

OPONENTSKÝ POSUDOK DIZERTAČNEJ PRÁCE

- Doktorand:** Ing. Vojtěch Bělohlav
- Školiteľ:** prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. , Dr. Enrica Uggetti
- Školiace pracovisko:** České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Department of Civil and Environmental Engineering
- GEMMA – Group of Environmental Engineering
and Microbiology
- Oponent:** prof. Ing. Roman Fekete, PhD.
- Názov práce:** Intensification Of Mixing And Homogenisation Of Culture Medium In Photobioreactors For Microalgae Production

Splnenie cieľov stanovených v dizertačnej práci

Ciele práce sú stanovené v kapitole 3.1 *Objectives*. Sú rozdelené do ôsmich bodov a sú zamerané hlavne na hydrodynamiku prúdenia kultivačného média v rúrkovom (HHT PBR) a doskovom (FP PBR) fotobioreaktore. Využívajú sa k tomu experimentálne merania, výsledky ktorých sú potom použité pre kalibráciu a overenie modelu pre kultiváciu rias BIO_ALGAE a počítačovú simuláciu s využitím CFD. Tiež sa pozornosť venuje aj tvorbe mikrofilmu z rias na povrchu fotobioreaktorov a jej odstraňovaniu s využitím hydrodynamiky.

Je možné konštatovať, že stanovené ciele boli splnené v potrebnom rozsahu.

Úroveň rozboru súčasného stavu v riešenej problematike

Podklady pre dizertačnú prácu sú založené na spolupráci medzi ČVUT v Prahe a UPC. Využívajú sa v nej skúsenosti z obidvoch pracovísk, ktoré majú skúsenosti v oblasti hydromechaniky a v oblasti kultivácie rias. Na základe poznatkov, ktoré autor práce získal na týchto pracoviská, spravil podrobnú analýzu problematiky. Rozčlenil ju na jednotlivé parametre, ktoré sú podstatné pre kultiváciu rias, t.j. vplyv svetla, teploty, zloženiú kultivačného média, hydrodynamike, a pod. Pre jednotlivé parametre potom spravil prehľad dôležitých a nových poznatkov, publikovaných v literatúre, v rozsahu potrebnom pre zvládnutie problematiky.

Rozsah rozboru súčasného stavu problematiky kultivácie rias vo fotobioreaktore zodpovedá téme dizertačnej práce v potrebnom rozsahu.

Teoretický prínos dizertačnej práce

Tu je potrebné vyzdvihnúť hlavne aplikáciu kultivačného modelu BIO_ALGAE pre rôzne podmienky kultivácie. Model je kalibrovaný a verifikovaný na základe experimentov vykonaných v priebehu zimnej a jarnej kampane. Preukazuje do akej miery poskytuje zhodu s experimentálnymi dátami.

Tento model a zhoda s výsledkami experimentov predstavujú hodnotný teoretický prínos práce a zároveň námet pre ďalšie experimenty zamerané na jeho aplikáciu pre rôzne kultivačné podmienky.

Praktický prínos dizertačnej práce

Tu treba vyzdvihnúť experimenty zamerané na redukcie mikrofilmu vytvoreného z rias na povrchu stien fotobioreaktorov s využitím hydrodynamiky a optimalizácie prúdenia formou zostavieb. Štúdiá spája experimentálne merania a počítačové simulácie. Výsledky poukazujú na silné a slabé stránky konštrukcie (FP PBR) pri rôznych kombináciách prítoku a zostavieb.

Za praktický prínos práce považujem testovanie vplyvu charakteru prúdenia kultivačného média, reprezenované Re číslom, na účinnosť čistenia povrchu stien doskového fotobioreaktora (FP PBR), ako dôsledok pôsobenia šmykových napätí v blízkosti povrchu steny FP PBR.

Vhodnosť použitých metód riešenia a spôsob, ako boli použité metódy aplikované

Práca je postavená na experimentoch, ktoré sú realizované v zariadeniach, ktoré je možné svojimi rozmermi považovať za poloprevádzkové (FP PBR), až prevádzkové (HHT PBR). Je teda možné predpokladať, že výsledky z nich získané by mohli byť dobrými podkladmi pre realizáciu fotobioreaktorov ešte väčších rozmerov.

V práci sú prepojené teoretické poznatky a matematické modely (teória hydrodynamiky, model BIO_ALGAE) s experimentálnymi výsledkami. Tieto postupy sú doplnené modernými metódami CFD, ktoré umožňujú vizualizáciu prúdenia v PBR. Dôležitá je skutočnosť, že výsledky získané z CFD sú podporené experimentálnymi meraniami.

