěný pod výtokem kapaliny, nejhustější směs mikrořas se bude sedimentovat ve spodní části rotoru [30]. Tato sedimentace je hlavní nevýhodou tohoto typu centrifugy, jelikož je nutné pro odstranění sedimentu zařízení zastavit, částečně rozložit a manuálně vyčistit, což brání kontinuitě procesu pro velké objemy, ale pro malé kultivační systémy je vhodná jako 2. stupeň dehydratace.



Obrázek 17 Trubková centrifuga (rozměry v mm, parametry motoru ve Watech) [30]

3.3.4 Dekantační centrifuga

Pro sběr řas je tento typ velmi rozšířený a mimo jiné také hodně využíván pro odvodnění kalu ze stanic ČOV. Skládá se z horizontálně uloženého válcově-kónického bubnu, ve kterém se nachází šnekový dopravník (obrázek 18) [25]. Trubka i šnekový dopravník se otáčí stejným směrem, ale různou úhlovou rychlostí. Směs vstupuje středem šneku, odkud se dostává do prostoru mezi plášť a šnekový šroub. Vlivem odstředivých účinků se hustější směs usazuje na stěně bubnu, odkud je tlačena šnekovým dopravníkem přes kónickou část k výpusti. Díky této kónické části není dovoleno, aby kapalina vytékala výpustí pro směs a vytéká výpustí v jiné části odstředivky [31].

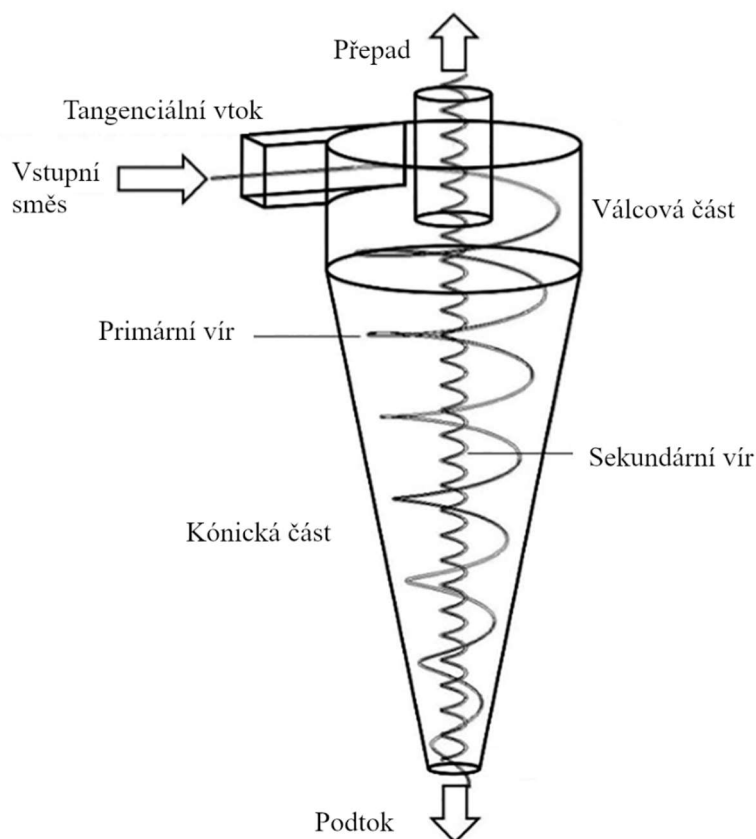


Obrázek 18 Dekantační centrifuga [25]

Vzhledem k nutnosti pohonu šnekového dopravníku a pláště, je tento typ energeticky náročný. V provedených experimentech se dosahovalo nízké koncentrace odstředěné směsi ze vstupní suspenze, za vynaložení velkého množství energie [25]. Tento typ je pro dehydrataci mikrořas nevhodný kvůli ekonomické nevýhodnosti.

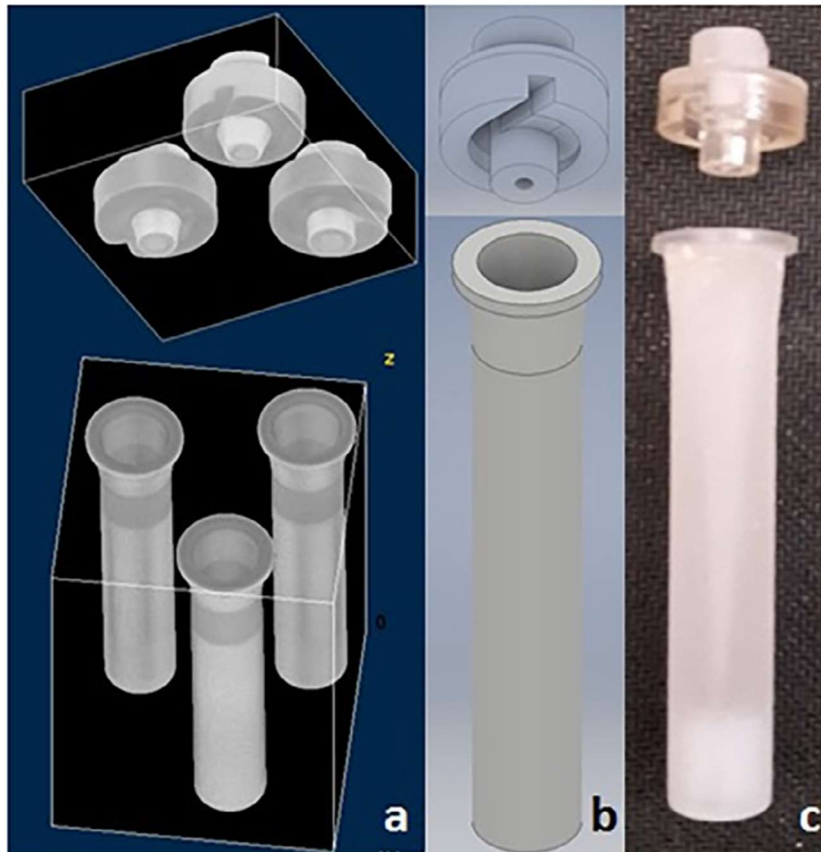
3.3.5 Cyklon

Cyklon, též vírový odlučovač (obrázek 19), se skládá z vertikálně uložené válcové části napojené na část kónickou. Vstupní směs je přiváděna tangenciálně zvýšenou rychlostí do válcové části, čímž je vytvořen krouživý pohyb směsi po obvodu nádoby. Část směsi s nižší hustotou se odděluje a vytéká přepadovou trubkou, částice s vyšší hustotou postupují níže hydrocyklonem a vytékají podtokem [25].



Obrázek 19 Schéma cyklonu [25]

Mikrořasy rostou v řídkých suspenzích, proto je ekonomicky nevýhodné použít konvenční cyklony jako 1. stupeň odvodnění vzhledem k objemu média, který by musel být zpracován. Různé druhy mikrořas mají různou toleranci k tangenciálním silám, kterými jsou při centrifugaci obecně zatěžovány, což může vést k narušení buněčných stěn. Poškození může a nemusí vadit, dle určení použití [32]. V roce 2017 byl technikou 3D tisku vyvinut mini-cyklon (na obrázku 20) o průměru 5 mm a s kladným výsledkem testován na sklizeň mikrořas. Tento design cyklonu využívá recirkulaci podtoku do napájecí nádrže, čímž zvyšuje svou účinnost. Při odvodňování mikrořas bylo mini-cyklonem dosaženo za stejnou dobu 7,13krát vyšší koncentrace než u konvenčního desingu [33].



