ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Posudek disertační práce

Název práce:	**Intensification of mixing and homogenisation of culture medium in photobioreactors for microalgae production**
Doktorand:	Ing. Mgr. Vojtěch Bělohlav
Školitel:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. (ČVUT), dr. Enrica Uggetti (UPC)
Školitel specialista:	doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D. (ČVUT)
Školící pracoviště:	1) Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze (ČVUT) 2) Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Studijní program:	Strojní inženýrství (ČVUT)/ Environmental Engineering (UPC)
Studijní obor:	Konstrukční a procesní inženýrství

Předložená písemná práce v rozsahu 161 stránek je rozdělená do 9 kapitol a je zaměřená na problematiku vlivu hydrodynamických podmínek na parametry ovlivňující produkci mikrořas ve dvou kultivačních systémech: v 1) hybridním horizontálním trubkovém fotobioreaktoru, a 2) uzavřeném deskovém fotobioreaktoru. Práce obsahuje původní výsledky práce autora, které jsou dokumentované v příspěvcích v 5 impaktovaných časopisech, 3 vědeckých časopisech typu Jsc, řadě příspěvcích na mezinárodních konferencích, a dále dvou příspěvcích zaslaných k publikaci, jejichž je hlavním autorem nebo spoluautorem. Získané praktické řešení, statický směšovač navržený speciálně pro deskové fotobioreaktory, je předmětem české patentové ochrany (UZV) a podána je žádost o evropský patent.
Práce vznikla v rámci double-degree programu mezi ČVUT a Universitat Politècnica de Catalunya, a je psána v anglickém jazyce.

V rámci posudku je třeba se vyjádřit k následujícím bodům:

- ***Aktuálnost tématu dizertační práce***

Principem biorafinerií 3. generace je biologická transformace emisního CO_2 pomocí mikrořas na dále zužitkovatelné látky typu lipidy, polysacharidy nebo biologicky aktivní látky typu karotenoidy, vitamíny a další, mající antioxidační, antibakteriální, protirakovinové, protizánětlivé a imunostimulační účinky. Kultivace mikrořas se provádí v nejrůznějších typech fotobioreaktorů a ukazuje se, že při zvětšování měřítka kultivačních systémů jsou provozní parametry zajišťující správnou kultivaci mikrořas limitujícím faktorem. Častým problémem je také tvorba biofilmu na transparentních plochách fotobioreaktorů, který snižuje intenzitu působícího světelného záření.

Cílem práce bylo studium vlivu hydrodynamických podmínek na parametry ovlivňující produkci mikrořas ve dvou kultivačních systémech: v 1) hybridním horizontálním trubkovém fotobioreaktoru, a 2) uzavřeném deskovém fotobioreaktoru.
Vzhledem k globálnímu úsilí snižovat emise CO_2, transformaci emisního CO_2 na cenné látky, je zvolené téma aktuální.

- ***Dosažení v dizertaci stanovených cílů***

Cíle dizertační práce jsou formulované v kapitole 3.1. Jejich splnění je shrnuté v kapitole 9.1 práce. Mohu konstatovat, že stanovené cíle byly splněny.

- ***Teoretický a praktický přínos disertační práce***

Předložená práce je zaměřena na studium vlivu hydrodynamických podmínek na parametry ovlivňující produkci mikrořas ve dvou rozdílných kultivačních systémech: v 1) hybridním horizontálním trubkovém fotobioreaktoru, a 2) uzavřeném deskovém fotobioreaktoru.
Práce je tak logicky členěna (a podobně získané výsledky) podle typu fotobioreaktoru.

V rámci výzkumu hybridního horizontálního trubkovém fotobioreaktoru (HHT FBR):
1. V literatuře publikovaný model BIO_ALGAE byl úspěšně nakalibrován pomocí získaných experimentálních dat pro simulaci kultivace mikrořas v HHT FBR. Současně byly autorem do modelu BIO_ALGAE integrovány hydrodynamické podmínky v HHT FBR.
2. Byl vytvořen numerický CFD model pro modelování pohybu částic v HHT FBR a pomocí tohoto modelu byly identifikovány v HHT FBR mrtvé zóny včetně vlivu provozních podmínek.
3. Na základě identifikace mrtvých zón byly navrženy konstrukční změny HHT FBR.
4. Byl vytvořen model umožňující určit rozložení světlé a tmavé zóny v trubce různých velikostí.
5. Pomocí modelu bylo dokázáno, že v systémech pracujících s velkou vrstvou kultivačního média nebo vysokou koncentrací mikrořas intenzifikace míchání zvyšuje celkovou produkci mikrořas. Z tohoto zjištění vyplynul praktický požadavek pro konstrukci a provoz – nutno vždy zajistit ideální promíchávání kultivačního média, v případě trubkového reaktoru buď zvýšením průtoku nebo použitím statických směšovačů.