Preukázanie odpovedajúcich znalostí v danom odbore

Z obsahu písomnej časti práce je možné konštatovať, že doktorand preukázal zvládnutie problematiky a znalosti, ktoré svedčia o jeho schopnostiach naštudovať problematiku, pripraviť, realizovať a vyhodnotiť experimenty. Na ich základe dokáže formulovať závery a poskytnúť analýzy výsledkov a navrhnúť ďalšie postupy pre riešenie problematiky.

Doktorand jednoznačne preukázal výborné znalosti v riešenej problematike.

Formálna úroveň práce

V úvode práce je spravený stručný prehľad problematiky kultivácie rias vo PBR a ich rôzne konštrukčné riešenia. V nasledujúcej časti sú analyzované okruhy, ktorým bude venovaná pozornosť v samotnej práci. Táto časť je doplnená prehľadom informácií z dostupnej literatúry. Uvádza sa tu tiež model BIO_ALGAE, s ktorým sa pracuje v niektorých častiach práce. Ďalšia časť práce obsahuje 15 vedeckých článkov, 13 z nich už bolo publikovaných).

Práca je doplnená veľkým množstvom obrázkov, ktoré sú logickým výstupom z vizualizácie a počítačovej simulácie. Text je napísaný prehľadne, potrebné výsledky sú spracované aj do formy grafov.

Formálna a grafická úprava práce je na veľmi vysokej úrovni. Práca je napísaná v anglickom jazyku, pretože vznikla v spolupráci univerzít Czech Technical University in Prague (CTU) and Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Na týchto pracoviská sa uskutočnili aj experimentálne práce.

Otázky

Str. 24 „*However, microalgae has also the potential to replace fossil fuels in form of biofuels and it is possible to use them to mitigate the CO₂ emission from the atmosphere.*“

Máte informáciu o tom, aký je pomer medzi rýchlosťou akumulácie CO₂ a rýchlosťou jeho absorpcie riasami? Je vôbec možné predpokladať, že by tento jav mohol byť z environmentálneho hľadiska významný?

Str. 52 „*...microalgae-dominated mixed culture (microalgae, bacteria, protozoa, and small metazoans...*“ „Je možné posúdiť vplyv jednotlivých kmeňov mikroorganizmov na kultiváciu rias v zmysle verifikácie modelu BIO_ALGAE? “

Str. 52 „*Treated domestic effluent was obtained from an aerated septic tank which receives the wastewater of the main building of the campus Agròpolis.*“ „*.... At 5:00 AM, 6 m³ of agricultural run-off are pumped ...*“ Predpokladám, že boli analyzované vstupné parametre tejto vody do PBR, ktoré majú podstatný vplyv na samotný proces. Ako sa zabezpečila opakovateľnosť výsledkov, ak sa dá predpokladať, že vstupné parametre odpadovej vody sa mohli viac, alebo menej meniť? Obsahovala aj tuhé, nerozpustné častice? Do akej miery mohli vlastnosti odpadovej vody ovplyvniť výsledky CDF, napr. na obr. 4.3.4.1?

Str. 53 Obr. 4.1.3, uvažuje sa v technológii aj s využitím, konverziou, CO₂? V schéme nie je senzor CO₂.

Str. 59 Fig. 4.2.1.5 Nemôže byť výrazná variácia pH v máji spôsobená nejakými, popri kultivácii rias, paralelnými chemickými procesmi v dôsledku vyššej teploty?

Str. 75 „*The microalgal culture medium at low concentrations shows clearly Newtonian behavior with viscosity values close to that of water.*“ Aká sa predpokladala koncentrácia rias? Je možné použiť vlastnosti vody? Zohľadňuje sa aj teplota kultivačného média pri nastavení CFD?

Str. 98 „*The decrease in the production of microalgae was influenced by the retention tanks, which can no longer be completely irradiated, and dark zones were formed due to the higher microalgae concentration in the culture medium.*“ Je to naozaj spôsobené retenčným tankom? Predpokladám, že pri prúdení tekutiny je hlavný rast rias v rúrach. Navyiac je to kontinuálny dej, teda značný podiel na poklese by mali mať aj svetelné a hydrodynamické podmienky v rúrach.

Str.106 Aká bola teplota chromatičnosti svetla?

Str. 112 Fig. 7.2.2.2 , Fig. 7.2.2.3. Ťažko vizuálne posúdiť podobnosť prúdenia medzi CFD a kontrastnou látkou.

Str. 133 Fig. 8.3.1.4. „*Configuration with single bottom inlet... „, správne má byť „ ... with double bottom inlet...“.*

Str. 144 „*The created numerical model proved its applicability for geometrically similar cultivation systems, which can be useful for optimization of the existing system, scaling-up, or for designing a novel photobioreactor.*“ Zaujímalo by ma, na základe výsledkov tejto práce, aký máte názor na možnosti scaling up? Aké by boli Vaše odporúčania a obmedzenia pre scaling up fotobioreaktorov?