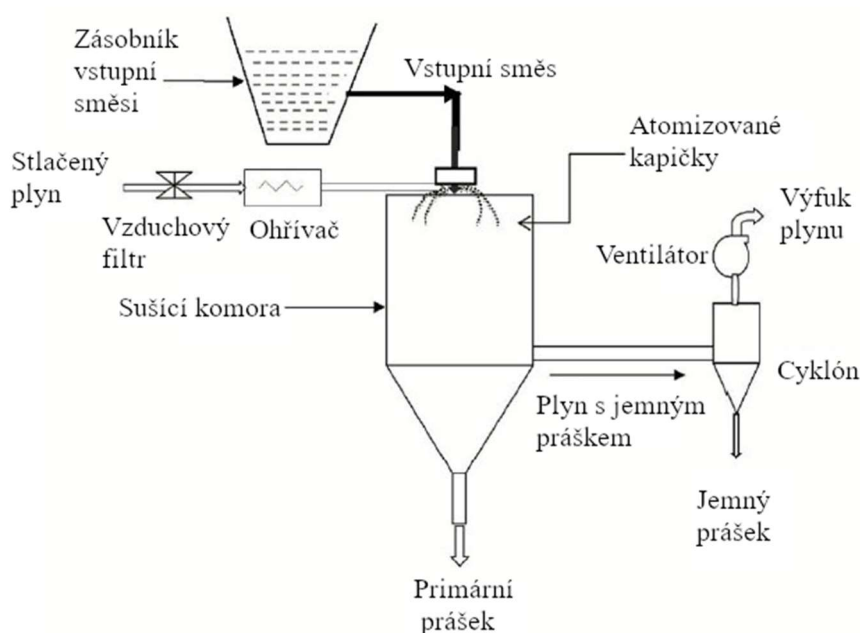
Obrázek 20 Hydrocyklon-chéma Mini-cyklon a)rentgenový sken b) CAD model c) 3D výtisk [33]

3.4 Sušení rozprašováním

Sušení rozprašováním je jednou z nejuhodnějších metod přeměny potravinářských a farmaceutických roztoků na práškovou formu. Jedná se o proces automatizovaný, kontinuální se zachováním vysoké čistoty výsledného produktu. Směs mikrořas je pomocí trysek rozstříkována na vysoce dispergované kapičky a přivedena do kontaktu s horkým plynem. Objem horkého plynu musí být dostatečný, aby došlo k úplnému a rychlému odpaření vlhkosti ze vstupní směsi [34].

3.4.1 Sprejová sušárna

Jedná se o zařízení, kde je v jednotkové operaci odstraněna vlhkost. Sprejová sušárna (obrázek 21) se skládá z přívodní části vstupní směsi a přívodní části stlačeného ohřátého plynu. Vstupní směs je rozprašována a mísená s proudem ohřátého plynu, což vede k odpaření vlhkosti vstupní směsi. Hrubší směs zbavena vlhkosti propadáva sušící komorou do zásobníku. Jemnější je odváděna spolu s plynem výstupním otvorem a následně separována pomocí cyklónu. [35]



Obrázek 21 Sprejová sušárna [34]

Princip sprejové sušárny lze rozdělit do 4 kroků. Atomizaci a rozptýlení sušené směsi na jemné kapky, kontakt kapek a horkého plynu, odpaření kapaliny a vznik prášku.

První krok zahrnuje atomizaci a rozstřík vstupní směsi na jemné kapky, čímž se výrazně zvětší povrch, na kterém dochází k přenosu tepla a hmoty, a tím se ohřev kapaliny a následné odpaření urychlí viz tabulka 2. Platí závislost, že čím vyšší je vynaložená energie k dosažení atomizace, tím menší jsou kapičky. V tabulce lze vidět zvětšení hypotetické povrchové plochy o objemu $0,524\text{m}^3$ o průměru 1 m, při rozpadu na dané množství kapek. [34]

Tabulka 2 Změna povrchové plochy v závislosti na počtu kapek, při zachování stálého objemu [34] (upraveno)

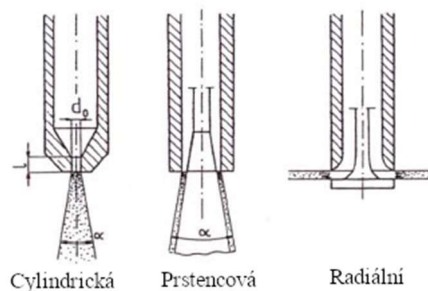
Celkový objem kapek [m^3]	Průměr kapek	Počet kapek	Plocha jedné kapky	Celková kontaktní plocha [m^2]	Poměr povrchů
0,524	1 m	1	$3,14\text{ m}^2$	3,14	1
0,524	1 cm	$1 \cdot 10^6$	$3,14\text{ cm}^2$	314,16	100
0,524	1 mm	$1 \cdot 10^9$	$3,14\text{ mm}^2$	3141,59	1000
0,524	100 μm	$1 \cdot 10^{12}$	$0,0314\text{ mm}^2$	31415,93	10000
0,524	1 μm	$1 \cdot 10^{18}$	$3,14\text{ }\mu\text{m}^2$	3141592,65	1000000

K atomizaci (tvorbě kapiček) je možno použít mnoho typů atomizérů. Jejich volba závisí na druhu a viskozitě směsi. Pro menší zpracovávané objemy lze použít kapalinové, vířivé, či ultrazvukové trysky. Pro větší objemy jsou vhodné diskové atomizéry, nebo vysokotlaké vířivé trysky. Ideální je vytvořit tenkou vrstvu rozstříkávaných kapek s dutým jádrem (např. dutý kužel), kde nedochází k pomalejšímu schnutí jádra [35].

Dělení atomizérů:

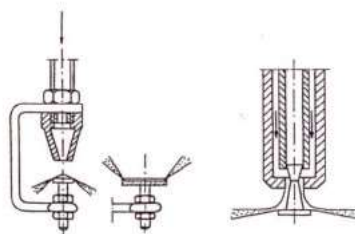
- Tlakové
 - S jednoduchou tryskou
 - Deflekční
 - Vířivé
- Rotační
 - Diskové
 - S rychloběžným kolem
- Pneumatické

Tlakové atomizéry mohou být svou konstrukcí velmi jednoduché. Atomizér s jednoduchou tryskou (obrázek 22) je zakončen otvorem cylindrického tvaru, prstencem, či radiální tryskou. Nevýhodou tohoto typu je výstup kapaliny ve formě paprsku a malý rozprašovací úhel, díky čemuž je obtížný rozpad kapaliny na kapky. [36]



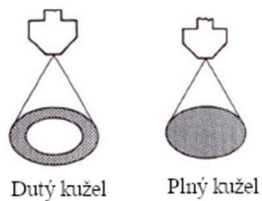
Obrázek 22 Využívané tvary trysky u jednoduchých atomizérů [36]

Deflekční atomizér (obrázek 23) je spojení jednoduché trysky a povrchu, o nějž se kapalina tříští. Výsledný tvar proudu aerosolu je závislý na tvaru deflektoru. Deflekční atomizér pracuje s nízkými tlaky, tedy lze atomizace dosáhnout při nízkých rychlostech. [37]

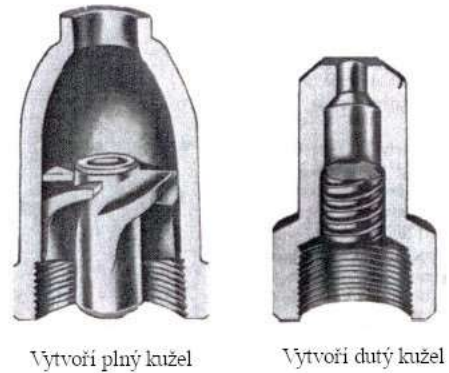


Obrázek 23 Deflekční atomizér [36]

