

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**SEPARACE MIKROŘAS
Z KULTIVAČNÍHO MÉDIA**

2022

**KRYŠTOF
DUDEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dudek** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **493565**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Separace mikrořas z kultivačního média

Název bakalářské práce anglicky:

Harvesting of microalgae

Pokyny pro vypracování:

Separace tvoří nejnákladnější celek procesu produkce biomasy 3. generace, která výrazně ovlivňuje ekonomické hledisko celé technologie. Cílem této práce bude seznámení se s technologiemi pro separaci biomasy 3. generace z kultivačního média. Zpracujte literární a průmyslovou rešerši existujících technologií a konstrukčních variant separačních systémů. Na základě kritické rešerše vyberte nejvhodnější technologie, které by mohly být realizovány v průmyslovém měřítku a zároveň by splňovaly standardy pro farmaceutické či potravinářské využití. Pro zvolenou kulturu mikrořas vypracujte základní experimentální měření popisující chování kultivačního média a buněk mikrořas. Ověřte možnosti využití flokulantů splňujících standardy potravinářského využití.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci s názvem „Separace mikrořas z vodního média“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Mgr. Vojtěcha Bělohlava, Ph.D. s pomocí literatury, která je uvedena na konci v seznamu literatury.

V Praze

Kryštof Dudek

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Mgr. Vojtěchu Bělohlavovi, Ph.D. za vedení této bakalářské práce a za jeho cenné rady a připomínky.

Dále bych rád poděkoval paní Janě Vítové ze společnosti Amcon a panu Petru Schejbalovi ze společnosti Sokoflok za poskytnutí vzorků flokulantů, které jsem při pokusech s mikrořasami využil.

Anotace

Jméno autora: Kryštof Dudek

Název bakalářské práce: Separace mikrořas z kultivačního média

Název bakalářské práce v angličtině: Separation of microalgae from cultivation medium

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav, Ph.D.

Akademický rok: 2021/2022

Rozsah práce

- Počet stran: 56
- Počet obrázků: 27
- Počet tabulek: 3
- Počet příloh: 0

Klíčová slova: mikrořasy, kultivace, separace, flokulace, sedimentace

Keywords: microalgae, cultivation, separation, flocculation, sedimentation

Anotace: Předmětem této práce jsou dnes dostupné metody separace mikrořas. První část práce obsahuje literární a patentovou rešerši zabývající se dostupnými metodami. V druhé části bude vybrána jedna metoda, která bude dále experimentálně testována. Výsledkem experimentů by měly být nové poznatky týkající se dané metody.

Annotation: The subject of this thesis are currently available methods used for microalgae separation. The first part of the thesis consists of literature and patent review about the available methods. In the second part, there will be one method chosen and then tested. The results of experiments should mean new knowledges about the subject.

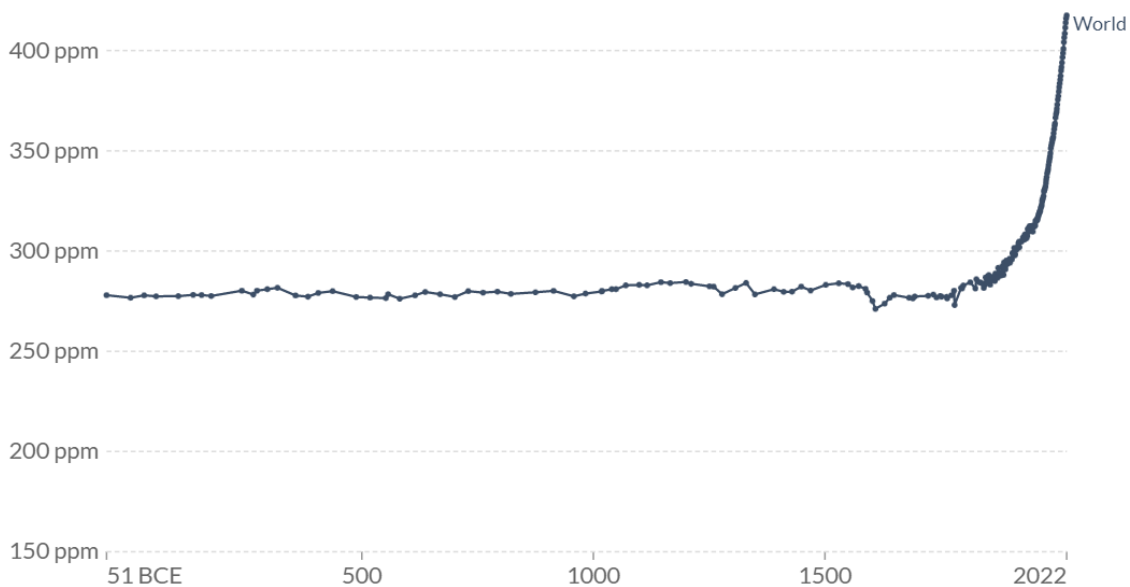
Obsah

1 Úvod.....	8
2 Produkce mikrořas.....	10
2.1 Co jsou to mikrořasy	10
2.2. Bioreaktory a fotobioreaktory	10
2.3 Parametry ovlivňující kultivaci	13
2.4 Využití mikrořas.....	14
2.5 Problematika separace.....	14
3 Separální metody	16
3.1 Separace působením gravitace	16
3.2 Separace pomocí odstředivé síly	18
3.3 Flokulace	21
3.4 Filtrace.....	23
3.5 Flotace	25
3.6 Srovnání separálních metod.....	27
4 potravinové standardy a používání flokulantů	28
4.1 Potravinářská standardizace	28
4.2 Používání flokulantů	28
4.3 Bezpečnost obsažených látek	29
4.4 Uvedení nové potraviny na trh	29
4.5 Závěr potravinového práva.....	30
5 Experimentální část	31
5.1 Motivace a cíle práce.....	31
5.2 použité flokulanty.....	31
5.3 Postup hlavního experimentu	32
6 Výsledky.....	33

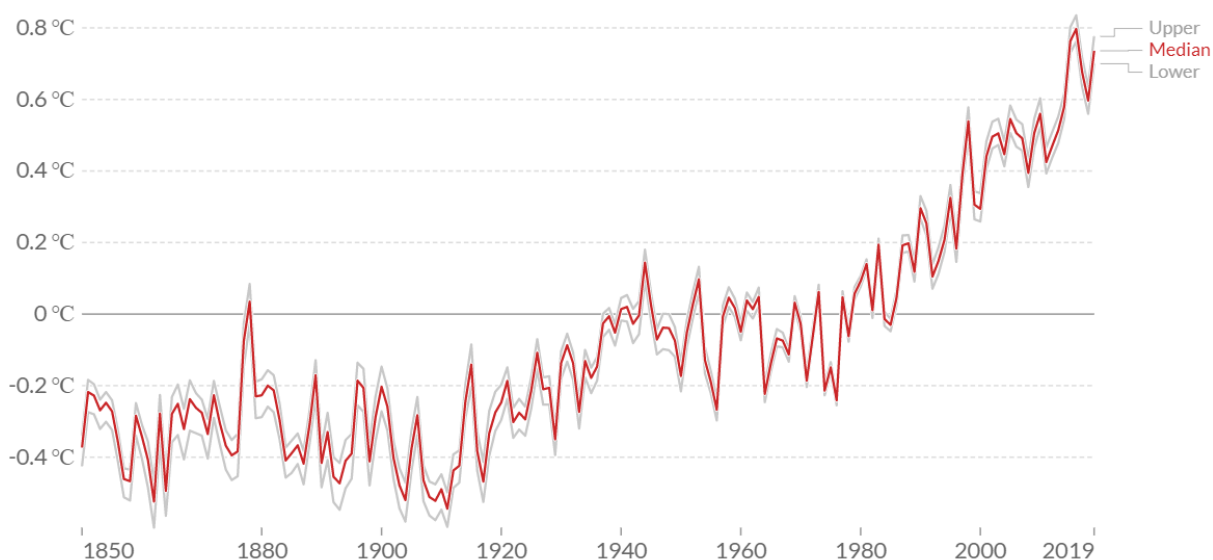
6.1 PWG 54.....	33
6.2 FL 2250	35
6.3 CWE 35	36
6.4 CWE 82	38
6.5 FL 4440	39
6.6 Magnafloc.....	40
6.7 Chitosan.....	41
6.8 porovnání flokulantů	42
6.9 sedimentační rychlost.....	43
7 Cenová bilance procesu produkce mikrořas.....	45
7.1 Sušení	45
7.2 výsledná koncentrace	45
7.3 Výpočet ceny.....	46
8 Závěr.....	49
9 Zdroje	51
9.1 Seznam obrázků	56

1 Úvod

Industriální revoluce znamenala zásadní zlepšení životních podmínek pro obrovské množství lidí. Zároveň to však znamenalo počátek zásadního zvyšování produkce emisí (obr. 1), především oxidu uhličitého (CO₂), což vyvolává, mimo jiné, silnější skleníkový efekt a tedy i zvyšování průměrné světové teploty (obr. 2).



Obrázek 1 - vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře



Obrázek 2 - změna průměrné teploty v čase

Z toho důvodu už několik desítek let hledáme možnosti, jak oxid uhličitý využít, nebo jak zamezit další produkci. Dvě základní možnosti toho, jak nakládat s CO₂ jsou uskladňování (CCS – Carbon capture and storage) a využití (CCU – Carbon capture and utilization). CCS spočívá v zachytávání CO₂ a jeho následném uskladnění, avšak to se zatím jeví jako velmi komplikované, jelikož nemáme zatím k dispozici dostatečné množství vhodného prostoru, kde by mohl být dlouhodobě uskladněn. Jednou z možností by mohlo být uskladňování do prostoru zbylém po vytěžené ropě, nebo zemním plynu, ale to je zatím velmi problematické. CCS naproti tomu znamená hledání možností, jak by bylo možné oxid uhličitý využít. Největším problémem je zde ovšem to, že oxid uhličitý vzniká chemickými reakcemi jako odpadní produkt a není tedy již nositelem energie. Určité množství energie je naopak nutné do procesu vložit, abychom z něj mohli získat nějaký užitečný produkt [37],[38].

Jednou z možností, jak přetransformovat oxid uhličitý na užitečné produkty je právě využití mikrořas. Mikrořasy dokážou díky fotosyntéze přeměnit oxid uhličitý na užitečné produkty, jako jsou cukry, nebo lipidy. Produkce mikrořas ovšem není jednoduchý proces a jedním z problémů, které je třeba řešit, je problematika separace mikrořas z vodního média, což je tématem této práce.

Cílem této práce tedy je získat lepší porozumění této problematice a následně dosáhnout výsledku, který by měl být založen i na vlastních experimentech a výzkumu. V první části práce se zabývá jednotlivými metodami separace mikrořas pro získání lepších znalostí. Informace budou čerpány primárně z vědeckých studií na danou tematiku a patentových řešerší. Na základě těchto znalostí by měla být následně vybrána ta metoda, která má největší potenciál a touto metodou se dále zabývat experimentálně. Výsledkem experimentální části by měly být nové poznatky v dané oblasti.

2 Produkce mikrořas

2.1 Co jsou to mikrořasy

Řasy jsou skupina eukaryotických organismů žijících, až na výjimky, ve sladké, nebo slané vodě. Řasy mají zásadní podíl na produkci kyslíku na Zemi díky své schopnosti fotosyntézy. Řasy mohou měřit od několika mikrometrů po desítky metrů a mohou být jednobuněčné, nebo mnohobuněčné. Právě jednobuněčné řasy se označují jako mikrořasy. Mikrořasy, stejně jako ostatní řasy, využívají oxid uhličitý a sluneční záření k výrobě energie a kyslíku a žijí v sladkých, nebo slaných vodních plochách. Mikrořasy mohou žít jednotlivě, v řetězcích, nebo koloniích a mohou měřit přibližně od 3 do 70 mikrometrů. Podle odhadů existují stovky tisíc druhů mikrořas [1],[2],[3].

Právě schopnost mikrořas zpracovávat oxid uhličitý na cukry a lipidy je důvod zájmu o jejich produkci. Jejich produkce se řadí do biopaliv III. generace¹ a zařízení, která se k tomu používají se nazývají bioreaktory [1].

2.2. Bioreaktory a fotobioreaktory

Bioreaktory obecně jsou zařízení určená ke kultivaci mikroorganismů, rostlinných nebo živočišných buněk, případně dalších biologických činitelů, jako jsou např. enzymy. Pro tuto práci jsou důležité pouze fotobioreaktory na kultivaci řas. Fotobioreaktor je vodní plocha určená k tomu, aby v něm rostly mikrořasy. Do vody je přiváděn oxid uhličitý jako zdroj energie pro řasy a voda je udržována v pohybu. Fotobioreaktory mohou využívat sluneční světlo, umělé světlo, nebo jejich kombinaci. Pokud jsou splněné podmínky pro množení mikrořas, tak dojde k jejich postupnému zaplnění fotobioreaktoru. V určitý moment už řasy snižují průchodnost světla natolik, že není možné další jejich množení. Zároveň také produkují kyslík, který při dostatečné koncentraci zastavuje jejich růst. V takovýto moment je nutné provést jejich separaci, aby byla možná další produkce. Existuje více druhů fotobioreaktorů lišících se podle způsobu, jakým voda proudí: [4],[7].

- Potrubní fotobioreaktor (obr. 3) –Voda cirkuluje uzavřeném potrubí. Potrubí může být rozloženo vertikálně, nebo horizontálně. Tyto fotobioreaktory už bývají většinou osvětlovány uměle, ale může být využito i sluneční záření. Díky vysoké ploše, na kterou

¹ do I. Generace biopaliv se řadí paliva vyráběná z potravinářských plodin (např. řepkový olej), II generace jsou paliva vyrobená z rostlinných odpadů, III generace jsou právě paliva vyráběná z řas.[1]

dopadá světlo lze dosáhnout vysoké koncentrace mikrořas. Náklady na provoz jsou však poměrně vysoké [2],[7].