Str. 144 „*The BIO_ALGAE can simulate the production of microalgae; however, the model does not consider the influence of hydrodynamic conditions and works with the assumption that the culture medium is perfectly mixed.*“

Na základe tejto poznámky, nebolo by lepšie použiť modelové médium pre kultiváciu a špecifický kmeň rias aj pre HHT PBR, ako to bolo pri FP PBR? Umožnilo by to eliminovať rôzne vedľajšie komplikované javy spojené s napr. s prítomnosťou iných baktérií a zamerať sa len na vplyv hydrodynamiky na priebeh kultivácie?

Na záver je potrebné konštatovať, že prekladaná dizertačná práca obsahuje veľké množstvo kvalitnej práce doktoranda. Svedčí o tom aj rozsah publikovaných výsledkov. Uvedené pripomienky sú skôr námetom, ako kritickým hodnotením práce.

Práca svojim obsahom a formou spĺňa požiadavky na dizertačné práce.

Dizertačnú prácu odporúčam k obhajobe a navrhujem udelenie akademického titulu:

philosophiae doctor (Ph.D.)

V Bratislave 12.8.2021

prof. Ing. Roman Fekete, PhD.

REVIEW OF DOCTORAL DISSERTATION

- Author:** Ing. Vojtěch Bělohlav
- Supervisors:** prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. , Dr. Enrica Uggetti
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Department of Civil and Environmental Engineering
GEMMA – Group of Environmental Engineering
and Microbiology
- Reviewer:** prof. Ing. Roman Fekete, PhD.
- Title:** Intensification Of Mixing And Homogenisation Of Culture Medium In Photobioreactors For Microalgae Production

Fulfilment of the objectives of the dissertation

The objectives of the work are set out in chapter 3.1 *Objectives*. They are divided into the eight points and they are mainly focused on the hydrodynamics of the culture medium in a tubular (HHT PBR) and plate (FP PBR) photobioreactor. The experimental measurements are used for this purpose. Then the results are used to calibrate and verify the BIO_ALGAE algae culture model and computer simulation using CFD. The attention is also paid to the formation of microfilm from algae on the surface of photobioreactors and its removal using hydrodynamics.

It can be stated that the goals were met to the necessary extent.

Level of the analysis of the current status of solved problem

The materials for the dissertation are based on cooperation between CTU in Prague and UPC. It uses the experience of both workplaces which have experiences on the fields of hydromechanics and the algae cultivation. Based on the knowledge that the author gained at these workplaces, he made a detailed analysis of the issue. He divided it into individual parameters that are essential for the cultivation of algae, e.g. influence of the light, temperature, composition of culture medium, hydrodynamics, etc. Then, for individual parameters, he made an overview of an important and new findings, published in the literature, to the extent necessary to manage the issue.

The scope of the analysis of the current status of algae cultivation in the photobioreactor corresponds to the topic of the dissertation to the necessary extent.

Theoretical contribution of the dissertation

Here it is necessary to highlight the application of the BIO_ALGAE culture model for the different cultivation conditions. The model is calibrated and verified on the basis of the experiments performed during the winter and spring campaigns. It demonstrates the range to which it provides agreement with experimental data.

This model and the agreement with the results of the experiments represent a valuable theoretical contribution of the work. It is also a theme for further experiments focused on its application for different cultivation conditions.

Practical contribution of the dissertation

The experiments aimed at the reduction of microfilm formed from algae on the wall surface of photobioreactors using hydrodynamics and optimization of the flow using various static mixers should be highlighted here. The study combines experimental measurements and computer simulations. The results point to the strengths and weaknesses of the design (FP PBR) with different combinations of inflow and fillers.

I consider the testing of the influence of the culture medium flow character, represented by the *Re* number, on the cleaning efficiency of the plate photobioreactor (FP PBR) walls, as a consequence of shear stresses near the FP PBR wall surface.

Suitability of the used methods of solution and the way in which they were applied

The work is based on experiments that are carried out in facilities that can be considered as pilot plant (FP PBR) to industrial scale (HHT PBR). Therefore, it is possible to assume that the results obtained from them could be a good basis for the implementation of photobioreactors of even larger dimensions.

The work combines theoretical knowledge and mathematical models (hydrodynamics theory, model BIO_ALGAE) with experimental results. These procedures are supplemented by the modern CFD methods, which allow the visualization of the flow in the PBR. Importantly, the results obtained from the CFD are supported by experimental measurements.