Vířivými atomizéry (obrázek 25), na rozdíl od atomizéru s jednoduchou tryskou, je možno dosáhnout vyššího rozprašovacího úhlu. Tento jev je zapříčiněn rotačním pohybem kapaliny, tedy působením odstředivých účinků. Díky těmto jevům je výsledný tvar aerosolu kuželový a dle druhu atomizéru je dutý, či plný (obrázek 24). Tento druh atomizérů je v praxi jeden z nejpoužívanějších, především díky svým výhodám jako jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost, nízká spotřeba energie. [34]

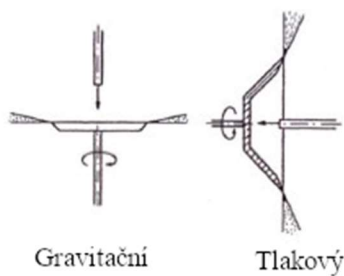


Obrázek 24 Druhy kuželů [36]

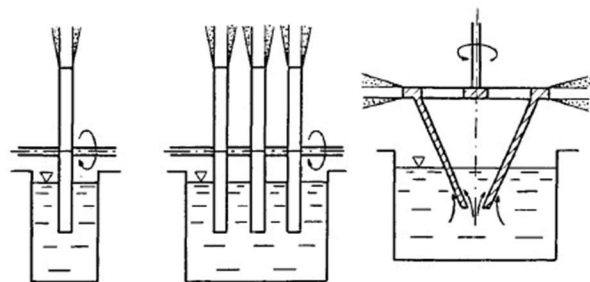


Obrázek 25 Vířivé atomizéry [36]

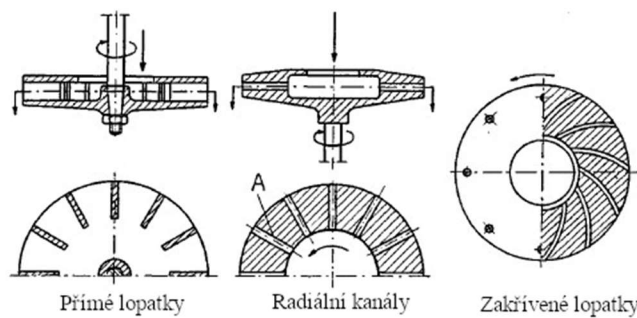
Rotační atomizér (obrázek 28) je složen z diskového kola nebo kola s radiálními lopatkami či kanály a trubice sloužící k přívodu směsi. K atomizaci je využívána energie dodaná nikoli tlakem, ale urychlením směsi na rotující části atomizéru. Směs je přivedena do sušící komory trubici (obrázek 26), či broděním (obrázek 27) a rotujícím kotoučem/kolem následně vlivem dostředivých účinků atomizována na jemné kapky. Velikost a míra provzdušnění produktu je ovlivněna úhlovou rychlostí a konstrukcí rotujícího kola. Nevýhodou je potřeba větší sušící komory v porovnání s například tlakovými, a také usazování produktu na stěnách sušící komory. Osa rotace může být vertikální i horizontální (častěji využívána) a podle toho je volen gravitační či tlakový přívod směsi (obrázek 26). [34], [36]



Obrázek 26 Způsob přívodu média trubicí [36]



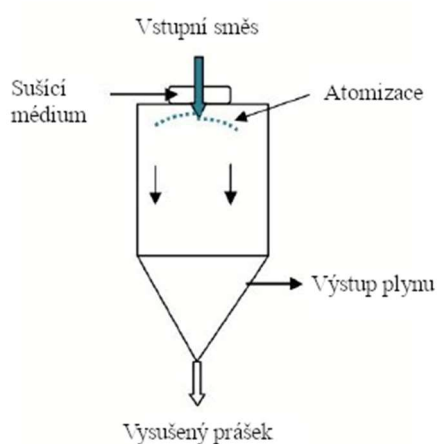
Obrázek 27 Způsob přívodu média broděním [36]



Obrázek 28 Některé druhy rotačních atomizérů [36]

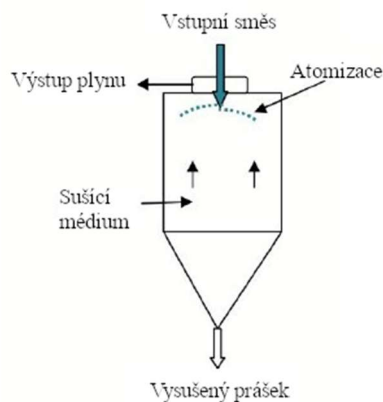
Druhým krokem je kontakt horkého plynu s atomizovanou směsí. Jako horký plyn je možno použít ohřátý vzduch či inertní plyny. Nelze použít jakýkoliv plyn z důvodu možnosti nežádané reakce se sušenou směsí. Při ideálním průběhu procesu je vysušený prášek dostatečně zbaven vlhkosti ještě před dopadem na stěny sušící komory, což usnadní následné shromáždění vysušeného produktu. Kontakt kapek a horkého vzduchu je možno realizovat v souproutém směru, nebo protiproutém. [34]

Souprouté provedení (obrázek 29) je vhodné pro sušení směsí, jež jsou citlivé na vysoké teploty. Tedy pokud bude nutné tepelně nepoškodit mikrořasy z důvodu plánovaného využití. Při této konfiguraci se atomizovaná směs a sušící médium pohybují stejným směrem. Při vstupu směsi a sušícího média dochází ke kontaktu nejsuššího a nejteplejšího plynu a směsi s nejvyšší vlhkostí. Postupně se sušící médium ochlazuje, a proto nedochází k výraznému přehřívání schnoucí směsi [34]. Vysoká rychlost odpařování umožňuje, aby byla teplota sušeného produktu výrazně nižší než sušeného média. Teplota vstupní směsi se pohybuje v rozmezí 150 °C až 220 °C, což způsobuje okamžité odpaření kapaliny a ochlazení na teploty pohybující se typicky 50 °C až 80 °C [34], [37].



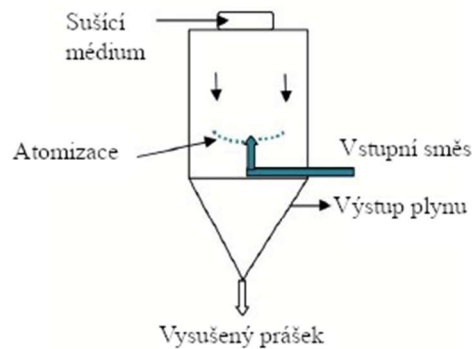
Obrázek 29 Schéma souprouté sprejové sušárny [34]

Protiprouté provedení (obrázek 30) je charakterizováno vstupem atomizovaných kapek a sušícího média z opačných směrů, tedy směr pohybů je opačný. Tato konfigurace zapříčiňuje, že dochází ke kontaktu nejteplejšího sušícího média s nejsušší sušenou směsí, což může zapříčinít nežádané tepelné ovlivnění až poškození produktu. Z pohledu ekonomiky je ale tato metoda výhodnější, jelikož dochází k úspoře tepla i energie. [34]