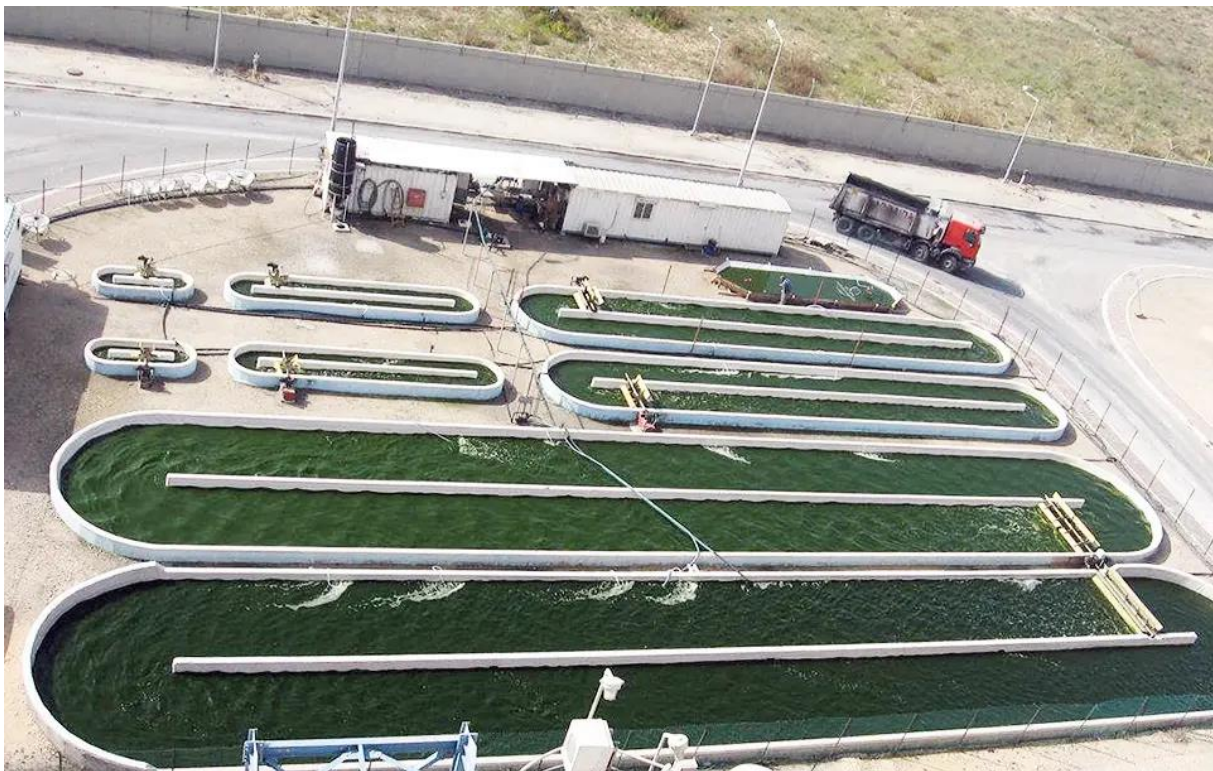
- Deskový fotobioreaktor (obr. 4) – V případě deskového fotobioreaktoru protéká voda sérií tenkých desek. Hlavní výhodou je, že světlo nikdy nemusí procházet silnější vrstvou vody, což umožňuje dosažení ještě vyšších koncentrací mikrořas. Nevýhodou je ovšem, že se v panelech hromadí více kyslíku, což inhibuje jejich růst. Deskové fotobioreaktory mohou využívat jak umělé, tak sluneční světlo [7],[10].
- Umělé jezero (obr. 5) – Jde o nejjednodušší typ fotobioreaktoru. Jde v podstatě jen o umělou nádrž, kam je přiváděn oxid uhličitý a je ozařován Sluncem. Takovýto fotobioreaktor je nejjednodušší na stavbu a vyžaduje minimum energie na provoz. Je zde však riziko kontaminace vody a separace mikrořas je nákladnější z důvodu jejich nižší koncentrace. Modifikací této varianty je fotobioreaktor ve stylu umělé řeky, kdy cirkuluje v širokém korytu. Díky tomu se voda promíchává, což vede k lepšímu rozložení CO₂ ve vodě a následně i k vyšší koncentraci mikrořas. Hloubka vody se typicky pohybuje okolo 30 cm, jelikož ve větší hloubce by už bylo příliš mnoho světla vodou absorbováno [1],[2].



Obrázek 3 - potrubní fotobioreaktor



Obrázek 4 - deskový fotobioreaktor



Obrázek 5 - fotobioreaktor ve stylu umělé řeky

2.3 Parametry ovlivňující kultivaci

Mikrořasy obecně dokáží růst velmi snadno. Komplikací je nicméně to, že ve vodě se mohou množit i jiné nežádoucí organismy, jako např. sinice, jejichž přítomnost by mohla znemožnit následné průmyslové využití mikrořas. Mikrořasy rostou velmi rychle (jejich počet se může zdvojnásobit za 24 hodin), také díky tomu, že na rozdíl od vyšších rostlin nemusejí využívat žádnou energii na tvorbu jednotlivých orgánů. Parametry, které především ovlivňují kultivaci mikrořas jsou: [1].

- pH vody – Mikrořasy mohou být správně kultivovány pouze při správném pH vody což je 8.2 – 8.7, mimo tyto hodnoty nemohou mikrořasy dlouhodobě žít, jelikož začne docházet k rozpadu jejich buněčných stěn. Hodnotu pH lze regulovat pomocí změny množství oxidu uhličitého puštěného do vody, jelikož ten se ve vodě rozpouští a zvyšuje její kyselost [1].
- Osvětlení – konkrétní optimální hodnota světelného toku závisí na konstrukci fotobioreaktoru a aktuální koncentraci mikrořasy, jelikož jejich rostoucí počet postupně blokuje stále více světla. Optimální vlnová délka světla pro kultivaci je 380-500 nm (fialové a modré světlo) a 600-700 nm (červené světlo). Ideální nepřetržitá doba svícení by měla trvat přibližně 16-18 hodin pro ideální růst. Po této době je nutné přerušit svícení, jelikož mikrořasy při nepřetržitém osvětlení nerostou [1],[8].
- Teplota vody – ideální teplota se může lišit na základě geografie a tedy i rozdílných druhů mikrořas. Nicméně všeobecně lze říct, že mikrořasy porostou dobře při pokojové teplotě. Nižší teploty povedou k inhibici růstu, zatímco vyšší teploty povedou k přemnožení, kdy už by nebylo možné kultivaci správně regulovat. Zároveň by se také mohlo zásadně zrychlit množení nežádoucích organismů [1].
- Dostatek oxidu uhličitého – ideální koncentrace CO₂ se pohybuje od 200 do 1000 mg/L v závislosti na tom, co je složka, jejíž produkce chceme maximalizovat. Při koncentraci 400 mg/L produkovaly mikrořasy nejvíce cukrů a proteinů, zatímco při koncentraci 800 mg/L byla nejvyšší produkce lipidů [9].
- Kvalita vody – Voda musí obsahovat co nejméně dalších nežádoucích organismů, které by se mohly množit a kvalitativně zhoršit výslednou kulturu mikrořas. Voda také obsahuje další živiny (např. dusík, nebo fosfor), které jsou potřebné pro jejich růst. Voda může být sladká, nebo slaná podle toho, jestli se kultivují sladkovodní, nebo mořské mikrořasy [1],[8].

2.4 Využití mikrořas

V první řadě je tu již samotné zachytávání oxidu uhličitého, který je takto využit při fotosyntéze, místo toho, aby zůstal v atmosféře. Na 1 gram vyprodukovaných mikrořas se spotřebuje přibližně 1.6 – 2 gramy CO₂. Vyprodukované a odseparované řasy lze dále použít v různých odvětvích [11].

Jednou z možností je výroba biopaliv. Základem bionafty jsou sacharidy a lipidy, které se získávají z mikrořas. Ty se nejprve drtí pomocí různých metod zahrnující mikrovlny, ultrazvuk, mletí skleněnými, nebo keramickými kuličkami. Následně se provádí fermentace na přeměnu sacharidů na ethanol. Poté dochází k transesterifikaci, kdy reagují triacylglyceroly s ethanolem a vznikají jednoduché estery, které lze použít jako palivo. Jako katalyzátor se používají nejčastěji některé hydroxidy [1],[2].

Další možností je využití v potravinářství. Na základě správné volby druhu mikrořas a následné kultivace je možné výrazně ovlivnit podíl sacharidů a lipidů, podle toho, čeho chceme získat nejvíce. Mikrořasy tedy lze použít k výrobě různých doplňků stravy, nebo přímo jako součást potravin [2],[5].

Potenciál využití je ovšem i dalších odvětvích. Mikrořasy je možné využít ve farmakologii, konkrétně např. k výrobě léků na rakovinu, nebo při léčbě zánětů. Možné je také využití v textilním průmyslu, nebo např. při výrobě papíru, nebo v kosmetickém průmyslu.[5]

2.5 Problematika separace

Právě od průmyslového využití se odvíjí problematika separace. Separace mikrořas z média je jedním z nejsložitějších kroků celého procesu kultivace. Jejich koncentrace se obvykle pohybuje od 0.1 do 0.5 gramu sušiny v jednom litru vody. Maximální možná koncentrace je dána tím, jak velké množství světla může řasami zakalenou vodou prostoupit, a také tím jak velké množství kyslíku, který jejich růst inhibuje, se ve vodě kumuluje. Energie potřebná k separaci se obvykle pohybuje mezi 20-30% celkové energie potřebné ke kultivaci [2]. Cílem separace je získat sušinu (případně silně zahuštěnou kapalinu) s co nejvyšší efektivitou, tedy získat co největší podíl z celkového množství mikrořas, které se nachází ve vodě. Na ceně separace tedy může záviset, jestli vůbec má kultivace ekonomický smysl [2],[12].

Jednou z komplikací při separaci je také rozdílná velikost mikrořas, která se pohybuje od jednotek, do vyšších desítek mikrometrů v závislosti na druhu. To komplikuje především použití filtračních metod, které by mohly zachytit některé druhy mikrořas, zatímco jiné nikoliv. Další komplikací je jejich hustota. Ta se pohybuje okolo 1030 – 1100 kg/m³ a je tedy velmi

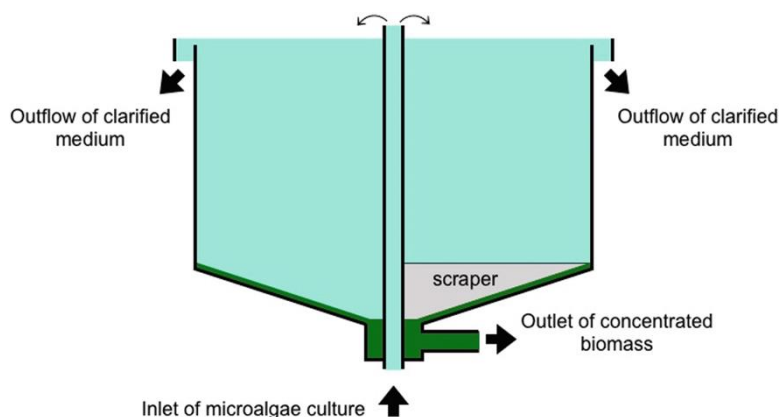
blízko hustotě vody, což výrazně stěžuje použití metod, které využívají právě rozdílných hustot řas a médií. Ještě větší problém je to v případě řas kultivovaných ve slané vodě, která má vyšší hustotu (přibližně 1025 kg/m³), která je ještě blíže hustotě mikrořas [2],[13].

Existuje celá řada metod na separaci mikrořas z vody, přičemž každá z nich se může hodit jen pro některé druhy mikrořas, jen pro určité typy fotobioreaktorů, nebo jen pro určitá průmyslová využití. V další části tedy budu rozebrány konkrétní metody separace mikrořas a to, v jakých situacích se mohou hodit a jestli mají potenciál pro jejich využití.

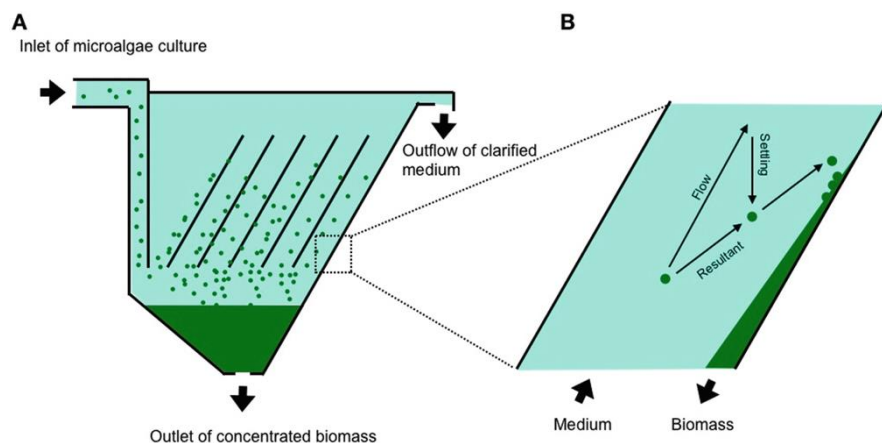
3 Separční metody

3.1 Separace působením gravitace

Sedimentace je jedním z nejjednodušších způsobů oddělení mikrořas od kultivačního média. Směs vody a mikrořas je přiváděna do nádrže a vlivem různé hustoty vody a mikrořas dochází k jejich postupnému usazování na dně (obr.6). Voda následně odchází přepadem. Další variantou je lamelový usazovák (obr. 7). V tomto případě dochází k průtoku vody kolem lamel, na kterých se mohou mikrořasy usazovat a následně spadávají do prostoru pod lamelami, odkud je možné je odčerpat [3],[17].



Obrázek 6 - Kruhový usazovák



Obrázek 7 - lamelový usazovák

Nejdůležitějším parametrem při usazování je usazovací rychlost. Tu lze spočítat podle vztahu, který je odvozený od Stokesova zákona (podle kterého závisí odporová síla na kulovité těleso v kapalině s rychlostí a dynamickou viskozitou):

$$v = \frac{2}{9} g \frac{r^2}{\eta} (\rho_p - \rho_k)$$

(1)

Kde r (m) je poloměr buňky jednotlivé mikrořasy, η (Pa.s) je dynamická viskozita kapaliny, ρ_p (kg/m³) je hustota pevné látky (tedy mikrořasy) a ρ_k (kg/m³) je hustota kapaliny [13].

Největším problémem při sedimentaci jsou velmi malé rozdíly v hustotě mikrořas a vody. Jak již bylo zmíněno, hustota mikrořas se pohybuje mezi 1030-1100 kg/m³, což je velmi blízko hustotě vody, což ve výsledku znamená velmi nízké sedimentační rychlosti. Pro příklad uveďme sedimentační rychlosti pro druh *Chlorella Vulgaris*, což je jeden z nejčastěji využívaných druhů mikrořas. Velikost buněk je přibližně 5 mikrometrů a jejich hustota je přibližně 1070 kg/m³. Pokud budou kultivovány ve sladké vodě o pokojové teplotě, tak vypočítaná rychlost sedimentace bude mít hodnotu přibližně 0.084 m/den, což je opravdu nízká rychlost. Nicméně, skutečné rychlosti se mohou značně lišit. V případě *Chlorella Vulgaris* byla experimentálně zjištěna rychlost až 3.6 m/den, což je řádově jiný výsledek. Důvodem toho je více faktorů. Především nejsou skutečné mikrořasy úplně kulovité, ale mohou mít různé tvary, což je dost možná dáno i evolučně, aby nesedimentovaly na dno, kde je méně světla. Dále nemusí mít všechny buňky stejnou velikost. Navíc nemusí mít jeden druh stále stejnou hustotu, jelikož může obsahovat různý poměr cukrů, lipidů a dalších složek. Rychlosti sedimentace je tedy nutné experimentálně ověřovat. Rychlost sedimentace většiny druhů se pohybuje od 0.4 do 22 m/den. Navíc některé druhy nesedimentují vůbec a zůstávají u hladiny. Nejčastější rychlost sedimentace bývá okolo 0.6 m/den [12],[13],[14],[15].

Celkový čas separace závisí na usazovací rychlosti, rozměrech zařízení a také na tom, jak velké procentuální množství mikrořas chceme z vody získat. Suspenzi lze separací zahustit přibližně na 10g/L a získat přibližně 65% biomasy obsažené ve vodě. Hodí se ovšem zmínit, že ve většině případů dosahuje koncentrace pouze v řádu jednotek gramů/L [13],[15],[17].

