

Wojciech Golis

Wydział Nauk o Żywieniu Człowieka i Konsumpcji SGGW w Warszawie

Lukasz Makowski

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej

## MODELOWANIE PRZEPIŹYWÓW W BIOREAKTORZE

### Streszczenie

Celem pracy było określenie charakterystycznych wartości przepływu burzliwego w bioreaktorze w celu późniejszego wykorzystania ich w modelowaniu bilansu populacji komórek roślinnych o poprawionych wartościach odżywczych. Dzięki wykorzystaniu obliczeniowej mechaniki płynów - CFD oraz weryfikacji otrzymanych z niej wyników za pomocą anemometrii laserowej - LDA możliwe było wyznaczenie średnich wartości parametrów charakteryzujących przepływ burzliwy w reaktorze dla charakterystycznych stref w reaktorze zbiornikowym.

**Słowa kluczowe:** modelowanie wielostrefowe, CFD, pomiary LDA, przepływy w bioreaktorze

### Oznaczenia

- $d_{top}$  - średnica mieszadła, m  
 $k$  - energia kinetyczna,  $m^2 s^{-2}$   
 $L$  - skala całkowita układu, m  
 $T$  - średnica zbiornika, m  
 $u$  - prędkość liniowa,  $m s^{-1}$   
 $\varepsilon$  - szybkość dyssypacji energii kinetycznej burzliwości na jednostkę masy płynu,  $m^2 s^{-3}$

#### indeksy dolne:

$r, \omega, z$  - współrzędne biegunowe

### Wprowadzenie

Dla celów badawczych oraz praktycznych próbuje się sterować cyklem życiowym roślin lub modyfikować jego elementy w warunkach kultury *in vitro*, aby poprawić np. właściwości odżywcze roślin hodowlanych. Kultury płynne są uznawane za bardziej dogodne od kultur prowadzonych na podłożach stałych ze względu na możliwość automatyzacji oraz zwielokrotnienia skali produkcji. Mieszanie płynu zapobiega opadaniu tkanki roślinnej na dno bioreaktora oraz przyspiesza transport masy. Powszechnie wiadomo, że komórki roślinne są podatne na mieszanie mechaniczne, przy czym efekt działania naprężeń mechanicznych na komórki przejawia się zmianą metabolizmu, deformacją, a nawet śmiercią komórek. Osiągnięcia ostatnich lat w modelowaniu przepływów burzliwych w połączeniu z badaniami eksperymentalnymi wpływu naprężeń burzliwych na komórki żywe pozwalają na lepsze zrozumienie mechanizmu obserwowanych zjawisk. Obliczeniowa Mechanika Płynów (CFD) umożliwia szczegółową analizę zagadnień związanych z przepływem płynów, eliminując konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji np. urządzeń do hodowli roślin o wyższej użyteczności konsumpcyjnej. Wykorzystanie pakietu obliczeniowego pozwala uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu, transporcie energii i masy.

### Cel i zakres badań

Celem pracy było określenie charakterystycznych wartości przepływu burzliwego w bioreaktorze w celu późniejszego wykorzystania ich w modelowaniu bilansu populacji komórek roślinnych o poprawionych wartościach odżywczych. Zakres prac obejmował:

- określenie pola przepływu w reaktorze oraz parametrów burzliwości za pomocą symulacji CFD;
- zweryfikowanie otrzymanych wyników numerycznych (CFD) przy użyciu anemometrii laserowej (LDA);
- wyznaczenie charakterystycznych stref w reaktorze (charakterystyczne wartości szybkości dyssypacji energii  $\varepsilon$  i energii kinetycznej  $k$ );

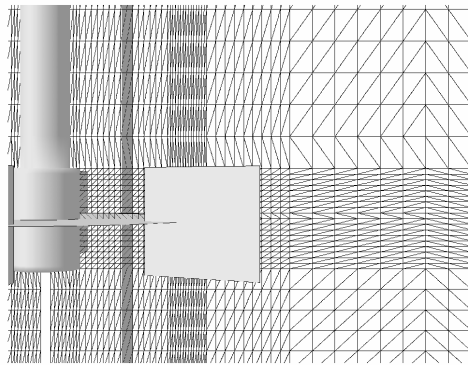
- wyznaczenie oraz znormalizowanie średnich wartości  $\varepsilon$  i  $k$  w poszczególnych strefach.

### Opis sposobu modelowania oraz analiza otrzymanych wyników

Numeryczną symulację procesów zachodzących w reaktorze zbiornikowym, o średnicy  $T = 0,1$  m, wyposażonym w 6-łopatkowe mieszadło turbinowo-tarczowe (zastosowano mieszadła o średnicy równej  $1/3$  i  $2/3$  średnicy zbiornika), o działaniu okresowym podzielono na dwa charakterystyczne etapy: 1. obliczenia teoretyczne 2. weryfikację doświadczalną rozkładów prędkości oraz szybkości dyssypacji energii w modelowanym układzie.