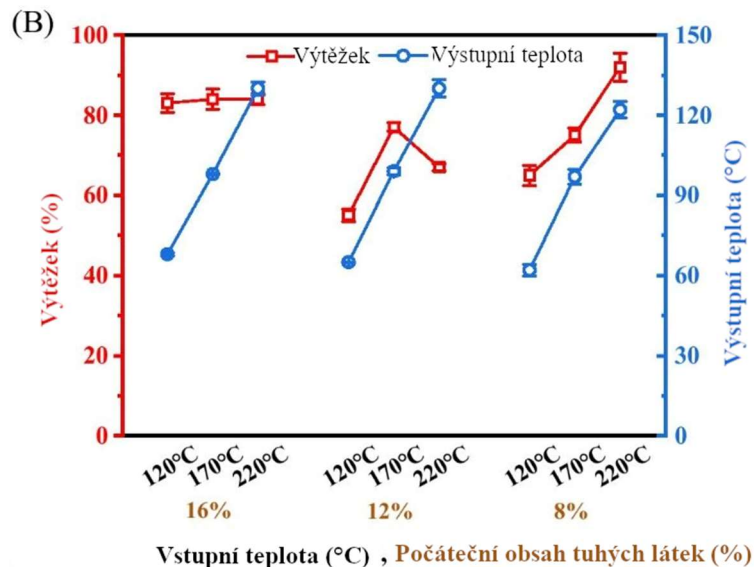
Obrázek 30 Schéma protiprouté sprejové sušárny [34]

Kombinovaná sušička (obrázek 31) vzniká spojením konstrukce souproudé a protiproudé konstrukce. Smysl pohybu sušícího média a atomizované směsi je opačný, ale s tím rozdílem, že atomizační zařízení je umístěno ve spodní části. Atomizovaná směs je rozstříkována směrem vzhůru do sušícího média a vlivem gravitace a unášením proudem média se mění smysl jejího pohybu dolů. Tedy atomizovaná směs se dostane do kontaktu hned po výstupu s nejteplejším plynem a je stržena do chladnější oblasti, což eliminuje riziko nechtěného tepelného ovlivnění. [34]



Obrázek 31 Schéma kombinované sprejové sušárny

Hlavní vliv na proces sušení mají teplota, vlhkost a tlak sušícího plynu, ty jsou regulovány pomocí čidel na vstupu a výstupu, jedná se tedy o proces řízený v uzavřené smyčce, kdy výstupní informace ovlivňují nastavení vstupních parametrů. Dále je to počáteční obsah tuhých látek [35], [38].



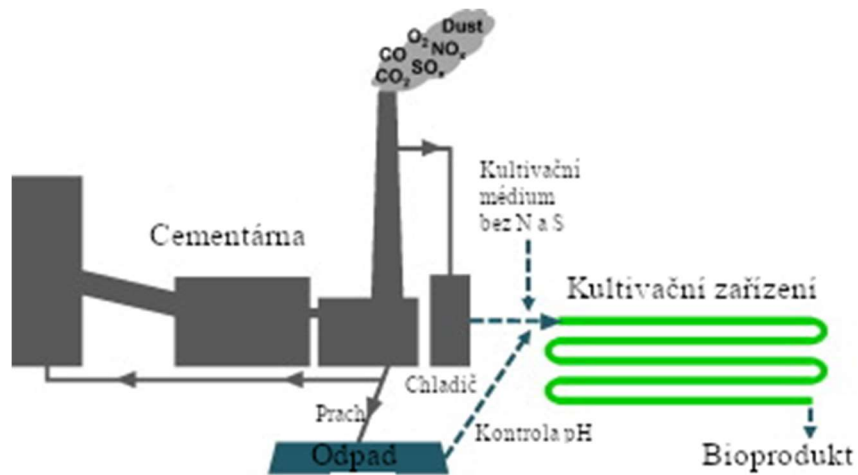
Obrázek 32 Grafická závislost výtěžnosti a výstupní teploty na počátečním obsahu tuhých látek a vstupní teplotě [35]

Z grafické závislosti na obrázku 32 lze vyčíst, že výtěžnost se zvyšovala, jestliže byl zvyšován počáteční obsah pevných látek ve vstupní směsi a vstupní teplota sušícího média. Nejvyšší produkce sušiny byla získána při konfiguraci, kdy byl počáteční obsah tuhých látek ve vstupní směsi 16 % a vstupní teplota sušícího média 220 °C s množstvím 78 g prášku za hodinu. [35]

3.4.2 Využití tepla z energeticky náročných procesů

Spalování odpadu v zařízeních pro energetické využití odpadu (ZEVO) je energeticky náročný proces s velkým množstvím zbytkového tepla, jehož je možno využít k sušení biomasy. Toto přebytečné teplo by mohlo být využito jak pro udržování optimální kultivační teploty, tak pro sušení ve sprejové sušárně. Snížily by se tedy náklady na vyhřívání kultivačních zařízení a také pro ohřev vzduchu pro proces sušení ve sprejové sušárně.

Nejenže lze využít zbytkové teplo z provozu ZEVO, či cementárny (schématické znázornění na obrázku 33), lze také využít jejich spaliny jako nutrient CO_2 pro pěstování mikrořas, kdy se z nevyužitého zdroje získá hodnotný produkt. Je však potřeba zvážit všechny složky plynu, aby bylo možno posoudit potenciál [39]. Pomocí mikrořas tedy dojde k bioremediaci CO_2 [40].



Obrázek 33 Schématické znázornění připojení bioreaktoru k cementárně [39]

Suplementace CO_2 z takovýchto zdrojů je však v určitých případech podmíněna předúpravou plynu, kdy je potřeba plyn odsířit, či snížit obsah dusíku. Problém také může nastat se stopovým množstvím těžkých kovů ve vypěstovaných mikrořasách [39]. Nicméně v práci Doušková a kol. (2009) [40] bylo prokázáno, že z neupravených spalin využívaných v experimentu došlo v kultuře pouze k mírnému nadbytku rtuti, zatímco ostatní látky byly pod limity normy Evropské unie. Tento nadbytek může být vyřešen například pomocí jednoduché filtrační kolony s granulovaným aktivním uhlím [40].

Ve vztahu ke kultivaci mikrořas hraje hlavní roli ovlivňování pH kultivačního média látkami obsaženými v plynu. Dle studie Javier a kol. (2016) [39] hodnotu pH drasticky mění rozpouštění SO_2 jakožto složka obsažená v plynu z cementárny [39].

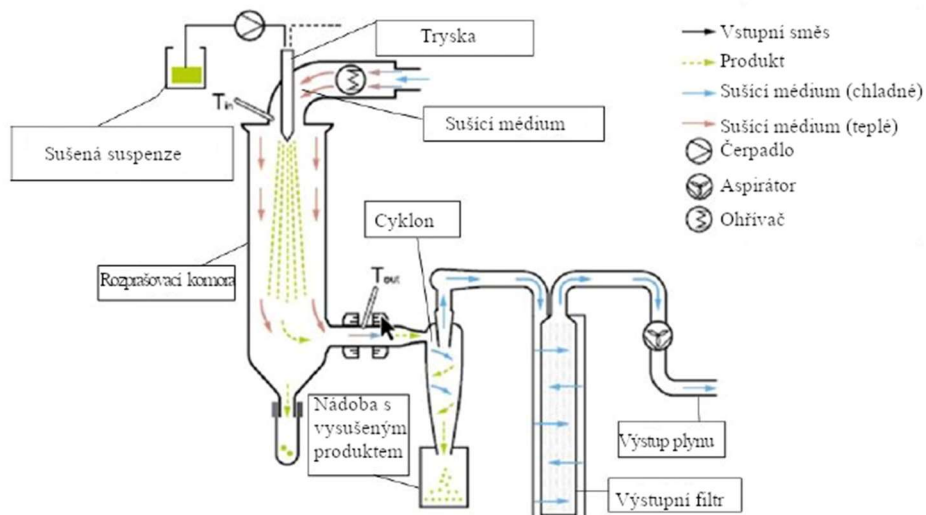
4 Experiment sprejová sušárna

Dne 22.3.2023 byl proveden experiment možnosti využití laboratorní sprejové sušárny k sušení mikrořas a také k zjištění jejich výtěžnosti z kultivačního média. K experimentu byl využit vzorek vykultivovaný v novém typu fotobioreaktoru jako součást diplomových prací studentů Michala Šuráňe a Matěje Adamce, kteří dodali vzorek 1 l *Chlorella pyrenoidosa* Chick (IPPAS C2). Dále se jednalo o praktický náhled na metodu sušení jevící se jako perspektivní metoda k sušení mikrořas. Vzhledem k stále probíhající optimalizaci kultivačních podmínek a nutnosti zkoordinovat datum experimentu, byla dodaná suspenze poměrně řídká, a tedy šlo předpokládat, že výtěžnost mikrořas sušením nebude vysoká. Další faktor, který ovlivnil průběh experimentu a dosažené výsledky, byla skutečnost, že se jednalo o první pokus sušení mikrořas v chemické laboratoři na pracovišti CEITECU a šlo tedy i o zjištění, zda je daný typ sušárny vhodný pro tuto aplikaci.