Hlavní výhodou sedimentační metody je nízká energetická náročnost a jednoduchá údržba, jelikož to jediné, co je třeba neustále pohánět, je čerpadlo. Konkrétní energetické výdaje závisí na konkrétním zařízení a druhu mikrořas, ale pro příklad můžeme uvést separaci *Chlorella Vulgaris*, kde byla spotřeba elektrické energie přibližně 0.05 kWh na m³ suspenze (s koncentrací 0.5 g/L) [14], přičemž z jednoho m³ se získalo přibližně 325 gramů. Výsledným produktem však nejsou čisté mikrořasy, ale pouze zahuštěná suspenze s koncentrací v nejlepším případě 10g/L. Dalšími nevýhodami sedimentace jsou často obrovské rozměry

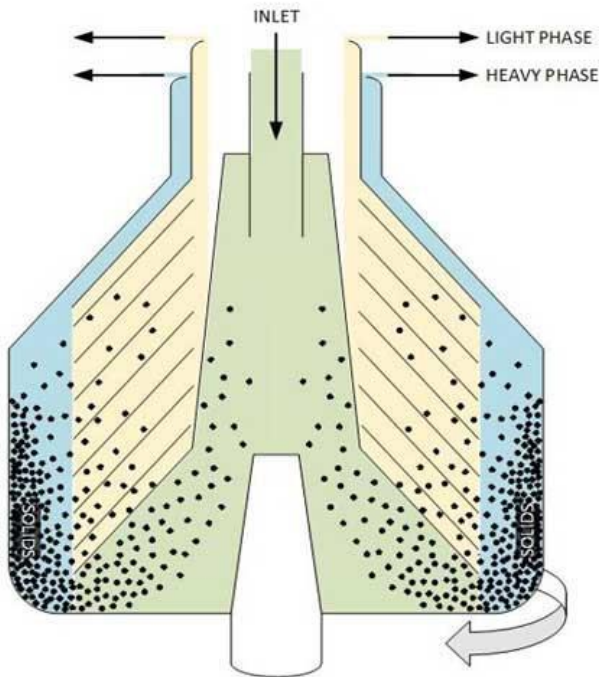
zařízení a nemusí být použitelné pro všechny druhy řas, z důvodu jejich rozdílných tokových vlastností [14],[17].

Hlavní využití sedimentace může být v případě fotobioreaktorů ve stylu umělé řeky, kde se obecně dosahuje nižších koncentrací (0.05-0.1 g/L). Sedimentaci může poté dávat smysl použít jako první krok separace a následně využít jinou metodu, se kterou už získáme daleko vyšší koncentraci [15],[17].

3.2 Separace pomocí odstředivé síly

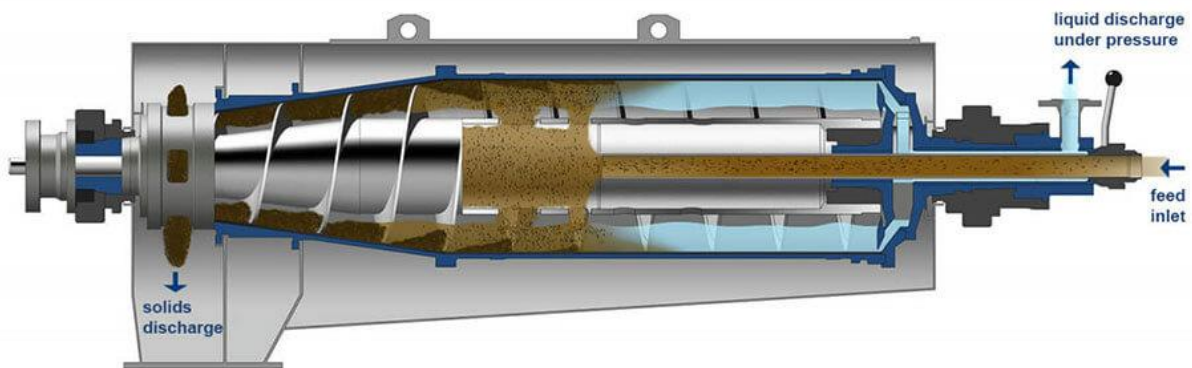
Separace pomocí centrifugy (nebo také odstředivky) se zakládá na stejném principu, jako sedimentace, tedy že mikrořasy a voda mají rozdílnou hustotu a jsou tedy různě ovlivněny zrychlením. Rozdíl je v tom, že centrifuga používá místo tíhového zrychlení odstředivé zrychlení, které může být řádově vyšší, což značně urychluje celý proces [20].

Existuje několik druhů odstředivek. Jednou z možností je disková odstředivka (obr. 8). Disková odstředivka využívá soubor disků, které fungují velmi podobně, jako lamely v lamelovém usazováku. Dochází na nich k usazování mikrořas, které jsou následně posouvány ke straně, kde se koncentrují. Disková odstředivka používá zrychlení 4000 až 14000krát vyšší, než je tíhové zrychlení. Nejvyšší možné zrychlení je omezeno především samotnými mikrořasami, které by mohly být při dostatečně vysokém zrychlení zničeny. Disková odstředivka dokáže zpracovat suspenzi s koncentrací od 0.2 g/L, dokáže z vody získat až 95% mikrořas a výsledná koncentrace se pohybuje okolo 25% hmotnosti, nicméně největším problémem je vysoká energetická náročnost, a to i v porovnání s jinými typy odstředivek. Při využití suspenze o koncentraci 0.2 g/L byla energie spotřebovaná na separaci více než 4krát vyšší, než energie, kterou bylo možné následně získat rafinací na bionaftu. Množství spotřebované energie může být až 1.43 kWh/m³ suspenze [13]. Energie potřebná na separaci se ovšem zásadně liší v závislosti na vstupní koncentraci. V případě koncentrace 5g/L už vyprodukovaná energie 10krát vyšší, než energie spotřebovaná odstředivkou. Z toho plyne, že v případě použití diskové odstředivky je nutné použít nejprve jinou metodu, na počáteční zvýšení koncentrace [3],[13],[19].



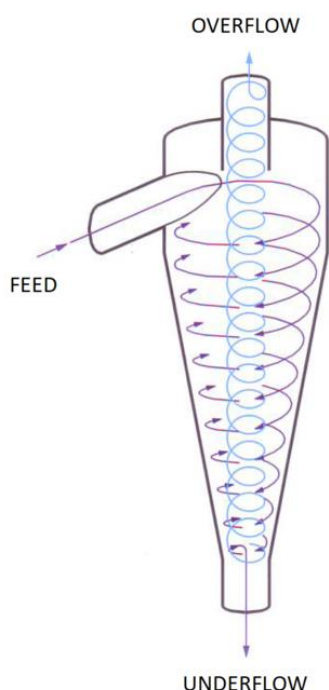
Obrázek 8 - disková odstředivka

Další možností je dekantační odstředivka (obr.9). Dekantační odstředivka funguje na principu otáčejícího se bubnu, který má tvar válce a kuželu. Do bubnu je přiváděna suspenze. Vlivem otáčení jsou složky s vyšší hustotou zachytávány na stěně, odkud se posouvají pomocí šnekového dopravníku směrem k odtoku. Díky kuželovému tvaru zde však neodtéká voda. Ta odtéká na druhé straně pomocí přepadu. Výhodou dekantační odstředivky je dosažení vyšší koncentrace výsledného produktu (více než 500g/L). Nevýhodou je ovšem enormní spotřeba energie (až 8 kWh/m³). Dekantační odstředivka dokáže zpracovávat i suspenze s výrazně vyšší koncentrací, což však není pro suspenzi mikrořas nijak užitečné. Z toho důvodu se dekantační odstředivky používají často pro odstraňování kalů z odpadní vody. Co se ovšem týče mikrořas, tak se dekantační odstředivky nejeví jako nejlepší možnost [3],[13],[19].



Obrázek 9 - dekantační odstředivka

Další potenciální možností je hydrocyklón (obr.10) . Jde o nádobu kuželovitého tvaru, do které je tangenciálně přiváděna suspenze. To způsobuje šroubovité proudění. Tuhá fáze sklouzává po stranách dolů, kde může být odebírána, zatímco voda odtéká v horní části. Hydrocyklóny potřebují výrazně méně energie, než jiné typy odstředivek, přibližně 0.3 kWh/m³. Problémem ovšem je velmi nízká účinnost separace. Hydrocyklón zvládl při testování zakoncentrovat suspenzi mikrořas z 1 g/L na 4 g/L, což je naprosto nedostačující. Efektivita hydrocyklónů není příliš dobrá pro separaci částic menších než 400 mikrometrů, přičemž ti y největší mikrořasy nemají více než 70 mikrometrů. Mimo to bylo zjištěno, že hydrocyklóny mohou více, než jiné druhy odstředivek narušovat buněčné stěny mikrořas, což komplikuje další zpracování. Jediné potenciální využití hydrocyklónu tedy může být jedině jako mezikrok pro částečné zahuštění. Na toto téma by však bylo třeba dalšího výzkumu [13],[19].



Obrázek 10 - hydrocyklón

U dalších druhů odstředivek, jako jsou např. válcové, nebo vícekomorové, existují poměrně zásadní problémy, které činí jejich použití pro separaci mikrořas velmi nepravděpodobné. Jde především o problémy spojené s čištěním a extrakcí zahuštěné směsi z odstředivky. Zde by byl také nutný další výzkum. [13],[19]

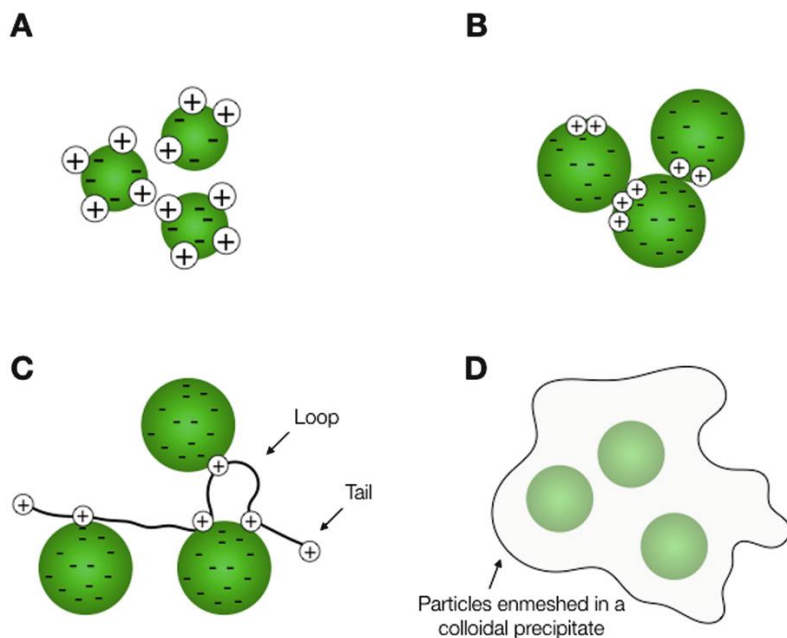
Mezi všemi druhy odstředivek je patrné, že jako nejvhodnější se, alespoň prozatím, jeví disková odstředivka. Množství spotřebované energie není tak velké v porovnání s dekantační odstředivkou a množství získaných mikrořas je pořád velmi vysoké. Pro výrazně vyšší účinnost je však vhodné, aby separaci v odstředivce předcházela ještě jiná metoda [3],[13],[19].

3.3 Flokulace

Flokulace je proces, při kterém jsou jednotlivé buňky mikrořas chemicky spojovány dohromady do větších shluků. To, znamená zásadně jednodušší následnou separaci pomocí sedimentace [2].

Mikrořasy mají negativní povrchový náboj, což je dáno především přítomností karboxylové (COOH) a aminové (NH₂) skupiny v buněčné stěně. Z toho důvodu se mikrořasy samy od sebe příliš nespojují a zůstávají rozptýlené ve vodním sloupci. Flokulace tedy nejčastěji spočívá v přidání pozitivně nabitého chemického aditiva, které se bude napojovat na jednotlivé mikrořasy, což odstraní jejich repulsivitu a umožňuje se spojovat do větších shluků. Ke flokulaci může docházet pomocí několika různých mechanismů:

- A. Neutralizace náboje – pomocí pozitivně nabitého aditiva dochází k neutralizaci na buněčných stěnách, což umožňuje shlukování mikrořas díky působení Van der Waalsových sil².
- B. Elektrostatické shlukování – aditivum v dostatečném množství způsobí lokální změnu náboje na kladný, což způsobí připojení další negativně nabitě molekuly.
- C. Přemostění – v případě, že je jako aditivum použit nějaký dostatečně dlouhý polymer, tak na sebe může navázat mnohem více molekul a tím je spojit
- D. Srážení – do vody se přidá aditivum, které se bude srážet a při tomto procesu mezi sebou uzavře i mikrořasy [12],[17].



Obrázek 11 - možnosti flokulace

² Van der Waalsovy síly – síly působící mezi neutrálními molekulami. Fungují na základě vzájemného působení dipólů jednotlivých molekul. V případě mikrořas jde tedy o molekuly tvořící jejich obal.[21]

Jednou z možností aditiv jsou hydrolyzující soli na bázi kovů, jako jsou např. železa (FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), nebo hliníku (AlCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Tyto soli vytvářejí ve vodě volné kladně nabitě ionty, které se mohou následně vázat na mikrořasy. Hydrolyzující soli vytvářejí poměrně velké, avšak nepříliš pevné shluky. Zásadním problémem je ovšem optimální hodnota pH pro tyto reakce (5-5.5 pro hliník a 3.7-4.2 pro železo), která je výrazně nižší než běžná hodnota pH vody, ve které se mikrořasy kultivují (8.2-8.7), což by vyžadovalo poměrně velkou úpravu. V takto kyselé vodě nejsou schopny řasy trvale přežít a bylo by tedy nutné je separovat a usušit co nejrychleji. Relativně vysoká koncentrace aditiv (120-1000 mg/L) navíc limituje použití výsledných mikrořas. Lepším řešením se zdají být soli na bázi hliníku, které už prošly hydrolyzou, jako je polyaluminiumchlorid (PACl), které správně fungují ve větším rozsahu pH (5.0-9.0) a shluky vytvořených řas jsou pevnější. Další výzkum je nicméně potřeba. [12],[17] Další možností jsou některé polymery, které na sebe dokážou navázat mnoho buněk mikrořas. Jedním z již testovaných aditiv je Magnafloc LT25 (jde o druh polyakrylamidu), který je možné použít na flokulaci mnoha druhů mikrořas. Výhodou je, že stačí velmi malé dávkování (přibližně 0.5 mg/L). S pomocí tohoto aditiva je možné získat přibližně 70% mikrořas ve vodě a zbytková voda je navíc, na rozdíl od některých jiných aditiv, rovnou znovupoužitelná bez nutnosti další úpravy [12],[13].

Jak již bylo zmíněno, jedním z důležitých parametrů při flokulaci je ideálně i zdravotní nezávadnost, která je nutná, pokud chceme využít mikrořasy v potravinářství. Proto je dobrý nápad hledat flokulanty také mezi potravinářskými produkty, kde můžeme rovnou garantovat zdravotní nezávadnost. Jedním z těchto produktů je chitosan. Jde o polysacharid, který se získává z krunýřů krevet a podobných členovců. Chitosan dokázal z vody získat přibližně 92% mikrořas, což je velmi dobrá hodnota. Vyžaduje ovšem silnější dávkování, než jiné druhy flokulantů, přibližně 30 mg/L. Díky jeho zdravotní nezávadnosti a účinnosti by ovšem mohl být vhodný pro další testování [29],[30].