Do modelowania przepływu burzliwego w reaktorze zbiornikowym z mieszadłem mechanicznym wykorzystano program obliczeniowej mechaniki płynów Fluent 6.0®. W tym celu, wykorzystując program Gambit 2.0® oraz Mixsim®, stworzono trójwymiarową siatkę obliczeniową, stanowiącą odwzorowanie geometrii reaktora doświadczalnego. Siatka składała się z 359 000 komórek o kształcie heksaedralnym. Na rys. 1. przedstawiono fragmenty siatki obliczeniowej dla jednego z badanych układów geometrycznych, na których widać zagęszczenie ilości węzłów na wysokości mieszadła, czyli w obszarze o największych zmianach parametrów przepływów.

W obliczeniach numerycznych wykorzystano metodę MRF (Multiple Reference Frame). Jest ona przeznaczona do symulacji procesów w stanie stacjonarnym i polega na wyodrębnieniu obszaru otaczającego mieszadło. Obszar ten porusza się wraz z mieszadłem. Pozostała część siatki



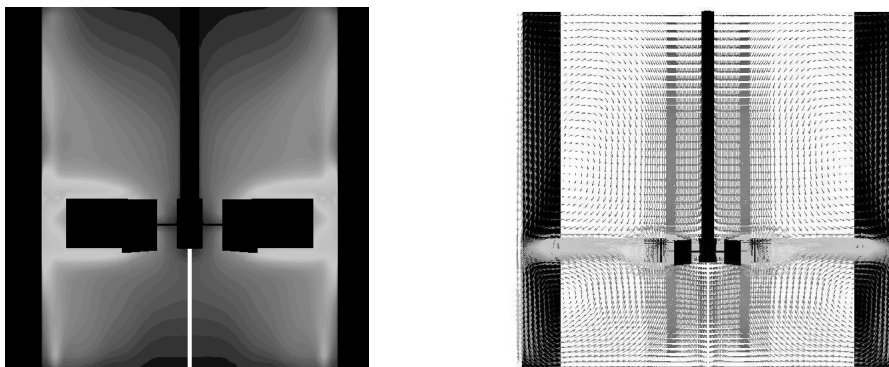
Rys.1. Fragment siatki obliczeniowej

Fig. 1. Fragment of computation net.

numerycznej wewnątrz reaktora jest nieruchoma. Do obliczeń pola przepływu burzliwego wykorzystano model  $k-\varepsilon$  [Bałdyga, Bourne 1999] przy zastosowaniu następujących warunków brzegowych:

- na ścianie bocznej reaktora, dnie i pokrywie w kształcie dysku  $\langle u_r \rangle = \langle u_z \rangle = \langle u_\omega \rangle = 0$ ;
- na mieszadłe i wale, prędkość płynu odpowiada prędkości wału i mieszadła dla danej częstości obrotowej mieszadła  $N$ ;
- wykorzystano koncepcję warstwy granicznej opisującą zmianę profilu prędkości w przepływie burzliwym w pobliżu ściany;
- wartości lepkości i gęstości cieczy w zbiorniku przyjęto dla wody, gdyż stosowana pożywka w badaniach doświadczalnych wykazywała bardzo zbliżone wartości.

Kryterium zbieżności obliczeń (uśredniony błąd względny dla wszystkich komórek w siatce obliczeniowej dla dwu kolejnych iteracji) wynosiło  $10^{-6}$ . Wartość tę ustalono wg zaleceń podanych podręczniku użytkownika programu Fluent. Wartość ta jest również często spotykana w literaturze przedmiotu [Sowana i in., 2001].

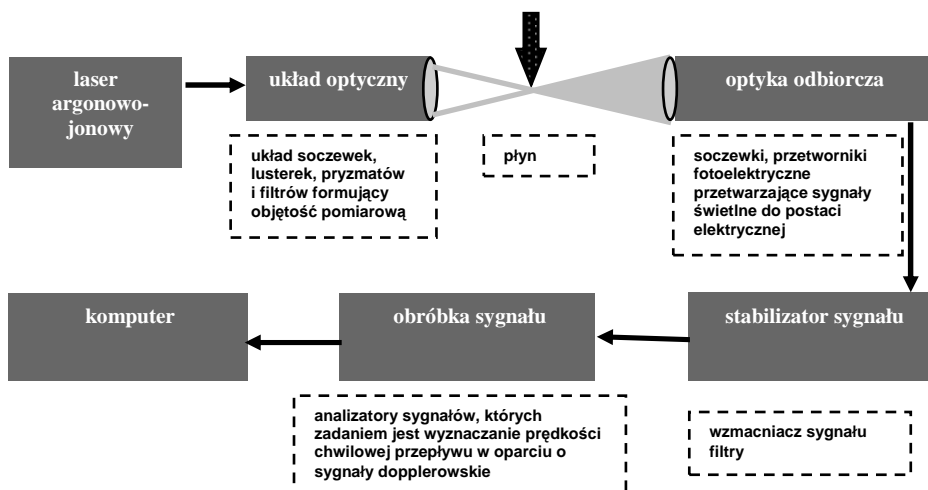


Rys. 2. Przykładowe wyniki otrzymane z CFD

Fig. 2. Exemplary results obtaining from CFD.