K samotnému sušení byla využita sprejová sušárna BUTCHI B-290 Mini Spray Dryer [41] (Obrázek 35). Tato sušárna je primárně využívána pro sušení jemných chemických suspenzí na prášek a dále také k odstranění rozpouštědel a látek s nižšími teplotami varu.



Obrázek 35 BUTCHI B-290 [41]



Obrázek 34 Schéma sušárny BUTCHI B-290

Pro aplikaci sušení mikrořas bylo využito sušící médium - vzduch. Nicméně tento typ sušárny lze připojit na inertní smyčku, kde jako sušící médium lze využít inertní plyn. Tento plyn je ohříván, využit k sušení, prochází připojenou filtrační jednotkou a je znovu využit k sušení [41]. Pro využití vzduchu jako sušícího média je využito zapojení dle schématu na Obrázek 34 a sací filtr k zamezení nasátí nečistot. Nasátý vzduch je tlačěn do ohřivače a tam se ohřívá na požadovanou přednastavenou teplotu. K měření teploty je použito čidlo na vstupu a také na výstupu. Teplota je nastavována dle druhu a hustoty vstupní směsi. Dle zkušeností výzkumných pracovníků platí, že pokud je nastaveno méně než 80 °C, začíná docházet k vysoké kondenzaci vody v rozprašovací komoře, což je nežádoucí. Obvykle se ale teploty sušícího média pohybují nad 100 °C. K rozprašování je využívána rozprašovací tryska, která je dodávána ve dvou velikostech, 0,5 mm a 0,7 mm. K experimentu byla využita tryska o průměru 0,7 mm. Byla zvolena větší velikost z důvodu předejití ucpání a zajištění hladkého průběhu pokusu. Nicméně lze dokoupit trysky o průměru 1,4 mm a 2 mm, které by mohly být pro pokus s mikrořasami vhodnější.

Pro pokus bylo z nádoby (Obrázek 36) odlito 115 ml suspence (Obrázek). Před odlitím byla suspenze v nádobě důkladně promíchána pro stejné rozložení mikrořas v celém objemu.

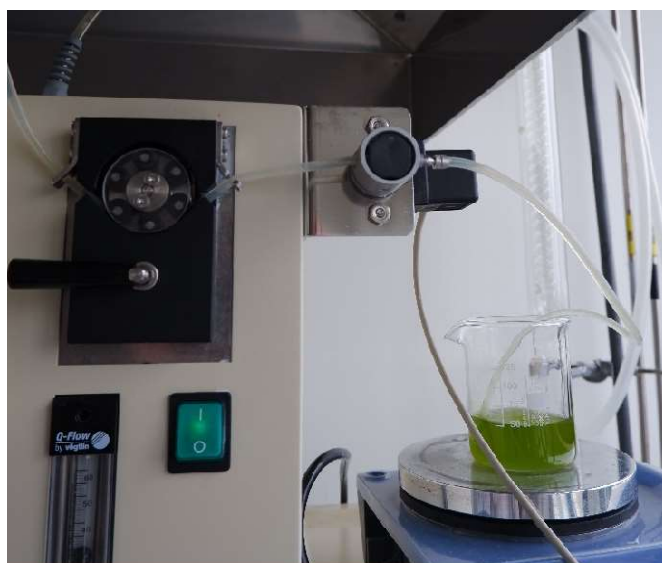


Obrázek 36 Transportní nádoba



Obrázek 367 Sušený vzorek

Po odlití vzorku bylo do kádinky vloženo magnetické míchadlo a při celém procesu sušení byla směs míchána na magnetické míchačce, aby se zabránilo sedimentaci. Směs byla z kádinky nasávána peristaltickým čerpadlem (Obrázek 37). Tento typ čerpadla je využíván kvůli zamezení zanesení trysky. Při čerpání na směs působí minimální silové účinky a nedochází k odstředování těžších částí. Další výhodou tohoto čerpadla je vytváření rázu v okamžiku, kdy dochází ke ztrátě kontaktu válečku s povrchem na natlakované straně, čímž vzniká impuls, jenž je schopen při ucpání trysku prorazit.



Obrázek 37 Čerpání sušené směsi

Směs byla přivedena na trysku, kde byla atomizována a smíchaná se stlačeným ohřátým sušícím médiem. Při průchodu rozprašovací komorou došlo k odpaření kapaliny a usušený prášek byl stržen

proudem vzduchu do cyklonu, kde došlo k separaci usušeného prášku a sušícího média, které bylo přes filtr vypouštěno do okolí.

Po přibližně 5 minutách bylo možno pozorovat první usazování usušených mikrořas na stěnách rozprašovací komory a prášek v nádobě s produktem (Obrázek 39). Po ukončení pokusu, trvajícím 26 minut, byla demontována nádoba s produktem, který byl z nádoby oddělen a zvážen.



Obrázek 39 Usušené mikrořasy



Obrázek 38 Množství po seškrábnutí

Parametry procesu sušení:

Tabulka 3 Parametry procesu

Vstupní teplota sušícího média	120 °C
Výstupní teplota sušícího média	67 °C
Výkon odsávání	100 %
Výkon čerpadla	15 %

V 26 minutách bylo získáno 0,0748 g usušených mikrořas z 115 ml suspenze (což odpovídá 0,65 g mikrořas na litr suspenze). V literatuře se uvádí běžná produkce 1 g na 1 l média [42], výsledek získaný pomocí sprejové sušárny je tedy vcelku uspokojivý.

Pomocí odstředění a usušení v laboratorní peci bylo zjištěno, že v 40 ml suspenze bylo 1,69 g/l mikrořas. Tato hodnota nešla přímo určit pomocí sprejové sušárny, jelikož docházelo k usazování řas i mimo nádobu s produktem (ztráty byly 44 %) a množství by nebylo vypovídající. Hodnota 1,69 g/l převyšuje průměrné hodnoty produkce v podobných typech PBR.

5 Ekonomické bilance

V dnešní době se mikrořasy produkují pro celou řadu aplikací, podle kterých se liší i nároky kladené na výsledný produkt. Je zřejmé, že produkce 100 g suchých mikrořas určených pro další aplikaci v medicíně bude mít rozdílné náklady, jako 100 g mikrořas určených pro zpracování na biodiesel. Dále se například rychlost růstu liší druhem kultivované mikrořasy, zvolené teploty kultivace, kvality a množství nutrientů, nebo stupně kontaminace kultivačního média [1]. Různé studie mají mnoho počátečních podmínek: jako množství vsázky kultury, velikost kultivačního zařízení, druh kultivačního zařízení, kultivační podmínky. Studie se liší také datem svého vydání, nelze tedy porovnat cenu za 1 kg suchého produktu ze studie z roku 2010 a 2023, jelikož jsou jiné náklady na energie a také je potřeba zohlednit vývoj hodnoty měny.