Flokulace ale nemusí být založena přímo na umělé externí složce. Je možné použít mikroorganismy, jejichž produkty spustí flokulaci, nebo rovnou jejich produkty. Tomuto procesu se říká bioflokulace. Příkladem může být bakterie *Bacillus Subtilis*, která produkuje kyselinu polyglutamovou, která funguje jako flokulant. Problémem je ovšem obtížnější regulace procesu flokulace a také fakt, že některé mikroorganismy mohou být nežádoucí v případě potravinářského využití mikrořas [17],[20].

Poslední možností je autoflokulace, při které dochází ke flokulaci bez použití nějaké externí složky jako flokulantu. K autoflokulaci dochází při vyšších hodnotách pH (více než 9). Důvodem jsou ionty přirozeně se vyskytující ve vodě. Autoflokulaci mohou způsobovat např.

uhličitan vápenatý, fosforečnany nebo např. srážení hořčíkových sloučenin. Díky tomu není nutné přidávat žádné složky, které by mohly způsobovat problémy v následném zpracování. Jediné co je nutné, je zvýšit pH, čehož lze docílit např. snížením koncentrace CO₂, pomocí kterého se pH reguluje. Nevýhodou může ovšem být to, že schopnosti flokulace jsou přímo závislé na složkách vstupní vody [12],[13],[17].

Pokud se podaří mikrořasy spojit do shluků, tak může následovat sedimentace, která probíhá zásadně jednodušeji díky mnohem větším (oproti jednotkám až desítkám mikrometrů mohou být shluky mikrořas několik milimetrů velké) částicím. Sedimentace tak trvá obvykle v řádu minut oproti i klidně několika dnům. Energetická náročnost je tak velmi nízká a prakticky jediné náklady jsou náklady na dané flokulanty. Ovšem ne všechny flokulanty lze použít ve všech případech v závislosti na následném využití mikrořas. Pro využití mikrořas na výrobu paliv se jeví jako dobrá možnost bioflokulace, jelikož kontaminace jinými organismy zde není problém. V případě potravinářského využití bude lepší možností jeden ze syntetických polymerů. Rozhodně je ale v tomto ohledu co dále zjišťovat a na téma flokulace mikrořas by byl vhodný další výzkum [2],[12],[17].

3.4 Filtrace

Filtrace spočívá v použití filtru, kterým dokáže projít voda, ale mikrořasy nikoliv. Jedná se tedy o separaci na základě velikosti. Je nutné, aby voda skrz filtr stále proudila a je tedy třeba vytvořit dostatečný tlakový spád [2].

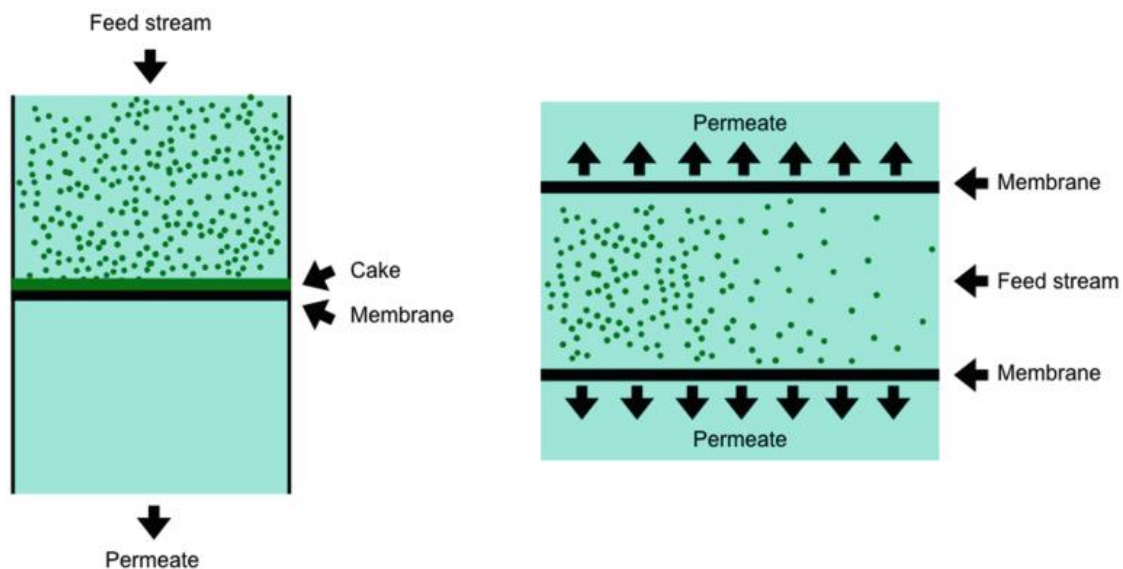
V první řadě je třeba vybrat filtr s vhodnou velikostí pórů. Příliš velké póry by znamenaly možnost průchodu řas a příliš malé naopak snadnější ucpávání a vyšší cenu. Mikrořasy mají velikost typicky od 3 do 30 mikrometrů (některé druhy mohou být i větší) a každý filtr je tedy nutné volit na základě konkrétního druhu, pro který je filtrace navrhována. Dále je také třeba dbát na to, že ani v rámci jednoho druhu nemusí být všechny mikrořasy stejně velké. Navíc nejsou mikrořasy zcela pevné a jsou do značné míry schopny pod tlakem měnit svůj tvar. Ve výsledku to znamená nutnost použít jemnější filtry, než by se mohlo na první pohled zdát. V případě často používaných druhů *Chlorella* a *Cyclotella*, které mají velikost obvykle okolo 5-6 mikrometrů je pro zachycení většiny mikrořas nutné použít filtry s póry o velikost přibližně 1.5 mikrometru [12],[13].

Další důležitý parametr je materiál. Zde je cílem především co nejvyšší odolnost proti opotřebení a co nejnižší cena. Jako materiál lze použít celou řadu polymerů, jako je polyvinylchlorid (PVC), polyvinylidenfluorid (PVDF), nebo polyethylentereftalát (PET). Zajímavou a perspektivní možností je ovšem využití filtrů vyráběných z bavlněných vláken.

Tyto filtry dokázaly při testech získat z vody až 93% všech mikrořas, což bylo více, než jiné filtry ze syntetických materiálů. Takovéto filtry jsou navíc velmi levné a jejich výroba i recyklace je šetrnější k životnímu prostředí [17],[23].

Suspenze vody a mikrořas může být filtrována podle směru průtoku dvěma způsoby (obr. 12):

- A. Celá směs protéká filtrem, ve kterém jsou zachytávány mikrořasy a voda protéká dál. Řasy jsou poté shrabávány z filtru. Jde o jednodušší a skladnější řešení. Problémem je ovšem to, že řasy jsou velmi pružné a kvůli tlaku vody mohou poměrně snadno filtr ucpat.
- B. Směs protéká podélně s filtry, kterými může voda prostoupit. Směs se tak postupně zahušťuje. Pokud nedojde k dostatečnému zahuštění při prvním protečení, tak lze směs prohánět přes filtrační systém opakovaně. Toto řešení zamezuje ucpání a je proto obecně vhodnější pro většinu aplikací [13],[17].



Obrázek 12 - způsoby filtrace

Jednou z variant může být bubnový filtr. V tomto případě je část bubnu, jehož povrch je tvořen filtrem, ponořena v kultivačním médiu a uvnitř bubnu je vytvořen podtlak, což způsobí, že voda je protahována skrz filtr a na jeho povrchu ulpívají mikrořasy. Ty mohou být díky rotaci bubnu následně odebrány. Problémem je ovšem poměrně vysoká energetická náročnost, dána především vytvářením podtlaku uvnitř bubnu. Množství energie je přibližně 1.5 kWh/m³ suspenze [17],[24].

Asi jako v tuto chvíli nejvhodnější způsob filtrace se jeví pásová filtrace. Ta spočívá v pásovém dopravníku tvořeného filtrem, který je částečně ponořen v suspenzi. Jak pás vyjíždí z vody, tak na něm zůstávají mikrořasy, které mohou být následně odebrány. Množství spotřebované energie je zde nižší (přibližně 0.5 kWh/m³) [13], nicméně nevýhodou je to, že

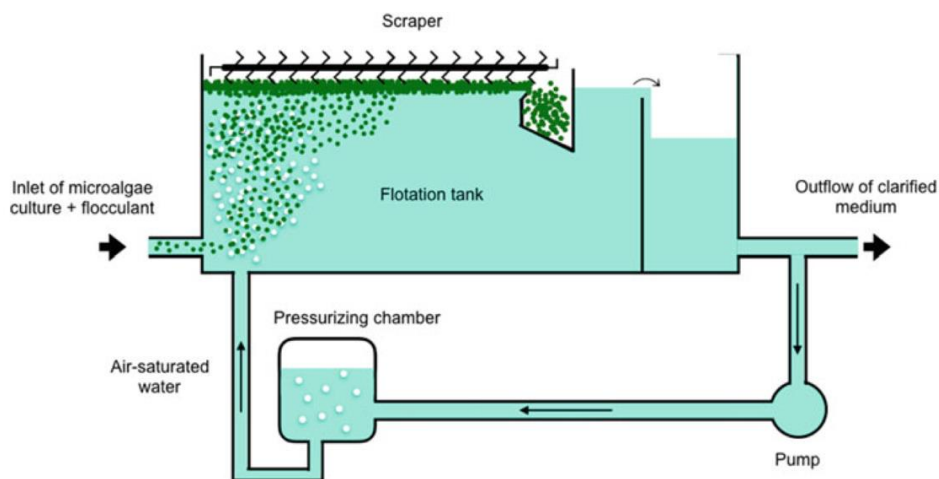
vstupní koncentrace mikrořas musí být alespoň 6g/L, jinak procento získaných mikrořas značně klesá. Je tedy nutná určitá předúprava na primární zvýšení koncentrace [13],[17],[25].

Separace mikrořas pomocí filtrace je tedy možná, avšak prakticky nikdy ji nelze použít jako jedinou metodu. Možná varianta je flokulace mikrořas s následným využitím pásové filtrace. V tomto případě lze ještě dále snížit množství potřebné energie. Hlavním problémem filtrace není ani tolik cena a odolnost samotných filtrů, jako spíš množství energie potřebné na pohyb vody [2],[12],[13].

3.5 Flotace

Flotace je v podstatě opakem sedimentace. Cílem je zařídit, aby mikrořasy měly nižší hustotu, než voda, což povede k tomu, že vystoupají k hladině, odkud je lze odebrat. Toho se docílí pomocí bublinek plynu, které se přivádějí do vody. Ty následně přilnou k mikrořasám, které tím budou mít nižší hustotu a zůstanou u hladiny [2],[17].

Existují tři možnosti, jak dostat plyn do vody. První možností je metoda rozpuštěného vzduchu (DAF – dissolved air flotation). Ta spočívá v tom, že se vzduch stlačuje (přibližně na 200 000 až 600 000 Pa) v oddělené nádrži s vodou. To způsobí, že se vzduch začne masivně rozpouštět ve vodě. Takto saturovaná voda (až 15% obj. konc.) je následně pouštěna do nádrže s mikrořasami, ve které je atmosférický tlak. Vlivem změny tlaku se vzduch začne masivně uvolňovat a vázat na mikrořasy. Ty lze poté sbírat na hladině ve formě pěny. Výhodou je tvorba velkého množství velmi malých bublin vzduchu (10 – 100 mikrometrů), což znamená zachycení velkého množství mikrořas. Další výhodou je také to, že s poměrně na separaci většího množství mikrořas není třeba velká zastavbová plocha. Největší nevýhodou je ovšem velmi vysoká spotřeba elektrické energie (přibližně 7.6 kWh/m³) daná nutností komprese [2],[12],[17].



Obrázek 13 - separace pomocí flotace (metoda DAF)

Druhou možností je metoda disperze vzduchu (DiAF – dispersed air flotation). Ta spočívá, že se do vody přímo přivádí skrz pórovitý materiál vzduch, který takto vodou probublává a může se přichytit na mikrořasy. Spotřeba energie je přibližně poloviční oproti metodě DAF. Problémem je ovšem to, že bubliny vzduchu jsou příliš velké (700-1500 mikrometrů), což vede k tomu, že se tolik nepřichycují na mikrořasy, což vede k nutnosti přidávat další příměsi (tenzidy³), aby se řasy lépe navázaly na bubliny vzduchu [12],[26].

Poslední variantou je elektrolytická metoda (EF - electroflotation). Ta funguje úplně jinak, než zbývající dvě a spočívá v tom, že místo přivádění vzduchu do vody jsou v do ní zavedeny elektrody, kterými prochází elektrický proud. Tím dochází k elektrolyze a vznikají bubliny vodíku, které ulpívají na řasách. Bubliny jsou v tomto případě opět velmi malé (20-50 mikrometrů) a spotřeba energie je přibližně 0.3 kWh/m³ [17]. Největším problémem je zde ale rozklad elektrod, což způsobuje vylučování kovů do vody. To je problém především, pokud kultivujeme mikrořasy pro použití v potravinářství. Účinnost také není tak vysoká, jako v případě metody DAF [12],[17],[26].



Obrázek 14 - řasy vyloučené pomocí flotace

Separace mikrořas pomocí flotace je tedy možná, avšak taky má své problémy. Výhodami jsou především nízká zástavbová plocha a rychlost separace. Metoda DAF se jeví jako nejméně použitelná kvůli svým vysokým provozním nákladům. Metody DiAF a EF mají

³ Tenzidy – látky, které snižují povrchové napětí, a proto se samovolně koncentrují na fázovém rozhraní. Snižováním povrchového napětí usnadňuje tak rozpouštění.[27]

stejný problém, a to je kontaminace vody, kvůli čemuž nejsou použitelné v potravinářství, avšak metoda EF má ještě výrazně nižší spotřebu energie. Ve výsledku tedy lze flotaci použít např. při výrobě bionafty, avšak jiné metody se jeví jako lepší [2],[12],[17],[26].

3.6 Srovnání separačních metod

Při porovnání všech separačních metod vidíme (tab. 1), že žádná metoda není na první pohled jednoznačně lepší, než ty ostatní. Vidíme také, že čím levnější metoda je, tím více dalších problémů má. Na základě rešerše se jako nejvhodnější jeví flokulace, jelikož, na rozdíl od dnes často používaných odstředivek, by mělo být možné dosáhnout výrazně nižších investičních nákladů a zároveň by mělo být možné udržet potravinářskou kvalitu. Tématem druhé části práce tedy budou experimenty na využívání flokulantů

Tabulka 1 - porovnání separačních metod

Metoda (typ metody) ⁴	výhody	nevýhody	Energ. náročnost (kWh/m ³)
Sedimentace	-nízké náklady -jednoduchá údržba	-nízká výsledná konc. -velká zástavbová pl. -velmi pomalé	0.05
Odstředivka (disková odstředivka)	-vysoká výsledná konc. -rychlé	-vyšší náklady -riziko zničení buněk -nutná předúprava	1.43
flokulace	-jednoduché a efektivní -téměř nulová spotřeba el. en. -nízká zástavbová plocha	-náklady na flokulanty -závislé na kvalitě vody -vodu nelze recyklovat donekonečna	≈ 0 (jsou zde však náklady na flokulanty)
Filtrace (pásová filtrace)	-nízká energ. náročnost -žádná kontaminace vody	-nutná předúprava -závislé na velikosti řas	0.5
Flotace (metoda EF)	- nízká energ. náročnost -malá zástavbová plocha -rychlé	-nepoužitelné pro potravinářství	0.3

⁴ Pozn. – Některé separační metody mají více podruhů. V tabulce je uvedena vždy nejvhodnější varianta dané separační metody.