V rámci výzkumu uzavřeného deskového fotobioreaktoru (DP FBR):
1. Byl vytvořen numerický CFD model proudění v DP FBR a pomocí tohoto modelu byly identifikovány mrtvé zóny pro různé konfigurace vstup-výstup včetně vlivu provozních podmínek.
2. Vytvořený CFD model umožňuje predikovat tvorbu biofilmu pro různé provozní a konstrukční parametry na základě výpočtu distribuce smykového napětí na stěně desky reaktoru.
3. Pomocí modelu bylo zjištěno, že nejvhodnější konfigurací zabraňující tvorbě biofilmu na průhledné stěně reaktoru je konfigurace s jediným spodním vstupem. Dle modelu však nevýhodou této konfigurace je tvorba mrtvé zóny ve středu DP FBR díky vytvořené cirkulační smyčce. Experimentálně byly tyto numerické predikce ověřeny a potvrzeny.
4. Získaná zjištění byla využita pro návrh řešení pro intenzifikaci míchání kultivačního média v deskovém fotobioreaktoru s cílem zajistit homogenitu hydrodynamických podmínek. Jako nejvhodnější konfigurace byla identifikována konfigurace dvojitého vstupu se statickým mixérem vlastní konstrukce. Navrhovaný statický mixér byl optimalizován pro použití technologie 3D tisku.
5. Při numerickém i experimentálním testování bylo zjištěno, že tato konfigurace je však citlivější na tvorbu biofilmu na stěně komory ve srovnání s prázdnou komorou kvůli nižší hodnotě smykového napětí stěny. Bylo však zjištěno a numericky prokázáno, že lze tvorbu mrtvých zón s následnou tvorbou biofilmu eliminovat pomocí sériového zapojení statických směšovačů.

Originalita řešení statického směšovače navrženého speciálně pro deskový fotobioreaktor je předmětem české patentové ochrany (UZV) a podána je žádost o evropský patent. Dále je třeba uvést, že práce vznikala v rámci dvou českých grantů, MŠMT ČR (OP RDE) a ČVUT, a grantu Evropské komise v rámci Horizon 2020.

- ***Postup řešení a výsledky***
- *Úroveň rozboru současného stavu problematiky*

Rozbor současného stavu problematiky je prezentován v kapitole 2. Rozbor je zpracován s ohledem na záměr práce a je tedy zaměřen na: 1) provozní parametry důležité pro zvětšování měřítka, 2) modely kultivace řas, 3) tvorbu biofilmu, a 4) vliv hydrodynamiky na kultivaci. K úrovni rozboru nemám připomínky.

- *Vhodnost použitých metod řešení*

Autor zvolil kombinaci numerické simulace hydrodynamiky proudění a následného experimentálního ověření simulace. Autor vytvořil numerický model, provedl simulace. Výsledky simulace analyzoval, a následně experimentálně ověřil, nebo na základě výsledků vybral vhodné řešení, které následně experimentálně ověřoval. Názorně tak dokumentoval, že tento přístup je velmi efektivní a účinný. Výsledky ověřoval i pomocí reálných kultivačních experimentů.

- *Způsob, jak byly použité metody aplikovány*

Konstatuji, že aplikace metod pro dosažení cíle byla na excelentní úrovni a doktorand prokázal, že má teoretické a také praktické znalosti v oblasti numerické simulace procesů, přípravy a realizace experimentů. Oceňuji, že jako student s backgroundem strojního inženýra zvládnul rutinně provádět i biologické kultivační experimenty.