Výše napsané se projevuje také ve výstupech studií, kdy uvádějí diametrálně odlišné hodnoty ceny ze produkci biomasy z mikrořas např.: 2,90 €/kg Schnipper a kol. (2021) [43], 12,40 €/kg Tredici a kol. (2016) [44], 69 €/kg Avién a kol. (2012) [45]. Ve studiích zkoumajících stanovení výrobních nákladů neexistuje žádný vnitrostátní/obecný předpis jak postupovat, aby byly studie porovnatelné a též se jedná o složitou a dlouho trvající studii obsahující mnoho dat [46]. Ekonomická bilance vztažena k měna/množství je tedy nevhodná.

6 Vybrané možnosti aplikací a dalšího vývoje

Momentálně probíhá výzkum aplikace mikrořas pro absorpci polutantů v odpadních vodách. Jedná se o záměr chemicky modifikovat mikrořasy tak, že na povrch naváží receptor, díky kterému budou mikrořasy schopny reagovat pouze s určitými složkami v odpadní vodě. Momentálně se výzkum zabývá reakcí na hormonální antikoncepci, nicméně je plán vytvořit protokol, podle kterého by byla modifikace upravena na další polutanty jako antibiotika, toxická barviva a další látky. [47]

Další ze zajímavých aplikací je možnost využití jako udržitelný bio-fotovoltaický článek. Při fotosyntéze mikrořasy produkují určité množství elektrického proudu, který interaguje s hliníkovou elektrodou a může být použit k napájení mikroprocesoru. Tento systém byl pouze v testovacím režimu s vidinou funkce pouze pár týdnů, ale ukázalo se, že dokáže dodávat energii více než 6 měsíců. Velikost zařízení je srovnatelná s AA baterií, ale na rozdíl od baterií, či fotovoltaických článků není k jeho výrobě potřeba vzácných kovů, či chemikálií a nezatěžují životní prostředí. Aplikace tohoto systému je vhodná pouze pro nenáročné aplikace, je totiž schopen pokrýt spotřebu pohybující se v μW . [48]

Významný výzkum je veden v oblasti farmacie, jelikož mikrořasy obsahují mnoho lidem prospěšných látek, bioaktivní sloučeniny. Tyto látky mohou sloužit k prevenci rakoviny či srdečních onemocnění, jsou také vhodné pro rekombinativní proteiny (využíváno k umělému spojování DNA). Je také zkoumán způsob, jak využít látky obsažené v mikrořasách, které mají antivirové, antibakteriální, antifungální či antiprotozoální (antiparazitické) vlastnosti. Ve farmacii jsou využívány kromě známých i jiné kmeny mikrořas, které nemusí mít tak vysokou rychlost růstu, ale mohou obsahovat pro farmacii velmi cenné látky. Používané kmeny jsou např. *Chlamydomonas reinhardtii* či *Phaeodactylum tricorutum*. Specifikum výzkumu vedených ve farmacii je složitost a časová náročnost studií, vzhledem k potřebě velkého množství experimentů a výsledků k validitě studie. [49]

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zmapovat používané kultury mikrořas a popsat jejich vlastnosti. Byly vybrány a popsány pouze kultury, jež jsou nejvíce využívány, jak při experimentech, tak v praxi. Existují tisíce dalších kultur, které by mohly být popsány, nicméně mnou vybrané jsou dle dostupných dat pro Evropu typické a nejrozšířenější.

Dále byla provedena rešerše využívaných kultivačních systémů v Evropě s ohledem na klimatické podmínky. Zde je vhodné vyzdvihnout kaskádový kultivační systém vyvinut v Třeboni pracovníky mikrobiologického ústavu Akademie věd, jenž dosahuje vysokých růstových hodnot kultury, ale pouze část roku, kdy jsou vhodné klimatické podmínky. Časová omezenost kultivace je obecně ve střední Evropě pro otevřené kultivační systémy velkým omezením, což je důvod k vývoji hybridních, či využívání uzavřených systémů.

Hlavním cílem práce bylo zmapování a popis metod využívaných ke sklizení mikrořas. Z těchto metod byla vybrána metoda, které se mi jeví jako perspektivní.

Z rešerše a analýzy využívaných metod jsem vyvodil tyto závěry:

- Nelze stanovit optimální techniku sklizení pro všechny kultury mikrořas, vzhledem k rozdílným velikostem a vlastnostem buněk.
- Flotace a elektrokoagulace jsou omezující v nutnosti čištění kultivačního média, či přítomnosti iontů kovů v produktu. Nicméně jsou to metody řadící se k těm ekonomicky méně náročným.
- Při sklizení mikrořas je nutné, vyjma sprejové sušárny, zařadit několik procesů k minimalizaci nákladů. Například, při využití centrifugy je nutné předřadit například elektrokoagulaci, či flokulaci, a po centrifuzě využít sušení např. v peci, či solární sušárně. Tyto faktory činí sklizení ekonomicky náročnější.
- Bez předchozí dehydratační techniky je centrifugace ekonomicky extrémně náročná.
- Sprejová sušárna představuje metodu s dobrým potenciálem, kdy není potřeba předchozí dehydratační technika a není významná možnost kontaminace.

Dále byl proveden experiment sušení kultury pomocí sprejové sušárny. Metoda byla zvolena k experimentu, jelikož se jevila jako perspektivní. Jednalo se o první pokus tohoto druhu na CEITECu, a nabízí se možnost dále optimalizovat sušicí podmínky, které byly zvoleny tak, aby se zajistil uspokojující výsledek. Náročnost stanovení vhodných podmínek při sprejovém sušení lze také vidět na době trvání pokusu, vzhledem k sušenému objemu.

V práci byl také záměr porovnat jednotlivé metody sklizení po ekonomické stránce. Vyšlo najevo, že není možné toto porovnání udělat ve formátu cena/kg. Některé studie vztahují náklady na dolar, či euro, ale toto stanovení je validní pouze pro daný časový úsek, danou konfiguraci, hustotu kultury, cenu elektrické energie a další. Nelze tedy obecně určit cenu za kultivaci a usušení. Také se vyvíjí kurz měny, tedy hodnota 1 € se v čase mění. Závěrem tedy je, že by bylo vhodnější provést energetickou bilanci jednotlivých metod.