4 potravinové standardy a používání flokulantů

4.1 Potravinářská standardizace

Jak již bylo zmíněno, tak velkým problémem jsou zde ale právě dané chemické látky používané k flokulaci. Jelikož je zatím separace mikrořas pomocí flokulantů příliš nevyužívá, tak nemáme k dispozici žádné flokulanty určené přímo pro řasy. Momentálně využívané flokulanty jsou tedy původně určené nejčastěji k čištění vody a nikdy tedy nebyly určeny k použití v potravinářství [39],[40].

Jelikož jde o využití v potravinách, tak se zde nutně se zabývat potravinovým právem. Potravinové právo je část práva vymezená především evropskými předpisy. Při jejich tvorbě se ale zohledňují i požadavky mezinárodních norem na kvalitu a bezpečnost potravin, známé jako *Codex Alimentarius* [39],[40].

Existují dva základní typy předpisů pro potraviny: horizontální a vertikální předpisy. Horizontální předpisy jsou takové předpisy, které platí obecně pro všechny potraviny. Jedná se především o základní požadavky na bezpečnost potravin, a také např. předpisy o hygieně potravin, podmínkách skladování, atd. Vertikální předpisy se naproti tomu zabývají vždy konkrétní potravinou, nebo typem potravin [39],[40].

Většina základních požadavků na potraviny je uvedena v nařízení Evropské Unie 178/2002. Píše se zde sice, že potravina musí být bezpečná, ale jak přesně bezpečná (obsažené složky, atd.) musí být, se zde nedozvíme. Je tedy nutné se dále podívat spíše na konkrétní vertikální předpisy [39],[40].

Jelikož jsou mikrořasy zatím jen okrajově používaná potravina, tak zatím neexistují žádné normy zabývající se specificky mikrořasami. Dále je tedy třeba se zaměřit spíše na bezpečnost samotných flokulantů [42].

4.2 Používání flokulantů

Jelikož se jedná o celkem novou technologii, tak mnoho legislativy týkající se přímo potravinářskou bezpečností flokulantů není k dispozici. Je tedy spíše nutné se zaměřit na bezpečnost konkrétních chemických složek, které dané flokulanty obsahují a následně na potravinové právo obecně [40],[42].

Ke všem dnes prodávaným flokulantům jsou vždy volně dostupné bezpečnostní listy. Podobu těchto bezpečnostních listů upravují nařízení Evropské Unie 2015/830 a 1907/2006, jelikož české právo se tímto příliš nezabývá. Tyto bezpečnostní listy obsahují základní informace o složení, chemických vlastnostech, podmínkách skladování, ochraně, první pomoci

a především také o toxicitě. Nejčastěji se jedná o informace ohledně testování produktu na myších, (např. smrtelná dávka na kilogram hmotnosti, reakce na vdechnutí, atd). To nám dává základní obrázek ohledně bezpečnosti, avšak rozhodně to nestačí, na určení toho, zda je produkt potravinářsky bezpečný [40],[42].

4.3 Bezpečnost obsažených látek

Pokud není možné dále pracovat s flokulanty jako takovými, tak je nutné se zaměřit na konkrétní chemikálie, ze kterých jsou flokulanty složeny. Zde je opět nutné se zabývat evropským právem, jelikož české právo tyto informace buď nezná, nebo je přebírá právě z evropského práva [40],[42].

Jako názorný příklad použijme polyakrylamid, což je sloučenina používaná jako základ ve více flokulantech. Přímo bezpečností polyakrylamidu se zabývá nařízení Evropské Unie 2017/2158. Zde je uvedeno, jak má být nakládáno z potravinami obsahující polyakrylamid a také maximální povolené koncentrace. Má to ale jeden zásadní problém. Neexistuje jedna obecně platná povolená hodnota. Povolené hodnoty jsou závislé na typu potravin a hodnoty jsou dány jen pro některé druhy potravin, jelikož většina potravin polyakrylamid zkrátka neobsahuje. Zde ale nastává právě ten problém. Jelikož se zatím mikrořasy, u kterých byl použit polyakrylamid, nepoužívají, tak pro ně neexistuje žádná limitní hodnota, podle které by bylo možné určit, zda jsou dané mikrořasy potravinářsky bezpečné. Využití takovýchto mikrořas by tedy vyžadovalo nové studie a doplnění těchto nařízení, což by rozhodně nebyl jednoduchý proces. To samé bude platit, pokud se budeme zabývat dalšími látkami používanými pro flokulaci [40],[42].

4.4 Uvedení nové potraviny na trh

Kdokoliv chce v zemích Evropské Unie začít prodávat novou potravinu, tak musí dostat tuto potravinu na „Seznam Unie“. Jde o seznam určeným nařízením (EU) 2017/2470 a zřízený Evropskou komisí. Pro zařazení na tento seznam je nutné aby potravina na základě podložených důkazů nepředstavovala bezpečnostní riziko pro spotřebitele. Po podání žádosti přezkoumá potravinu Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA) a rozhodne, zda bude daná potravina zařazena na seznam, nebo ne [41].

4.5 Závěr potravinového práva

Závěrem lze říct, že pokud bychom chtěli začít využívat mikrořasy, na které jsme použili flokulanty, tak by to byl poměrně velký problém. Žádná legislativa týkající se specificky mikrořas neexistuje a ani při zkoumání legislativy jednotlivých složek se nic nedozvíme, jelikož jsou limitní hodnoty pro každou potravinu jiné. Využití mikrořas narůstá a dříve, nebo později můžeme očekávat novou legislativu, která by upravovala jejich použití, avšak v tuto chvíli by tedy bylo nutné pro získání povolení a zařazení na seznam povolených potravin provést nové studie zabývající se právě použitými flokulanty. Celý proces by tedy byl velmi zdlouhavý a také nákladný a možná i proto to zatím nikdo neudělal.

5 Experimentální část

5.1 Motivace a cíle práce

Jak již bylo zmíněno, tak na základě rešerše se jeví flokulace jako nejvhodnější metoda, především díky potenciálu dosáhnout nižších provozních nákladů a tím se přiblížit možnosti širšího využití mikrořas. K tomu je ale právě nutné najít ten správný flokulant. V další části práce tedy budou otestovány flokulanty a bude se experimentálně zjišťovat, zda vůbec fungují jako flokulanty pro mikrořasy a pokud ano, tak následně zjistit dávkování a přibližný čas potřebný k separaci.

Pro experimenty budou využity mikrořasy druhu *Chlorella Vulgaris*. Jde o jeden z nejběžnějších druhů mikrořas, který se velmi často používá ke kultivaci a následnému použití v potravinářství/při výrobě paliv. Důležitými parametry tohoto druhu při tomto experimentu jsou, že jednotlivé buňky mají velikost přibližně 5 mikrometrů a jejich hustota je velice blízká hustotě vody [3].

5.2 použité flokulanty

Zde estované flokulanty jsou flokulanty původně určené na úpravu vody (s výjimkou chitosanu). Používají se na odstranění nečistot z vody, takže by mohly být schopné odstranit z vody i mikrořasy. Mezi nimi byly voleny ty kationické, jelikož mikrořasy mají negativní povrchový náboj. Flokulanty byly poptány u výrobců a vybrány také na základě možnosti co nejlépe zaručit potravinářskou bezpečnost.

- Sokoflok FL 2250 (dále značen jen jako FL 2250) – kationický kapalný flokulant. Základní složkou tvořící floky je zde polyamin.
- Sokoflok FL 4440 (dále značen jako FL 4440) – kationický pevný flokulant. Na rozdíl od FL 2250 je základní složkou Polydiallyldimethylammonium chlorid (polyDADMAC), který má delší molekuly než FL 2250 a měl by tedy být schopen tvořit větší floky.
- Sokoflok 54 PWG (dále značen jako PWG 54) – kationický práškový flokulant. Základní složkou je zde polyakrylamid, který má nejdelší molekuly ve všech tří vzorku od Sokofloku a měl by tedy být schopen tvořit nejdelší molekuly.
- Chitosan – polysacharid vyráběný z chitinu, který se získává ze schránek korýšů. Chitosan se používá jako potravinářský doplněk, díky čemuž je možné zaručit, na rozdíl od ostatních, jeho potravinářskou bezpečnost [31].

- Magnafloc LT25 (dále značen jen jako Magnafloc) – kationický práškový flokulant, jehož základní složkou je polyakrylamid.
- Amcon Yesfloc CWE35 (dále značen jen jako CWE35) – kationický kapalný flokulant, jehož základní složkou je polyakrylamid.
- Amcon Yesflock CWE823AB10 (dále značen jen jako CWE82) – kationický kapalný flokulant, jehož základní složkou je polyakrylamid. Na rozdíl od CWE35 je zde koncentrace polyakrylamidu nižší, a měl by tedy potenciálně být potravinářsky bezpečnější.

5.3 Postup hlavního experimentu

Nejprve byl flokulant rozmíchán v demineralizované vodě pomocí magnetického míchadla. Koncentrace flokulantu se podle typu pohybovala od 1/250 do 1/1000. Všechny flokulanty byly míchány nejméně 1 hodinu.

Následně se připravil vzorek 150 ml roztoku mikrořas, který se opět položil na magnetické míchadlo. Poté se začal přidávat roztok flokulantu do roztoku mikrořas přibližně po 0.2 ml (přidávání přesného množství bylo někdy problematické, jelikož kvůli své viskozitě vytvářel roztok flokulantu na konci pipety poměrně velké kapky místo souvislého proudu kapaliny) v průběhu přidávání byly sledovány změny a cílem bylo určit množství flokulanty, kdy už nelze pozorovat žádné rozdíly ve velikosti floků, nebo průzračnosti vody. Tento experiment byl vícekrát opakován pro větší přesnost.

Nakonec byl použit větší vzorek mikrořas (300 ml) pro detailnější pozorování průběhu změn při přidávání flokulantu. Byla také pořízena fotografie při každém přidání flokulantu. Flokulant byl opět přidáván až do okamžiku, kdy nebylo možné pozorovat žádné změny. Jelikož pro většinu experimentů byl použit vzorek 150 ml mikrořas, tak množství flokulantu je vykádrěn v mililitrech roztoku. Na konci kapitoly je uvedena tabulka s přepočtem na mililitry roztoku na litr a na hmotnostní koncentraci samotného flokulantu.

6 Výsledky

6.1 PWG 54

Tento přípravek byl rozředěn ve vodě v poměru v koncentraci 1 g/L a dle očekávání fungoval vcelku dobře. Při postupném přidávání flokulantu docházelo k postupnému shlukování mikrořas a při přidání 3.2 ml byla získána téměř úplně průzračná voda. Další přidávání roztoku už neudělalo žádný rozdíl. Experiment byl poté vícekrát zopakován pro větší přesnost. Při dalších experimentech bylo dosaženo maximální flokulace při množství 2.8 ml, 3.0 ml, 3.0 ml a 2.8 ml, což nám dává průměrnou hodnotu 2.96 ml.

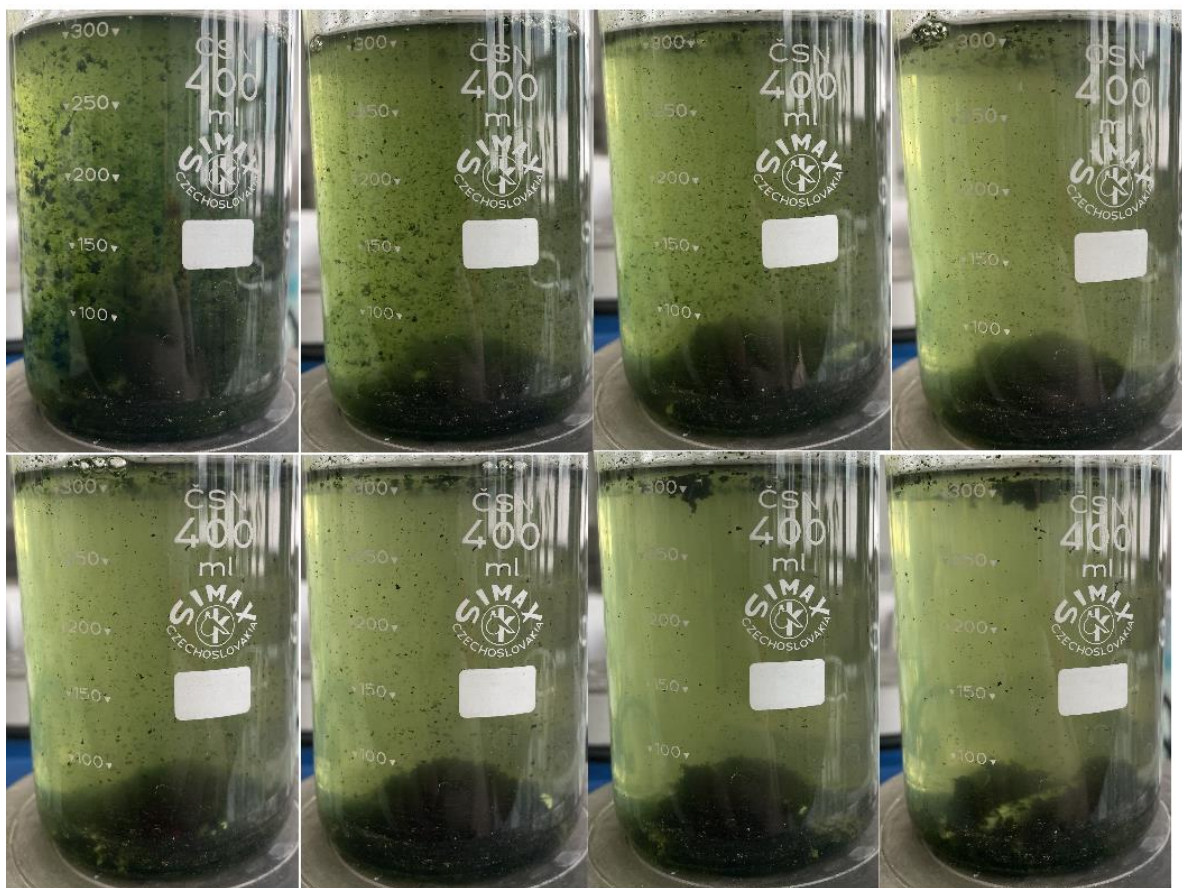


Obrázek 15 - roztok mikrořas před flokulací



Obrázek 16 - Roztok mikrořas po flokulaci pomocí PWG 54

Průměrná hodnota množství roztoku byla následně využita k vypočítání hmotnostní koncentrace čistého flokulantu v celém obsahu mikrořas. Ta činí 19.7 mg/L. V poslední části byl použit větší vzorek mikrořas (300 ml), a následně přidával postupně opět roztok flokulantu, abych mohl vidět průběžnou změnu průzračnosti vody. Zde bylo zjištěno, že je potřeba určité minimální množství flokulantu na to, aby se celý proces flokulace vůbec zahájil. Pro toto množství byla pořízena fotografie. Poté byl dále přidáván flokulant, dokud bylo možné pozorovat rozdíly a průběžně pořizovány snímky. Bylo možné si všimnout, že po přidání minimálního množství způsobí další přidávání stále menší rozdíl v průzračnosti vody až právě do chvíle, kdy nejsou rozdíly pozorovatelné.