Demonstration of relevant knowledge in the field

From the content of the written part of the thesis it can be stated that the author has demonstrated mastery of the issue and knowledge that testifies to his ability to study the issue, prepare, implement and evaluate experiments. Based on them, he is able to formulate conclusions and provide analyses of results and suggest further procedures for solving the problem.

The doctoral student clearly demonstrated excellent knowledge in the issues.

Formal level of work

In the introduction, a brief overview of the issue of algae cultivation in PBR and their various design solutions is made. The following section analyses the areas to which attention will be paid in the work itself. This section is supplemented by an overview of information from the available literature. The BIO_ALGAE model is also presented here, which is used in some parts of the work. Another part of the work contains 15 scientific articles, 13 of which have already been published.

The work is supplemented by a large number of images, which are a logical output of visualization and computer simulation. The text is written clearly; the necessary results are also processed in the form of graphs.

The formal and graphic design of the work is at a very high level. The work is written in English because it was created in cooperation with the Czech Technical University in Prague (CTU) and the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Experimental work was also carried out at these workplaces.

Questions and comments

Page 24 „*However, microalgae has also the potential to replace fossil fuels in form of biofuels and it is possible to use them to mitigate the CO₂ emission from the atmosphere.*“

Do you have an information about the ratio between the rate of CO₂ accumulation in the air and the rate of its absorption by algae? Is it possible to assume that this phenomenon could be environmentally significant at all?

Page 52 „*...microalgae-dominated mixed culture (microalgae, bacteria, protozoa, and small metazoans...)*“

Is it possible to assess the influence of individual strains of microorganisms on the algae cultivation in the terms of verification of the BIO_ALGAE model?

Page 52 „*Treated domestic effluent was obtained from an aerated septic tank which receives the wastewater of the main building of the campus Agròpolis.*“ „*.... At 5:00 AM, 6 m³ of agricultural run-off are pumped ...*“

I assume that the input parameters of the water into the PBR were analysed, which have a significant impact on the process itself. How was the repeatability of the results ensured if it could be assumed that the input parameters of the wastewater could have varied more or less? Did water also contain solid, insoluble particles? To what extent could the properties of the wastewater affect the results of the CDF, e.g. in FIG. 4.3.4.1?

Page 53 FIG. 4.1.3 Is it the conversion of CO₂ considered in the technology also? There is no CO₂ sensor in the diagram.

Page 59 FIG. 4.2.1.5 Cannot the significant variation in pH in May be due to some, in addition to algae cultivation, parallel chemical processes due to higher temperatures?

Page 75 „*The microalgal culture medium at low concentrations shows clearly Newtonian behaviour with viscosity values close to that of water.*“

What was the expected algae concentration? Is it possible to use the properties of water? Is the temperature of the culture medium also taken into account when setting the CFD?

Page 98 „*The decrease in the production of microalgae was influenced by the retention tanks, which can no longer be completely irradiated, and dark zones were formed due to the higher microalgae concentration in the culture medium.*“

Is it really caused by the retention tank? I assume that during the flow of fluid there is a main growth of algae in the pipes. In addition, it is a continuous process, so the light and hydrodynamic conditions in the pipes should also play a significant role in the drop.

Page 106 What was the colour temperature of the light?

Page 112 FIG. 7.2.2.2, FIG. 7.2.2.3. It is difficult to visually assess the similarity of the flow between the CFD and the contrast agent.

Page 133 FIG. 8.3.1.4. „*Configuration with single bottom inlet... „, it should be „ ... with double bottom inlet...“.*

Page 144 „*The created numerical model proved its applicability for geometrically similar cultivation systems, which can be useful for optimization of the existing system, scaling-up, or for designing a novel photo bioreactor.*“

I would like to know, based on the results of this work, what is your opinion on the possibilities of scaling up? What would be your recommendations and limitations for scaling up photobioreactors?

Page 144 „*The BIO_ALGAE can simulate the production of microalgae; however, the model does not consider the influence of hydrodynamic conditions and works with the assumption that the culture medium is perfectly mixed.*“

Based on this note, wouldn't it be better to use a model culture medium and a specific algae strain for HHT PBR, as in the case with the FP PBR? This would make it possible to eliminate various complicated side effects associated with e.g. the presence of other bacteria and focus that only on the influence of hydrodynamics on the course of cultivation?

In conclusion, it is necessary to state that the dissertation contains a large amount of the quality work of the author. This is evidenced by the scope of published results. These comments are the subject rather than the critical evaluation of the work.

The work with its content and form meets the requirements for dissertations.

I recommend the dissertation for the defence. I propose to award the academic degree

philosophiae doctor (Ph.D.)

V Bratislave 12.8.2021

prof. Ing. Roman Fekete, PhD.