S neustálým vývojem a výzkumem v problematice mikrořas se objevují také další možné aplikace mikrořas. V práci byly také vybrány a nastíněny zajímavé aplikace a probíhající výzkumy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RICHMOND, Amos a Qiang HU, ed. *Handbook of microalgal culture: applied phyco-logy and Biotechnology*. Second edition. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. ISBN 978-0-470-67389-8.
- [2] MASOJÍDEK, Jiří. „Mikrořasy–solární továrna v jedné buňce.[online] Praha, 2016." *Akademie věd České republiky, Vydání 1: 28*. nedatováno.
- [3] SUPPLY, Algae Research. Algae Cultures. *Algae Research Supply* [online]. [vid. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://algaeresearchsupply.com/collections/algae-cultures>
- [4] *Laboratorní rozbor Chlorelly SP z Třeboně* [online]. [vid. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.ceskarasa.cz/2020/02/slozeni-chlorelly-z-trebone.html>
- [5] KARKOS, P. D., S. C. LEONG, C. D. KARKOS, N. SIVAJI a D. A. ASSIMAKOPOU-LOS. Spirulina in Clinical Practice: Evidence-Based Human Applications. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine : eCAM* [online]. 2011, **2011**, 531053. ISSN 1741-427X. Dostupné z: doi:10.1093/ecam/nen058
- [6] SONI, Ruma Arora, K. SUDHAKAR a R. S. RANA. Spirulina – From growth to nutri-tional product: A review. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2017, **69**, 157–171. ISSN 0924-2244. Dostupné z: doi:10.1016/j.tifs.2017.09.010
- [7] LIM, Hooi Ren, Kuan Shiong KHOO, Kit Wayne CHEW, Chih-Kai CHANG, Heli Siti Halimatul MUNAWAROH, P. Senthil KUMAR, Nguyen Duc HUY a Pau Loke SHOW. Perspective of Spirulina culture with wastewater into a sustainable circular bioeconomy. *Environmental Pollution* [online]. 2021, **284**, 117492. ISSN 0269-7491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2021.117492
- [8] BLANCO-VIEITES, M., D. SUÁREZ-MONTES, F. DELGADO, M. ÁLVAREZ-GIL, A. Hernández BATTEZ a E. RODRÍGUEZ. Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry. *Algal Research* [online]. 2022, **64**, 102700. ISSN 2211-9264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2022.102700
- [9] MARKOU, Giorgos, Dimitris MITROGIANNIS, Abuzer ÇELEKLI, Hüseyin BOZ-KURT, Dimitris GEORGAKAKIS a Constantinos V. CHRYSIKOPOULOS. Biosorp-tion of Cu²⁺ and Ni²⁺ by *Arthrospira platensis* with different biochemical compositions. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2015, **259**, 806–813. ISSN 1385-8947. Do-stupné z: doi:10.1016/j.cej.2014.08.037
- [10] AL-HOMAIDAN, Ali A., Jamila A. ALABDULLATIF, Amal A. AL-HAZZANI, Abdullah A. AL-GHANAYEM a Aljawharah F. ALABBAD. Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass. *Saudi Journal of Biological Sciences* [online]. 2015, **22**(6), Special issue on Molecular Biology and Biophysics of Eukaryotic Cells and Special issue on Biological Aspects of Global Health Issues, 795–800. ISSN 1319-562X. Dostupné z: doi:10.1016/j.sjbs.2015.06.010
- [11] MASOJÍDEK, J. a G. TORZILLO. Mass Cultivation of Freshwater Microalgae. In: Sven Erik JØRGENSEN a Brian D. FATH, ed. *Encyclopedia of Ecology* [online]. Oxford:

- Academic Press, 2008 [vid. 2023-03-11], s. 2226–2235. ISBN 978-0-08-045405-4. Dostupné z: doi:10.1016/B978-008045405-4.00830-2
- [12] SUGUMAR, S., R. RAJESH, P. KANNAN a P. VENKATESAN. Biodiesel production from the biomass of *Dunaliella salina* green microalgae using organic solvent. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **33**, International Conference on Nanotechnology: Ideas, Innovation and Industries, 3260–3264. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.04.652
- [13] PATEL, Akash, Bharat GAMI, Pankaj PATEL a Beena PATEL. Biodiesel production from microalgae *Dunaliella tertiolecta*: a study on economic feasibility on large-scale cultivation systems. *Biomass Conversion and Biorefinery* [online]. 2023, **13**(2), 1071–1085. ISSN 2190-6823. Dostupné z: doi:10.1007/s13399-020-01191-1
- [14] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society and the environment* [online]. 2018 [vid. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52018DC0673>
- [15] RUMIN, Judith, Elodie NICOLAU, Raimundo GONÇALVES DE OLIVEIRA JUNIOR, Claudio FUENTES-GRÜNEWALD, Kevin J. FLYNN a Laurent PICOT. A Bibliometric Analysis of Microalgae Research in the World, Europe, and the European Atlantic Area. *Marine Drugs* [online]. 2020, **18**(2), 79. ISSN 1660-3397. Dostupné z: doi:10.3390/md18020079
- [16] ARAÚJO, Rita, Fatima VÁZQUEZ CALDERÓN, Javier SÁNCHEZ LÓPEZ, Isabel Costa AZEVEDO, Annette BRUHN, Silvia FLUCH, Manuel GARCIA TASENDE, Fatemeh GHADERIARDAKANI, Tanel ILMJÄRV, Martial LAURANS, Micheal MAC MONAGAIL, Silvio MANGINI, César PETEIRO, Céline REBOURS, Tryggvi STEFANSSON a Jörg ULLMANN. Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science* [online]. 2021, **7** [vid. 2023-03-16]. ISSN 2296-7745. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.626389>
- [17] MASOJÍDEK, J. a G. TORZILLO. Mass Cultivation of Freshwater Microalgae☆. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* [online]. B.m.: Elsevier, 2014 [vid. 2023-03-16]. ISBN 978-0-12-409548-9. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.09373-8
- [18] SUKAČOVÁ, Kateřina, Pavel LOŠÁK, Vladimír BRUMMER, Vítězslav MÁŠA, Daniel VÍCHA a Tomáš ZAVŘEL. Perspective Design of Algae Photobioreactor for Greenhouses—A Comparative Study. *Energies* [online]. 2021, **14**, 1338. Dostupné z: doi:10.3390/en14051338
- [19] SALIM, Sina, Rourke BOSMA, Marian H. VERMUE a René H. WIJFFELS. Harvesting of microalgae by bio-flocculation. *Journal of Applied Phycology* [online]. 2011, **23**(5), 849–855. ISSN 0921-8971. Dostupné z: doi:10.1007/s10811-010-9591-x

- [20] SMOLOVÁ, Jana. *Sklízení jednobuněčných sladkovodních řas metodou flokulace*. Praha, 2015. Diplomová práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. *Obor studia Biotechnologie*. B.m., nedatováno. b.n.
- [21] MATTER, Ibrahim A., Vu Khac Hoang BUI, Mikyoung JUNG, Jung Yoon SEO, Young-Eun KIM, Young-Chul LEE a You-Kwan OH. Flocculation Harvesting Techniques for Microalgae: A Review. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**(15), 3069. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9153069
- [22] SHOW, Kuan-Yeow, Duu-Jong LEE a Jo-Shu CHANG. Algal biomass dehydration. *Biorefinery Technology* [online]. 2013, **135**, Biorefineries, 720–729. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2012.08.021
- [23] VISIGALLI, Simone, Maria Giulia BARBERIS, Andrea TUROLLA, Roberto CANZIANI, Maja BERDEN ZRIMEC, Robert REINHARDT a Elena FICARA. Electrocoagulation–flotation (ECF) for microalgae harvesting – A review. *Separation and Purification Technology* [online]. 2021, **271**, 118684. ISSN 1383-5866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2021.118684
- [24] NETVOR. *Electrocoagulation reduces harvesting cost of microalgae* | Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i. [online]. [vid. 2022-10-01]. Dostupné z: <https://www.icpf.cas.cz/en/electrocoagulation-reduces-harvesting-cost-of-microalgae/>
- [25] NAJJAR, Yousef S. H. a Amer ABU-SHAMLEH. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. *Algal Research* [online]. 2020, **51**, 102046. ISSN 2211-9264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2020.102046
- [26] MILLEDGE, John James a Sonia HEAVEN. Disc Stack Centrifugation Separation and Cell Disruption of Microalgae: A Technical Note. *Environment and Natural Resources Research* [online]. 2011, **1**(1) [vid. 2022-10-01]. ISSN 1927-0496. Dostupné z: https://www.academia.edu/10729733/Disc_Stack_Centrifugation_Separation_and_Cell_Disruption_of_Microalgae_A_Technical_Note
- [27] Decanter and disc-stack centrifuge systems. *Filtration + Separation* [online]. 1991, **28**(6), 387–388. ISSN 0015-1882. Dostupné z: doi:10.1016/0015-1882(91)80258-7
- [28] WIBAWA, Dhani S., Muhammad A. NASUTION, Ryoza NOGUCHI, Tofael AHAMED, Mikihide DEMURA a Makoto M. WATANABE. Microalgae Oil Production: A Downstream Approach to Energy Requirements for the Minamisoma Pilot Plant. *Energies* [online]. 2018, **11**(3), 521. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11030521
- [29] GERARDO, Michael L., Sofie VAN DEN HENDE, Han VERVAEREN, Thea COWARD a Stephen C. SKILL. Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants. *Algal Research* [online]. 2015, **11**, 248–262. ISSN 2211-9264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2015.06.019
- [30] SPELTER, Lars Egmont, Anna STEIWAND a Hermann NIRSCHL. Processing of dispersions containing fine particles or biological products in tubular bowl centrifuges. *Chemical Engineering Science* [online]. 2010, **65**(14), 4173–4181. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2010.04.028