Obrázek 17 - průběh flokulace (množství roztoku flokulantu – 3 ml, 3.5 ml, 4 ml, 4.5 ml, 5 ml, 5.5 ml, 6 ml, 7 ml)

6.2 FL 2250

V případě tohoto flokulantu nebylo bohužel dosaženo žádného výsledku. I po přidání skutečně velkého množství nebyly zpozorovány jakékoliv rozdíly v průzračnosti vody. Jelikož nebyl nalezen žádný zjevný důvod, proč flokulace nenastala (jako např. Nevhodné pH, nebo využití anionického flokulantu, které obecně na mikrořasy příliš nefungují), tak jde nejspíše o samotnou aktivní složku (polyamine), která zkrátka s mikrořasami nereaguje. Je vhodné nicméně zmínit, že tento flokulant zatím nikdo na mikrořasy netestoval, takže jsem neměl nutně předpoklad, že by fungovat měl.



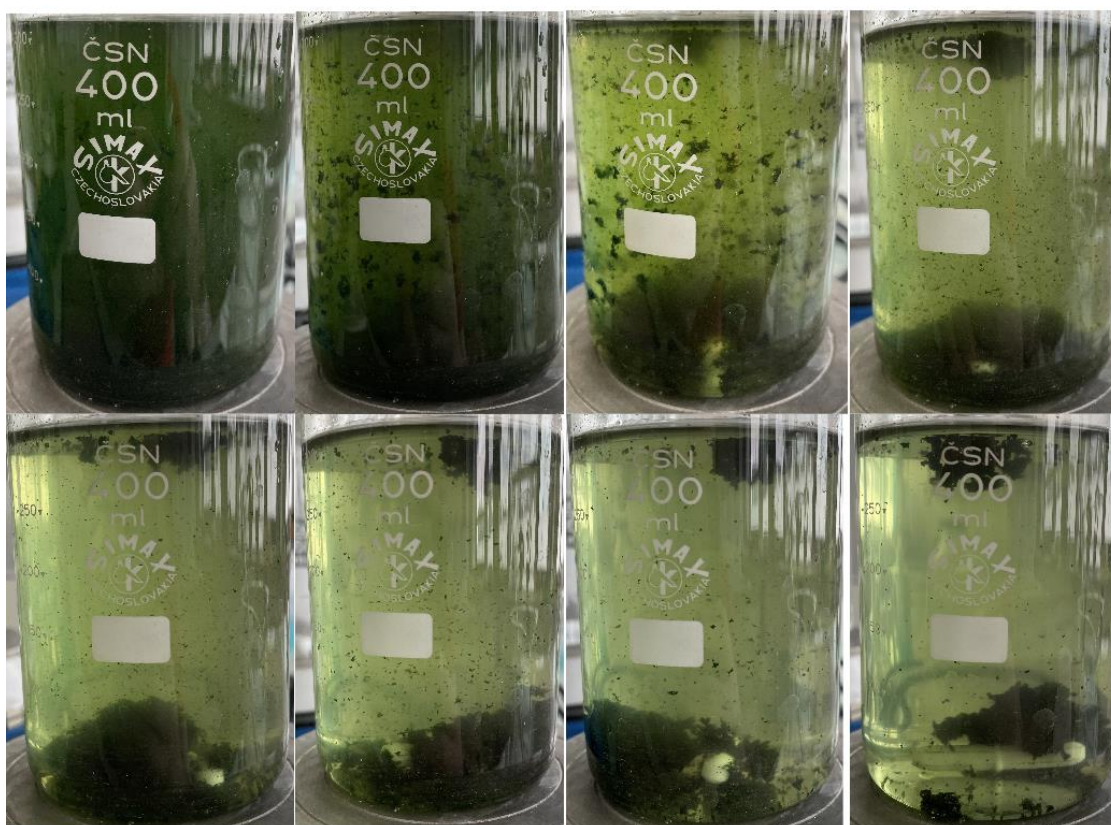
Obrázek 18 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí FL 2250

6.3 CWE 35

Tento flokulant opět fungoval velmi dobře. Samotný flokulant byl rozředěn ve vodě v koncentraci 2g/L a k maximální flokulaci došlo po přidání 1.6 ml do roztoku mikrořas. Experiment byl opět vícekrát zopakován pro průměrné množství 1.48 ml, což nám dává hmotností koncentraci 19.7 mg/L flokulantu ve vodě, což je shodou okolností úplně stejná koncentrace, jako v případě 54 PWG, což může být způsobené tím, že jsou oba dva založené na polyakrylamidu.



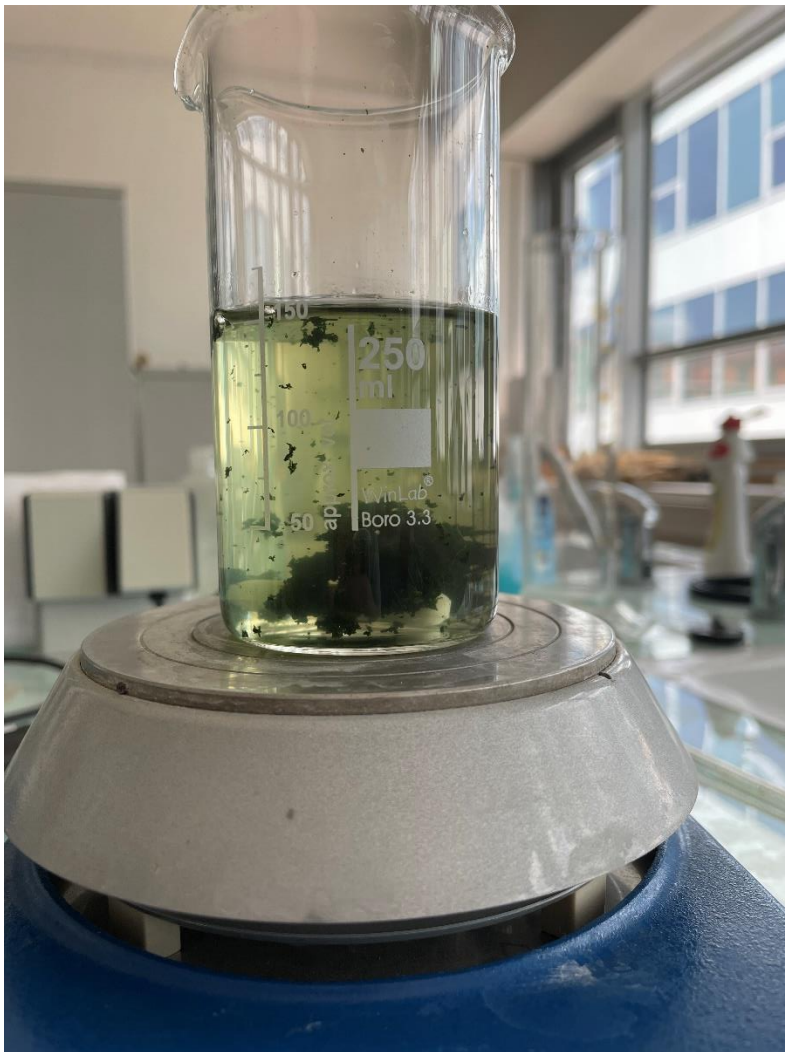
Obrázek 19 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí CWE 35



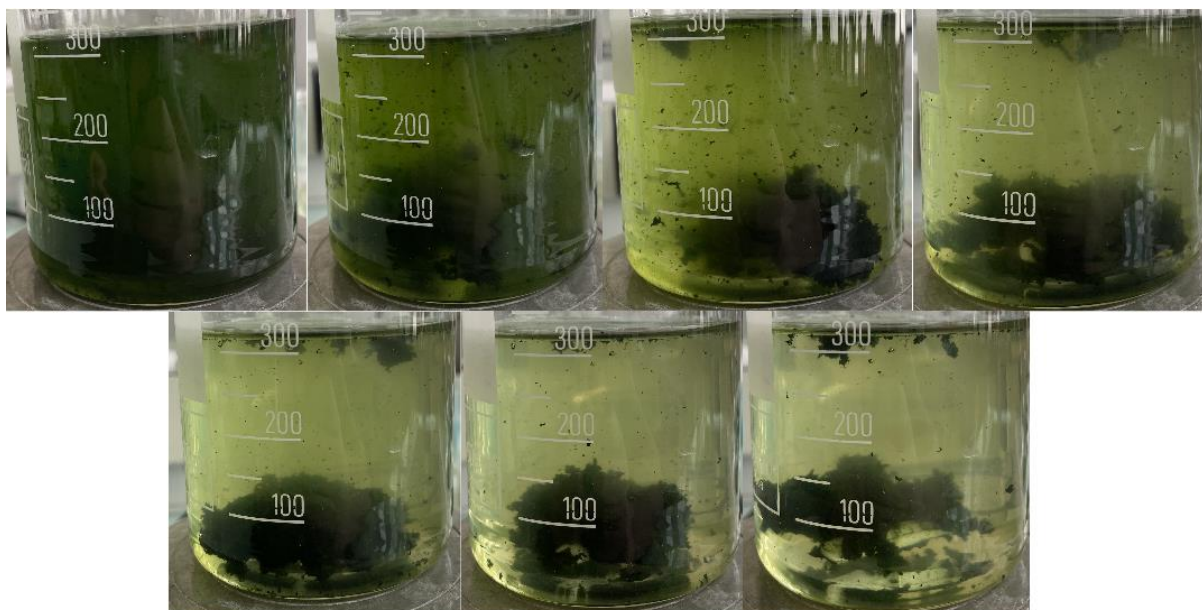
Obrázek 20 - průběh flokulace pomocí CWE35 (množství flokulantu – 1.7 ml, 2 ml, 2.4 ml, 2.8 ml, 3.2 ml, 3.6 ml, 4 ml, 5 ml)

6.4 CWE 82

Tento flokulant opět fungoval, avšak bylo ho zapotřebí podstatně více, konkrétně 3.2 ml při rozředění 2g/L. Při opakování experimentu byla změřená hodnota dokonce vyšší a ta průměrná tedy byla 3.34 ml, což znamená hmotnostní koncentraci 44.5 mg/L čistého flokulantu v roztoku mikrořas, což je více, než dvojnásobek oproti předchozím flokulantům. To může být způsobeno tím, že je tento flokulant také založen polyakrylamidu, avšak jeho podíl zde je nižší a bylo ho tedy třeba více.



Obrázek 21 – roztok mikrořas po flokulaci pomocí CWE 82



Obrázek 22 - průběh flokulace pomocí CWE 82 (množství flokulantu – 2.4 ml, 3.2 ml, 4 ml, 4.6 ml, 5.6 ml, 6.6 ml, 8 ml)

6.5 FL 4440

V tomto případě se opět bohužel jedná o flokulant, který nefungoval. K žádné flokulaci nedošlo ani po přidání výrazně většího množství flokulantu. Stejně jako v případě FL 2250 není ani zde zjevný důvod (např. pH), a patrně se tedy opět jedná o to, že aktivní složka (polyDADMAC) nereaguje s mikrořasami.



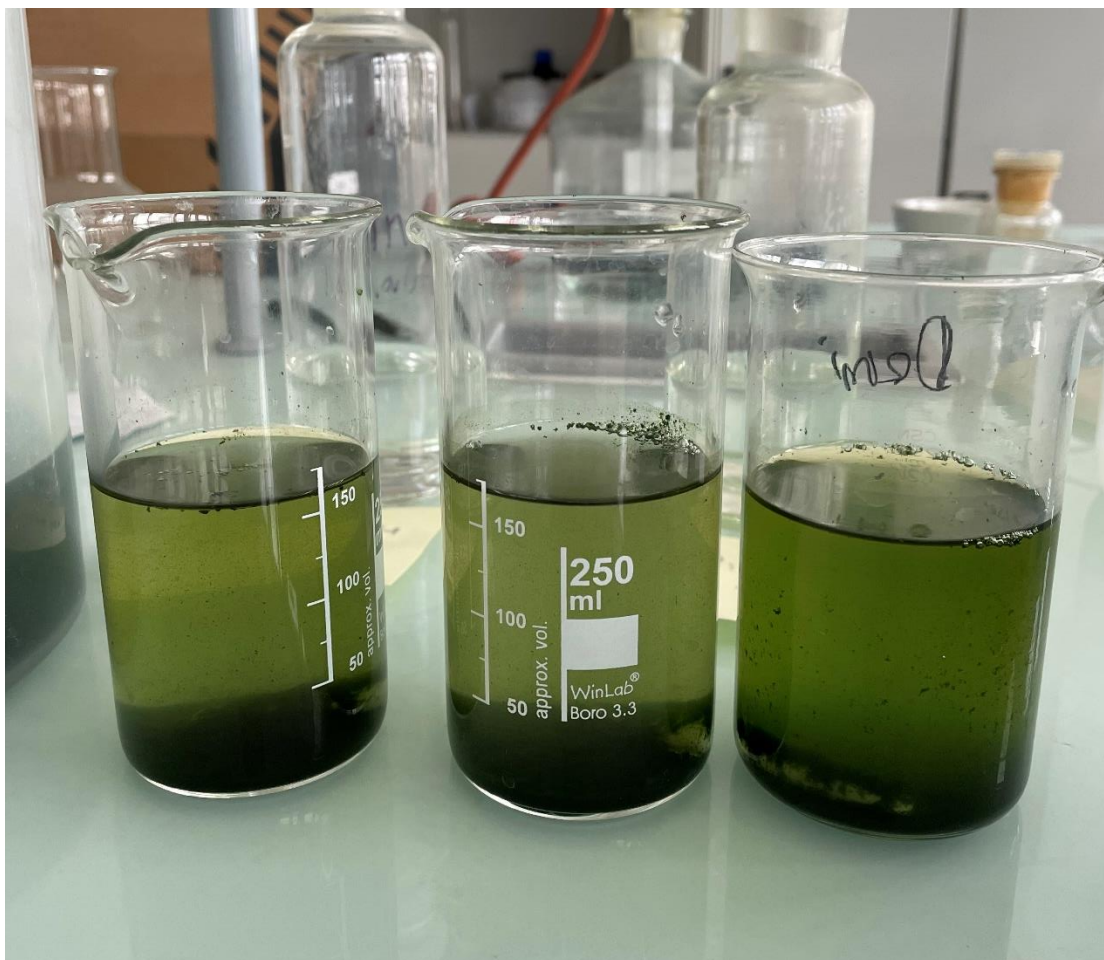
Obrázek 23 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí FL 4440

6.6 Magnafloc

Při prvním pokusu s tímto flokulantem nebylo možné zpozorovat jakékoliv změny v čistotě vody. Při bližším průzkumu využitých zdrojů [34] bylo zjištěno, že Magnafloc vyžaduje zvýšené pH, aby mohl fungovat. Na to byl využit 1 molární roztok hydroxidu sodného (přibližně 40 g/L), který byl následně ještě rozředěn v poměru 1:5 s vodou. Magnafloc byl mezitím rozmíchán v koncentraci 1 g/L. Na rozdíl od ostatních flokulantů zde bylo komplikovanější to, že bylo nutné najít optimální množství dvou složek a ne jen jedné, takže nestačilo pouze jen přidávat složku, dokud flokulace neproběhla. Bylo tedy nutné vyzkoušet mnoho kombinací pro nalezení ideálního množství složek. Výsledkem je, že optimální množství roztoku hydroxidu je 9 ml a roztoku flokulantu 4 ml, což znamená molární koncentraci hydroxidu 0.012 mol/L a hmotnostní koncentraci flokulantu 26.7 mg/L. Měření bylo komplikovanější navíc proto, že tento flokulant tvořil na rozdíl od ostatních výrazně menší floky, což znamenalo, že sedimentace byla výrazně pomalejší (jeden vzorek sedimentoval přibližně 20 – 30 minut). Zajímavé také je, že u předchozích flokulantů se po přidání více, než optimálního množství už nic nedělo a nebyly pozorovány už žádné změny, zatímco u Magnaflocu se při použití příliš velkého množství průzračnost vody snížila.