K této části mám tyto připomínky:

- Str. 64 – kalibrace a validace modelu BIO_ALGAE – uvedeny by také měly být teplotní závislosti a hodnoty parametrů $f_{T,FS}$ a η_{PS} použité při validaci. Není explicitně uvedeno, zda hodnoty kalibrací získaných parametrů uvedené v tabulce 4.2.2.3 platí pro zimní i jarní kampaň. Není jasné, zda byly uvažovány teplotní závislosti k_La.
- Str. 114 – experimenty provedeny pro průtok 45 a 63 L/min, ale není uvedeno, proč byly zvoleny tyto hodnoty.
- Str. 137 – autor správně uvádí, že vzhledem k tomu, že provedl měření pouze pro jednu hodnotu bezrozměrného geometrického parametru (L_s/d_h), neměl by být uvažován jako proměnný geometrický simplex v korelaci, a řeší to vyjádřením na levé straně korelace 8.4. Dle mého názoru to řešením není, lze řešit pouze omezením platnosti konstanty B.

- *Prokázání znalostí v daném oboru*

Na základě předložené disertační práce konstatuji, že doktorand prokázal, že má odpovídající znalosti jak v oblasti strojního inženýrství v oboru konstrukčního a procesního inženýrství tak v oblasti environmentálního inženýrství v oboru kultivace řas.

- ***Formální úprava dizertační práce a její jazyková úroveň***

Práce je napsána přehledně, s logickým členěním kapitol, je čitelná.
Grafická stránka práce je velmi dobrá.

K této části mám tyto připomínky:

- Str. 19 použití symbolu ρ pro hustotu (ρ) i hustotu toku složky (ρ_i) je neobvyklé, patrně v důsledku převzetí modelu z literatury.
- Str. 77 vztah (4.14) – neuvedena definice použitého Reynoldsova čísla.
- Str. 84 vztah (4.31) – nemá být velké R?

- Str. 100, obr. 6.1.3, str. 137 obr. 8.3.3.2 – neuvedeny statistické parametry (alespoň R^2) pro korelaci.
- Str. 137, obr. 8.3.3.2 – počet dat je vyšší než v tabulce 8.3.3.1.

Otázky a připomínky do diskuse k textu práce

- *HHT FBR – koncentrace rozpuštěného kyslíku a přenos kyslíku*

Str. 57 – autor uvádí, že koncentrace rozpuštěného kyslíku dosahovala 168 % nasycení v otevřené nádrži. Jakým mechanismem je možno udržet takové přesycení? Jaký byl princip měření koncentrace rozpuštěného kyslíku a poloha měřící sondy (možno vyznačit např. v 4.1.2)? Jak je definována plocha pro přestup kyslíku (a ostatních plynů)? Byla v modelu uvažována závislost k_La na teplotě a koncentraci mikrořas?

- *DP FBR*

Str. 114 – experimenty provedeny pro průtok 45 a 63 L/min, ale není uvedeno, proč byly zvoleny tyto hodnoty (nebo jsem nenalezl?). Na obr. 8.3.3.2 je více experimentálních bodů. Zajímal by mě důvod volby zvolených průtoků a vyšší počet experimentálních bodů.

- *Tvorba biofilmu*

Str. 118 – autor uvádí kritickou hodnotu smykového napětí na stěně 0.2 Pa pro tvorbu biofilmu na stěně DP FBR. Zajímalo by mě, zda je možno uvažovat tuto hodnotu pro daný typ mikrořasy za univerzálně platnou pro různá kultivační zařízení. Dále by mě zajímalo, jak se odstraňuje biofilm v případě HHT FBR?

- *DP FBR - volba modelu turbulence*

Autor volil mezi k-ε a RNG k-ε modelem turbulence (str. 73). Na str. 135 na základě experimentu uvádí, že zvolený RNG k-ε model podhodnocuje tlakovou ztrátu. Zajímalo by mě, v čem vidí autor důvody tohoto podhodnocení a proč autor neuvažoval jiné modely turbulence, např. SST k-ω model.

Konstatuji, že dizertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona o VŠ, a proto ji doporučuji předložit k obhajobě pro udělení akademického titulu Ph.D. Ing. Mgr. Vojtěchu Bělohlavovi.

V Praze 31. srpna 2021

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.