- [31] CENTADMIN. How Does a Decanter Centrifuge Work? *Centrifuge World: We Repair, Buy & Sell Industrial Centrifuges*. [online]. 19. únor 2019 [vid. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://centrifuge.com/how-a-decanter-centrifuge-works/>
- [32] JI, Li, Puja PAUL, Bhuvana K. SHANBHAG, Ian DIXON, Shibo KUANG a Lizhong HE. Emerging application of hydrocyclone in biotechnology and food processing. *Separation and Purification Technology* [online]. 2023, **309**, 122992. ISSN 1383-5866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2022.122992
- [33] VEGA-GARCIA, D., P. R. BRITO-PARADA a J. J. CILLIERS. Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2018, **350**, 653–659. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2018.06.016
- [34] HAQUE, M. Amdadul, Yakindra Prasad TIMILSENA a Benu ADHIKARI. *Spray drying* [online]. B.m.: Taylor & Francis. 2015. Dostupné z: https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/47291741/Spray_drying-libre.pdf?1468745598=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSpray_Drying.pdf&Expires=1675703212&Signature=Hl8BephEhkWFzVukSUY9FfLmkLalJqy29GCW3UIuEVoc5MTTF-PER1e1nBx3DquyKMSf~WPRmI~ukp547Numu54JCO3CTfITIKexxOgunaswt~dgN0yICfW38hOEAdH-GV-TVdY~6ljEOR~9psgzZaSbragOylieZz1OFa4Hiy-nyeBnrzI7CCwp7FYLw4l6qSC8UyJ2j6u5d1ExG-ptO0hRmLxifEMtdi-PZPIxgNFQ8WK061XkLmQgJa0t3KmFdTZ-K-gcj8u0zTvhd2TMbO3vAJ-GgV1Nna0fkMXGUGpgRghSKo9lGqRm-kRsr4CE9E2g2ITHrVPmN~ZBQbrco4qxw__&Key-Pair-Id=APKAJ-LOHF5GGSLRBV4ZA
- [35] ZHANG, Haiyang, Ting GONG, Jing LI, Bo PAN, Qiang HU, Ming DUAN a Xuezhi ZHANG. Study on the Effect of Spray Drying Process on the Quality of Microalgal Biomass: a Comprehensive Biocomposition Analysis of Spray-Dried *S. acuminatus* Biomass. *BioEnergy Research* [online]. 2022, **15**. Dostupné z: doi:10.1007/s12155-021-10343-8
- [36] BAYVEL, L. P. a Z. ORZECOWSKI. *Liquid atomization*. Washington, DC: Taylor & Francis, 1993. Combustion. ISBN 978-0-89116-959-8.
- [37] LEFEBVRE, Arthur H. a Vincent G. MCDONELL. *Atomization and sprays*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 2017. ISBN 978-1-4987-3625-1.
- [38] WISNIEWSKI, Richard. Spray Drying Technology Review [online]. 2015 [vid. 2023-01-26]. Dostupné z: https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/64598/ICES_2015_submission_68.pdf?sequence=1
- [39] LARA-GIL, Javier A., Carolina SENÉS-GUERRERO a Adriana PACHECO. Cement flue gas as a potential source of nutrients during CO₂ mitigation by microalgae. *Algal Research* [online]. 2016, **17**, 285–292. ISSN 2211-9264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2016.05.017
- [40] DOUSKOVA, I., J. DOUCHA, K. LIVANSKY, J. MACHAT, P. NOVAK, D. UMYSOVA, V. ZACHLEDER a M. VITOVA. Simultaneous flue gas bioremediation and

- reduction of microalgal biomass production costs. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online]. 2009, **82**(1), 179–185. ISSN 1432-0614. Dostupné z: doi:10.1007/s00253-008-1811-9
- [41] Mini spray dryer B-290. *VWR* [online]. [vid. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://cz.vwr.com/store/product/14452929/mini-spray-dryer-b-290>
- [42] PULGARIN, Adrian, Alexander Garcia KAPPELLER, Mohamed TARIK, Sophia EGLOFF, Marina MARIOTTO, Christian LUDWIG a Dominik REFARDT. Cultivation of microalgae at high-density with pretreated liquid digestate as a nitrogen source: Fate of nitrogen and improvements on growth limitations. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **324**, 129238. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.129238
- [43] SCHIPPER, K., H.M.S.J. AL-JABRI, R.H. WIJFFELS a M.J. BARBOSA. Techno-economics of algae production in the Arabian Peninsula. *Bioresource Technology* [online]. 2021, **331**. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2021.125043
- [44] TREDICI, M.R., L. RODOLFI, N. BIONDI, N. BASSI a G. SAMPIETRO. Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant. *Algal Research* [online]. 2016, **19**, 253–263. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2016.09.005
- [45] ACIÉN, F.G., J.M. FERNÁNDEZ, J.J. MAGÁN a E. MOLINA. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances* [online]. 2012, **30**(6), 1344–1353. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2012.02.005
- [46] VÁZQUEZ-ROMERO, Bárbara, José Antonio PERALES, Hugo PEREIRA, Maria BARBOSA a Jesús RUIZ. Techno-economic assessment of microalgae production, harvesting and drying for food, feed, cosmetics, and agriculture. *Science of The Total Environment* [online]. 2022, **837**, 155742. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155742
- [47] POSPÍCHALOVÁ, Mgr Tereza. Řasy s umělou inteligencí by do budoucna mohly čistit odpadní vodu. *Mendelova univerzita v Brně* [online]. 26. září 2022 [vid. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://mendelu.cz/rasy-s-umelou-inteligenci-by-do-budoucna-mohly-cistit-odpadni-vodu/>
- [48] BOMBELLI, P., A. SAVANTH, A. SCARAMPI, S. J. L. ROWDEN, D. H. GREEN, A. ERBE, E. ÅRSTØL, I. JEVREMOVIC, M. F. HOHMANN-MARRIOTT, S. P. TRASATTI, E. OZER a C. J. HOWE. Powering a microprocessor by photosynthesis. *Energy & Environmental Science* [online]. 2022, **15**(6), 2529–2536. ISSN 1754-5706. Dostupné z: doi:10.1039/D2EE00233G
- [49] KHAVARI, Fatemeh, Massoud SAIDIJAM, Mohammad TAHERI a Fatemeh NOURI. Microalgae: therapeutic potentials and applications. *Molecular Biology Reports* [online]. 2021, **48**(5), 4757–4765. ISSN 0301-4851. Dostupné z: doi:10.1007/s11033-021-06422-w