Obrázek 24 - vzorky mikrořas (množství hydroxidu - 7 ml, množství flokulantu - 3 ml, 4 ml, 5 ml)



Obrázek 25 - vzorky mikrořas (množství hydroxidu - 9 ml, množství flokulantu - 3 ml, 4 ml, 5 ml)

6.7 Chitosan

Posledním testovaným flokulantem byl chitosan. Práce s ním byla značně podobná práce s Magnaflocem. Při prvním experimentu také nebylo dosaženo žádného výsledku. Důvodem bylo patrně to, že chitosan se v čisté vodě nerozpouští. Po chvíli míchání ležel opět usazený na dně. Poté bylo zjištěno [35], že aby fungoval, tak je nutné ho rozpouštět v kyselém prostředí. 0.2 g chitosanu byl rozmíchán v 20 ml 0.1 molárního roztoku kyseliny chlorovodíkové. Poté, co se rozpustil byl tento roztok rozmíchán v poměru 1:10 s vodou a následně dávkován do roztoku mikrořas. I samotná flokulace probíhala podobně, jako u Magnaflocu. Floky zde vytvořené byly také výrazně menší a trvalo 20-30 minut, než sedimentovaly na dno. Flokulantu bylo nicméně potřeba docela velké množství. Pro optimální flokulaci bylo nutné přidat 13 ml roztoku, což znamená 86.7 mg/L čistého flokulantu. V případě chitosanu to sice není problém z hlediska bezpečnosti potravin, jelikož se jedná o doplněk stravy, avšak znamená to vyšší náklady na separaci. Z potravinářského hlediska není ani problém přidání kyseliny, jelikož se jedná o naprosto zanedbatelně malé množství.



Obrázek 26 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí chitosanu (množství flokulantu - 11 ml, 13 ml, 15 ml)

6.8 porovnání flokulantů

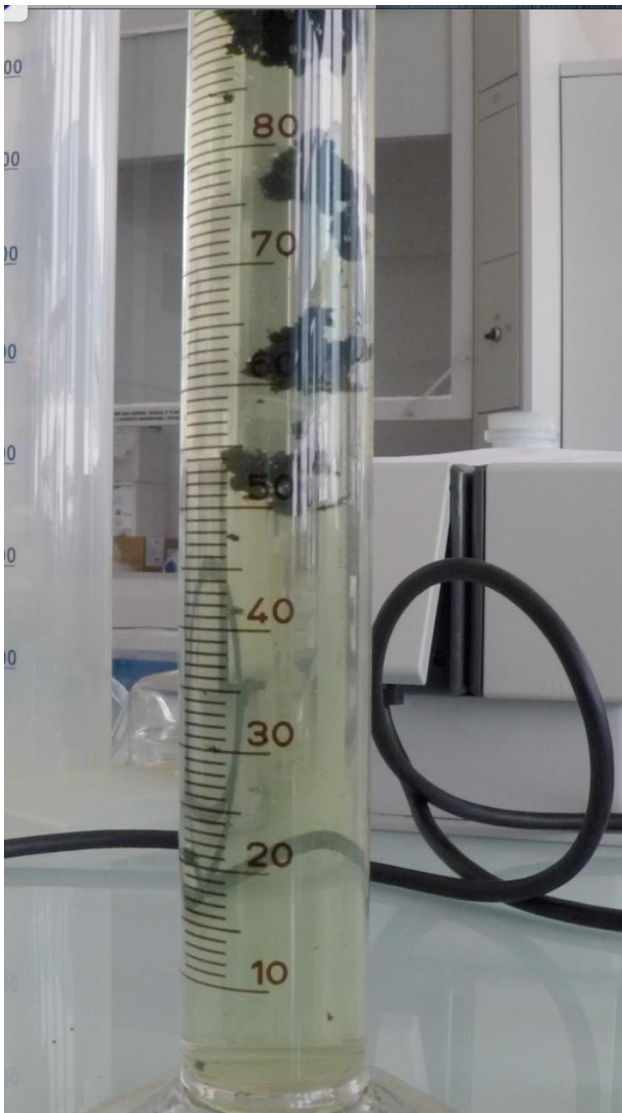
Většina flokulantů (s výjimkou FL 2250 a FL 4440) dokázala vytvořit floky mikrořas. Flokulanty můžeme rozdělit do dvou skupin podle toho, jako flokulaci vyvolaly. Flokulanty 54 PWG, CWE 35 a CWE 82 tvořily poměrně velké floky, které rychle sedimentovaly. Všechny tři také dosáhly velmi podobné čistotě vody. Magnafloc a Chitosan naproti tomu tvořily mnohem menší floky s výrazně nižší sedimentační rychlostí a navíc oba potřebovaly pro zahájení flokulace ještě další složku upravující pH.

Tabulka 2 - porovnání jednotlivých flokulantů

flokulant	Množství roztoku flokulantu (ml)	Hm. Koncentrace flokulantu v kultiv. médiu (mg/L)	poznámka
54 PWG	2.96	19.7	
FL 2250	x	x	nefungoval
FL 4440	x	x	nefungoval
CWE 35	1.48	19.7	
CWE 82	3.34	44.5	
Chitosan	13	86.7	Bylo třeba navíc ještě kyseliny chlorovod.
Magnafloc	4	26.7	Bylo třeba navíc ještě hydroxidu sodného

6.9 sedimentační rychlost

Po měření množství flokulantů následovalo měření sedimentační rychlosti. Měření probíhalo tak, že nádobka s mikrořasami byla přelita do odměrného válce, který byl snímán vysoko snímkovou kamerou. Záběr byl poté zpomalen a podle času a délky odměrného válce byla spočítána výsledná sedimentační rychlost. Všechny flokulanty (s výjimkou chitosanu a magnaflocu) tvořily téměř stejně velké floky a tedy i efektivně stejnou sedimentační rychlost. Ta je 15 mm/s, tedy 54.1 m/hod. Hodí se nicméně zmínit, že ve vodě se vyskytují různě velké floky a ty menší mohou mít i výrazně nižší sedimentační rychlost. Rychlost je ale v každém případě nesrovnatelně vyšší, než rychlost sedimentace čistých mikrořas (0.001-0.002 m/hod) [3].



Obrázek 27 - měření sedimentační rychlosti

Komplikovanější je to ovšem v případě chitosanu a Magnaflocu. Zde se totiž tvořily výrazně menší floky a šlo tedy spíše o suspenzi, která pomalu sedimentovala. Vzhledem k tomu, že nelze pořádně sledovat konkrétní částici, tak jsem pouze sledoval, jak se mění čistota vody. Výsledná sedimentační rychlost byla stanovena na přibližně 0.2 m/hod, což je ale stále podstatně rychlejší, než již zmiňovaná sedimentační rychlost čistých mikrořas.

7 Cenová bilance procesu produkce mikrořas

7.1 Sušení

Nehledě na to, kterou metodu separace využijeme, tak nakonec je vždy nutné řasy vysušit. Hlavní problém sušení spočívá v tom, že se jedná o energeticky velmi náročný proces. Vzhledem k vysoké měrné tepelné kapacitě vody a vysokému měrnému skupenskému teplu je třeba velké množství energie. Na vysušení 1 kilogramu řas je potřeba (pokud budu vycházet z koncentrace, která byla experimentálně změřena – 108.5 g/L – viz níže) přibližně 21.9 MJ (spočítáno na základě měrné tepelné kapacity vody a výparného tepla) při počáteční teplotě 20°C. To je ovšem pouze minimální množství energie, které teoreticky potřebujeme. Ve skutečnosti to bude o něco více [13].

Nejčastěji se k sušení používá mikrořas proud horkého vzduchu (rozprašovací sušárny), avšak jsou i jiné alternativy. Jednou z nich je sušení pomocí zmrazení, které spočívá ve zmrazení produktu a následnému snížení okolního tlaku, což způsobí, že zmrazená voda začne sublimovat. Produkt se podchlazuje na teplotu přibližně -50°C až -80°C. Výhodou této metody je odstranění ještě většího množství vody (odstranění až 98.5% vody oproti přibližně 95% v případě u sušení horkým vzduchem), avšak provozní náklady jsou v tomto případě také vyšší. Další možností je solární sušení, které je pochopitelně nejlevnější, avšak velmi závisí na počasí a navíc je třeba poměrně velká plocha na usušení nepříliš velkého množství mikrořas [13], [32], [33].

7.2 výsledná koncentrace

Koncentrace mikrořas v kultivačním médiu byla 0,8 g/L. Jelikož velikost floků byla u většiny flokulantů stejná, tak byly pro určení výsledné koncentrace použity floky získané pomocí CWE35. Po separaci byla získána suspenze mikrořas a zbytkové vody o hmotnosti 31.84 g. Po vysušení v sušárně zbylo 3.46 g sušiny. To znamená výslednou koncentraci 108.51 g/L – tedy 108.51 g sušiny v 1 L zbytkové vody. Ve výsledku byl tedy získán roztok, který má přibližně 135.6 krát větší koncentraci, než na začátku.

Co se týče účinnosti, tak vodu, která zbyla po flokulaci už nebylo možné otestovat na přesné množství mikrořas, jelikož jich tam už od pohledu příliš mnoho nezbylo a tak malé množství by nebylo možné přesně zvážit. Výsledná účinnost bude záviset především na způsobu odfiltrování floků. Já žádné filtry k dispozici neměl, takže nějaké floky mohly být

vylyty. Nicméně při použití filtru je účinnost velmi vysoká, obvykle před 90%. Zároveň bylo otestováno, jestli není možné odseparovat i řasy, které po flokulaci zůstanou ve vodě, ale nehledě na přidaném množství flokulantu už žádná změna nenastala. Lze tedy konstatovat, že je nutná určitá minimální koncentrace, aby flokulace mohla proběhnout [13].

7.3 Výpočet ceny

Výrobní náklady se budou skládat ze tří částí: cena kultivace, separace a sušení. Počítání celkové ceny je ovšem značně problematické, jelikož do toho vstupuje celá řada proměnných. Cenu zásadně ovlivňuje způsob kultivace, dále samozřejmě pak způsob separace. Záleží samozřejmě i na druhu mikrořas, tomu, zda jsou potravinářsky bezpečné, nebo na obsahu jednotlivých složek (množství cukrů, lipidů, atd.)

Cena kultivace se odvíjí především od typu fotobioreaktoru a využitím světla. Uzavřené fotobioreaktory s umělým zdrojem světla dosahují obecně vyšší koncentrace, než ty otevřené a využívající sluneční světlo, ale zároveň mají také mnohem vyšší provozní náklady. Pro účely tohoto experimentu jsou použité náklady na kultivaci v uzavřeném fotobioreaktoru s umělým osvětlením, jelikož koncentrace využitého kultivačního média (0.8 g/L) se blíží spíše koncentracím v uzavřených fotobioreaktorech. Náklady na kultivaci v takovém fotobioreaktoru mohou být přibližně 32 \$/kg, tedy přibližně 760 Kč/kg sušiny [36]. Cena se však opět může lišit v závislosti na konkrétní dosažené koncentraci, konstrukci fotobioreaktoru, atd.

Cena separace je v tomto případě dána cenou a množstvím samotných flokulantů (energetické nároky na přípravu flokulantů jsou zanedbatelné). Po demonstraci použijme flokulant 54 PWG, kterého bylo potřeba 19.7 mg na 1 L kultivačního média, což znamená hmotnostní podíl 24.6 g/kg sušiny. Cena takového flokulantu je kolem 150 Kč/kg, což znamená 3.7 Kč/kg sušiny. Jsou zde sice také další náklady, např. náklady na přesun vody do nádrže, kde bude probíhat flokulace, atd. Tyto náklady je však obtížné přesně kvantifikovat a nelze očekávat, že by tvořily velkou část nákladů, a tak nebudou uvažovány. Je také vhodné zmínit, že ceny dalších flokulantů mohou být mírně odlišné a také se mohou lišit na základě množství, které v daný moment kupujeme.

Třetí částí ceny je cena sušení. Při sušení horkým vzduchem se spotřebuje přibližně 6.1 kWh/kg vyprodukovaných mikrořas [33]. To znamená momentálně výslednou cenu přibližně 44 Kč/kg⁵ sušiny.

⁵ Průměrná cena by v tuto chvíli měla být 7.15 Kč/kWh - <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>

Tyto čísla nám dávají dohromady náklady ve výši přibližně 808 Kč/kg. Vidíme, že v tomto případě tvoří drtivou většinu ceny náklady na provoz fotobioreaktoru. Je potřeba si však uvědomit několik dalších věcí. Za prvé, nejsou zde zahrnuty náklady na personál, nebo vstupní náklady. Za druhé, za poslední rok se ceny elektřiny extrémně zvýšila, takže výsledné náklady mohou být úplně jiné. Kvůli tomu nemá patrně smysl řešit celkovou cenu nákladů a spíše se podívejme na porovnání nákladů na flokulaci s jinými separačními metodami.

Při porovnání flokulace s dalšími separačními metodami vidíme (tab 3), že odstředivka zůstává stále nejdražší, zatímco sedimentace jako nejlevnější, avšak stále platí, že sedimentací se dosáhne pouze nižší koncentrace, než v případě dalších metod, takže sama o sobě není příliš použitelná. Flokulace si vede relativně podobně jako filtrace, avšak na rozdíl od ní nemusíme řešit životnost a cenu filtrů. Poslední zbývající metodou je flotace. Ta vychází provozními náklady ještě o něco levněji, než flokulace, avšak většinou nedosahuje takové účinnosti.

Ve výsledku tedy můžeme říct, že flokulace pro výrobu mikrořas rozhodně použitelná je a lze pomocí toho ušetřit na nákladech zejména oproti odstředivkám. Je nutné taky poznamenat, že většina těchto údajů je několik let stará, takže náklady na elektřinu by nyní byly nesrovnatelně vyšší, což však není problém při použití flokulace. Lze tedy očekávat, že v tuto chvíli budou náklady na flokulaci nižší, než v případě všech ostatních metod (s výjimkou sedimentace). Problémem však stále zůstává zaručení potravinářské bezpečnosti, což by vyžadovalo další výzkumy a stálo jistě mnoho úsilí, času a peněz.

Tabulka 3 - porovnání separačních metod

Metoda (typ metody) ⁶	Energ. náročnost (kWh/m ³) ⁷	Náklady na 1 kg sušiny ⁸ (kč/kg)	Účinnost separace (%)
Sedimentace	0.05	0.45	65
Odstředivka (disková odstředivka)	1.43	12.7	95
flokulace	≈ 0 (jsou zde všalady na flokulanty)	3.7	90
Filtrace (pásová filtrace)	0.5	4.47	>90
Flotace (metoda EF)	0.3	2.7	80

⁶ Pozn. – Některé separační metody mají více podruhů. V tabulce je uvedena vždy nejvhodnější varianta dané separační metody.

⁷ Množství elektrické energie na 1 m³ kultivačního média

⁸ Průměrná cena by v tuto chvíli měla být 7.15 Kč/kWh - <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>

8 Závěr

Bakalářská práce se skládá ze dvou částí: teoretická a praktická. Teoretická část se zabývala různými metodami používanými pro separaci mikrořas. Mezi tyto metody patří sedimentace, separace pomocí odstředivek, flokulace, filtrace a flotace a tyto metody byly následně porovnány.

Z Výsledků teoretické části se jeví, že nejvhodnější metodou separace mikrořas je flokulace a to především z důvodu nákladů a jednoduchosti. Proto se experimentální část zabývá testováním několika flokulantů zda fungují, a pokud ano, tak jaké je třeba množství pro kompletní flokulaci. Flokulanty byly poptány u výrobců na základě jejich potenciální potravinářské bezpečnosti. Bylo otestováno jsem celkem 7 flokulantů, přičemž 2 z nich nefungovaly vůbec. Flokulanty 54 PWG, CWE 35 a CWE 82 tvořily poměrně velké floky a pro plnou flokulaci vyžadovaly přidání 19.7, 19.7 a 44.5 mg/L. Zbylé dva flokulanty, Chitosan a Magnafloc tvořily podstatně menší floky a pro plnou flokulaci vyžadovaly přidání 86.7 a 26.7 mg/L. Tyto flokulanty zároveň vyžadovaly zároveň úpravu pH, v případě chitosanu kyselější prostředí pomocí kyseliny chlorovodíkové a v případě Magnafloku zásaditější pomocí hydroxidu sodného.

Dále byla také změřena sedimentační rychlost. Všechny flokulanty tvořící velké floky (54 PWG, CWE35 a CWE 82) sedimentovaly velmi podobně a výsledná sedimentační rychlost byla přibližně 51.4 m/hod. V případě dvou zbylých flokulantů (Magnafloc a Chitosan) byly floky výrazně menší a proto i sedimentační rychlost výrazně nižší. Jejich výsledná sedimentační rychlost byla změřena na 0.2 m/hod, což je podstatně nižší rychlost, než v případě ostatních flokulantů, avšak stále výrazně rychlejší, než sedimentační rychlost čistých mikrořas (0.001-0.002 m/hod)

Práce se také zabývala potravinovým právem. Zde bylo bohužel zjištěno, že použití flokulantů v potravinářství by bylo komplikovanější, než bylo původně myšleno. Bezpečnost mikrořas, na které byly flokulanty využity zatím nikdo netestoval, takže na to neexistují žádné normy. Uvedení takové potraviny na trh by tedy vyžadovalo další testování a stálo by to rozhodně další čas a peníze.

Výsledkem tedy je, že flokulanty pro separaci mikrořas skutečně využít lze a je možné takto až několikanásobně snížit náklady především oproti odstředivkám. Tento proces lze rozhodně použít pro výrobu biopaliv, či pro jiné využití v chemickém průmyslu. V potravinářství je to komplikovanější, jelikož záleží na konkrétním flokulantu, jeho složení a

následném testování. Celý proces produkce mikrořas se však neskládá pouze ze separace a stále se tedy zde nachází mnoho komplikací, které znamenají vysokou cenu, a proto nelze očekávat v dohledné době výraznější rozšíření využití mikrořas. Je zde tedy plno prostoru pro další výzkum.

9 Zdroje

- [1] GANESAN. Ramya. S. MANIGANDAN. Melvin SAMUEL. Rajasree SHANMUGANTHAM. Kathirvel BRINDHADEVI a Nguyen Thuy LAN CHI. A review on prospective production of biofuel from microalgae. 2020 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X20303854?via%3Dihub>
- [2] : Jia Sen Tan. Sze Ying Lee. Kit Wayne Chew. Man Kee Lam. Jun Wei Lim. Shih-Hsin Ho & Pau Loke Show. A review on microalgae cultivation and harvesting. and their biomass extraction processing using ionic liquids. *Bioengineered*. 11:1. 116-129. 2020 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21655979.2020.1711626>
- [3] Belohlav V.. Jirout T.. Design Methodology of Industrial Equipment for Microalgae Biomass Primary Harvesting and Dewatering. *Chemical Engineering Transactions*. 76. 919-924. 2019 DOI:10.3303/CET1976154 [cit. 2022-07-19].
- [4] Bioreaktor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 2001- [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bioreaktor>
- [5] DE FREITAS COÊLHO. Diego. Louise LACALENDOLA TUNDISI a Keilla SANTOS CERQUEIRA. Microalgae: Cultivation Aspects and Bioactive Compounds. 2019 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.scielo.br/j/babt/a/dPZLJyDg5MVzGh39L87vxz/?format=pdf&lang=en>
- [6] Ian B. Butler. Martin A.A. Schoonen. David T. Rickard. Removal of dissolved oxygen from water: A comparison of four common techniques. *Talanta*. Volume 41. Issue 2. Pages 211-215. ISSN 0039-9140. 1994 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003991409480110X>)
- [7] R. Bosma. J.H. de Vree. P.M. Slegers. M. Janssen. R.H. Wijffels. M.J. Barbosa. Design and construction of the microalgal pilot facility AlgaePARC. *Algal Research*. Volume 6. Part B. Pages 160-169. ISSN 2211-9264. 2014 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926414001064>
- [8] Lin-Lan Zhuang. Dawei Yu. Jian Zhang. Fei-fei Liu. Yin-Hu Wu. Tian-Yuan Zhang. Guo-Hua Dao. Hong-Ying Hu. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 94. Pages 1110-1119. ISSN 1364-0321. 2018 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304428>)
- [9] Kandasamy. L.C.; Neves. M.A.; Demura. M.; Nakajima. M. The Effects of Total Dissolved Carbon Dioxide on the Growth Rate. Biochemical Composition. and Biomass Productivity of Nonaxenic Microalgal Polyculture. *Sustainability* 2021 [cit. 2022-07-19]. <https://doi.org/10.3390/su13042267>
- [10] Acien. Gabriel & Fernandez-Sevilla. Jose M & Molina-Grima. Emilio. Photobioreactors for the production of microalgae. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 12. 10.1007/s11157-012-9307-6. 2013 [cit. 2022-07-19].

- [11] Miguel A. Vale. António Ferreira. José C.M. Pires. Ana L. Gonçalves. Chapter 17 - CO₂ capture using microalgae. Editor(s): Mohammad Reza Rahimpour. Mohammad Farsi. Mohammad Amin Makarem. *Advances in Carbon Capture*. Woodhead Publishing. Pages 381-405. ISBN 9780128196571. 2020 [cit. 2022-07-19].
Dostupné z: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128196571000177>)
- [12] BARROS. Ana. Gonçalves MANUEL SIMÕES a José C.M. PIRES. Harvesting techniques applied to microalgae: a review. Porto. Portugal. 2015 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/103426/3/180519.1.pdf>
- [13] Milledge. J.J.. Heaven. S. A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. *Rev Environ Sci Biotechnol* 12. 165–178. 2013 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9301-z>
- [14] Luke Amer. Birendra Adhikari. John Pellegrino. Technoeconomic analysis of five microalgae-to-biofuels processes of varying complexity. *Bioresource Technology*. Volume 102. Issue 20. Pages 9350-9359. ISSN 0960-8524. 2014 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411010960>
- [15] Pierre Collet. Arnaud Hélias. Laurent Lardon. Monique Ras. Romy-Alice Goy. Jean Philippe Steyer. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*. Volume 102. Issue 1. Pages 207-214. ISSN 0960-8524. 2011 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410011594>
- [16] L. Peperzak. F. Colijn. R. Koeman. W. W. C. Gieskes. J. C. A. Joordens. Phytoplankton sinking rates in the Rhine region of freshwater influence. *Journal of Plankton Research*. Volume 25. Issue 4. Pages 365–383. 2004 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/plankt/25.4.365>
- [17] Roselet. F.. Vandamme. D.. Muylaert. K.. Abreu. P.C. Harvesting of Microalgae for Biomass Production. In: Alam. M.. Wang. Z. (eds) *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. Springer. Singapore. 2019 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8_10
- [18] : Wang. Z. . Hou. J. . Bowden. D. and Belovich. J. M. Evaluation of an inclined gravity settler for microalgae harvesting. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*. 89: 714-720. 2020 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.4174>
- [19] Yousef S.H. Najjar. Amer Abu-Shamleh. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. *Algal Research*. Volume 51. 102046. ISSN 2211-9264. 2020 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926420302642>)
- [20] Soomro Rizwan R.. Ndikubwimana Theoneste. Zeng Xianhai. Lu Yinghua. Lin Lu. Danquah Michael K.. Development of a Two-Stage Microalgae Dewatering Process – A Life Cycle Assessment Approach . *Frontiers in Plant Science*. 2016. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.00113>
- [21] Sily působící mezi molekulami. Wikisripta. 2018 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/S%C3%ADly_p%C5%AFsob%C3%ADc%C3%AD_mezi_molekulami

- [22] Şirin. S., Trobajo. R., Ibanez. C. et al. Harvesting the microalgae *Phaeodactylum tricorutum* with polyaluminum chloride, aluminium sulphate, chitosan and alkalinity-induced flocculation. *J Appl Phycol* 24, 1067–1080, 2012 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9736-6>
- [23] : Bejor. E.S., Mota. C., Ogarekpe. N.M., Emerson. K.U. and Ukpata. J. Lowcost harvesting of microalgae biomass from water. *International Journal of Development and Sustainability*, Vol. 2 No. 1, pp. 1-11, 2013 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://isdsnet.com/ijds-v2n1-1.pdf>
- [24] Pinghai Shao, Ken Darcovich, Thom McCracken, Guillermo Ordorica-Garcia, Michael Reith, Stephen O'Leary. Algae-dewatering using rotary drum vacuum filters: Process modeling, simulation and techno-economics. *Chemical Engineering Journal*, Volume 268, Pages 67-75, ISSN 1385-8947, 2015 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894715000583>
- [25] Anjali Sandip, Val H. Smith, Terry N. Faddis. An experimental investigation of microalgal dewatering efficiency of belt filter system. *Energy Reports*, Volume 1, Pages 169-174, ISSN 2352-4847, 2015 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000281>
- [26] Kaiwei Xu, Xiaotong Zou, Wenjuan Chang, Yanhui Qu, Yanpeng Li. Microalgae harvesting technique using ballasted flotation: A review. *Separation and Purification Technology*, Volume 276, 119439, ISSN 1383-5866, 2021 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586621011473>
- [27] Tenzidy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzidy>
- [28] Richard M. Knuckey, Malcolm R. Brown, René Robert, Dion M.F. Frampton. Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacultural Engineering*, Volume 35, Issue 3, Pages 300-313, ISSN 0144-8609, 2006 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860906000343>
- [29] Thangavel Mathimani, Nirupama Mallick. A comprehensive review on harvesting of microalgae for biodiesel – Key challenges and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 91, Pages 1103-1120, ISSN 1364-0321, 2018 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118302600>
- [30] ADAM, Krupica. *TECHNOLOGY TO SEPARATE MICROALGAE FROM WATER BATCH*. Praha, České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní 2020 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89545/F2-BP-2020-Krupica-Adam-BP_online.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
- [31] Chitosan. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chitosan>

[32] Freeze-drying. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 2001- [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Freeze-drying#:~:text=Freeze%20drying%2C%20also%20known%20as.that%20evaporate%20water%20using%20heat>

[33] Bárbara Vázquez-Romero. José Antonio Perales. Hugo Pereira. Maria Barbosa. Jesús Ruiz. Techno-economic assessment of microalgae production, harvesting and drying for food, feed, cosmetics, and agriculture. *Science of The Total Environment*. Volume 837 155742. ISSN 0048-9697. 2022 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972202839X>

[34] Richard M. Knuckey. Malcolm R. Brown. René Robert. Dion M.F. Frampton. Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacultural Engineering*. Volume 35. Issue 3. Pages 300-313. ISSN 0144-8609. 2006 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860906000343>

[35] DIVAKARAN. Ravi a V.N. Sivasankara PILLAI. Flocculation of algae using chitosan [online]. School of Environmental Studies. Cochin University of Science and Technology. Kerala. India. 2001 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1022137023257.pdf>

[36] Kothari. R.. Pandey. A.. Ahmad. S. et al. Microalgal cultivation for value-added products: a critical enviro-economical assessment. *3 Biotech* 7. 243. 2017 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0812-8>

[37] Carbon capture and storage. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 2001- [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage

[38] Carbon capture and utilization. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 2001- [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_utilization

[39] P. Čejka. „Právní Prostor.“ 12 9 2014. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.pravniprostor.cz/clanky/ostatni-pravo/potravinove-pravo-a-jeho-zajimavosti>.

[40] I. Spitzenbergerová. „Epravo.“ 3 12 2013 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.epravo.cz/top/clanky/potravinove-pravo-92954.html>.

[41] „bezpecnostpotravin.“ Ministeratvo zemědělství ČR. 2021 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/kategorie/uvedeni-nove-potraviny-na-trh.aspx>.

[42] EUR-lex.“. 2003 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/30.html?expand=3010#arrow_3010

[43] RITCHIE. Hannah. Max ROSER a Pablo ROSADO. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. 2020 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>

[44] Ojamae. Karin. Growth physiology and photosynthetic performance of green microalgae mass culture grown in a thin-layer cascade. 2022 [cit. 2022-07-21].]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266211232_Growth_physiology_and_photosynthetic_performance_of_green_microalgae_mass_culture_grown_in_a_thin-layer_cascade

[45] WURTS. William. Farming algal fuel: Economics challenge process potential. 2010 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.globalseafood.org/advocate/farming-algal-fuel-economics-challenge-process-potential/>

[46] PRABHU. Sanjay. Industrial Lubricant Recovery Using a Disc Stack Centrifuge. 2019 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31902/disc-stack-centrifuge>

[47] FLOTTWEG DECANTER CENTRIFUGES. 2022 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.flottweg.com/product-lines/decanter/>

[48] Hydrocyclone. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. 2001- [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrocyclone>

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 - vývoj koncentrace CO ₂ v atmosféře [43].....	8
Obrázek 2 - změna průměrné teploty v čase [43].....	8
Obrázek 3 - potrubní fotobioreaktor [13].....	11
Obrázek 4 - deskový fotobioreaktor [44]	12
Obrázek 5 - fotobioreaktor ve stylu umělé řeky [45]	12
Obrázek 6 - Kruhový usazovák [17]	16
Obrázek 7 - lamelový usazovák [17].....	16
Obrázek 8 - disková odstředivka [46]	19
Obrázek 9 - dekantální odstředivka [47]	19
Obrázek 10 – hydrocyklón [48]	20
Obrázek 11 - možnosti flokulace [17].....	21
Obrázek 12 - způsoby filtrace [17].....	24
Obrázek 13 - separace pomocí flotace (metoda DAF) [17]	25
Obrázek 14 - řasy vyloučené pomocí flotace [17]	26
Obrázek 15 - roztok mikrořas před flokulací	33
Obrázek 16 - Roztok mikrořas po flokulaci pomocí PWG 54	34
Obrázek 17 - průběh flokulace pomocí PWG 54	35
Obrázek 18 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí FL 2250.....	36
Obrázek 19 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí CWE 35.....	37
Obrázek 20 - průběh flokulace pomocí CWE35	37
Obrázek 21 – roztok mikrořas po flokulaci pomocí CWE 82.....	38
Obrázek 22 - průběh flokulace pomocí CWE 82	39
Obrázek 23 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí FL 4440.....	39
Obrázek 24 - vzorky mikrořas (množství hydroxidu - 7 ml)	40
Obrázek 25 - vzorky mikrořas (množství hydroxidu - 9 ml)	41
Obrázek 26 - roztok mikrořas po flokulaci pomocí chitosanu	42
Obrázek 27 - měření sedimentační rychlosti.....	43