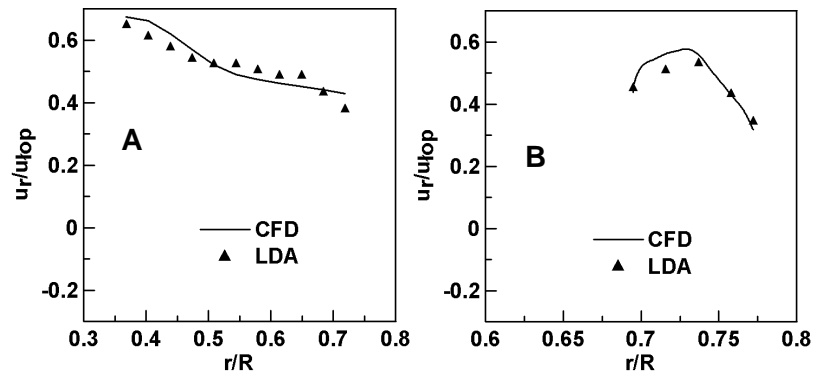
Pomiary pozwalające zweryfikować wyniki obliczeń numerycznych (rys. 2) wykonano przy użyciu dwuwymiarowego anemometru laserowego (Dantec LDA) (rys. 3).

Porównano przewidywane wartości (CFD) osiowych i promieniowych składowych prędkości z wynikami doświadczalnymi (LDA) (rys. 4). W większości przypadków otrzymano dobrą zgodność, co potwierdziło poprawność dokonanych obliczeń i pozwoliło na wykorzystanie w późniejszym etapie modelowania uzyskanych w symulacjach wartości parametrów burzliwości. Podobne wnioski można znaleźć również w literaturze [Bałdyga, Makowski, 1999; Bałdyga Makowski, 2004]



Rys. 3. Schemat układu LDA ([www.dantecmt.com](http://www.dantecmt.com))

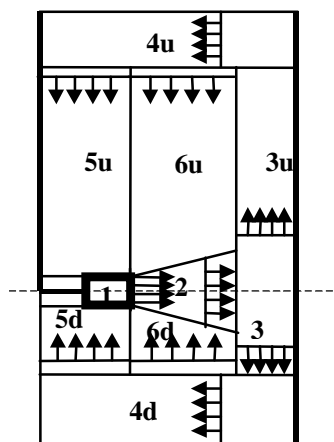
Fig. 3. Scheme of LDA system ([www.dantecmt.com](http://www.dantecmt.com))



Rys. 4. Zmienność prędkości średniej w reaktorze w rejonie mieszadła (A –  $d_{top}/T=1/3$ , B –  $d_{top}/T=2/3$ )

Fig. 4. Variation of mean velocity in reactor at agitator sphere (A- $d_{top}/T = 1/3$ , B –  $D_{top}/T = 2/3$ )

Na podstawie zweryfikowanych wyników modelowania otrzymanych z CFD (rys. 2. i rys. 4.) oraz prac na temat modelowania przepływów w reaktorach zbiornikowych z mieszadłem [Alopaeus i in., 1999; Yu, 1993], wewnątrz reaktora wyróżniono najbardziej charakterystyczne rejony pod względem parametrów przepływu oraz burzliwości. Strefa 1 to rejon mieszadła, w którym występują najwyższe wartości szybkości dyssypacji energii. Strefa 2 to rejon reaktora na wysokości mieszadła, w którym również występują wysokie wartości szybkości dyssypacji energii, zaś profil prędkości przyjmuje charakterystyczny kształt rozszerzając się w kierunku ścian reaktora. W okolicy przegród (strefy 3u i 3d) następuje podział strumienia wychodzącego ze strefy mieszadła (strefa 2) na dwa strumienie, które poruszają się wzdłuż przegród (zamontowanych w celu zwiększenia burzliwości w mieszalniku). Strefy 4u i 4d charakteryzują się najniższymi wartościami szybkości dyssypacji energii. Strefy 5u i 5d to rejony przy mieszadle wzdłuż wału mieszadła. Strefy 6u i 6d to pozostała część reaktora.

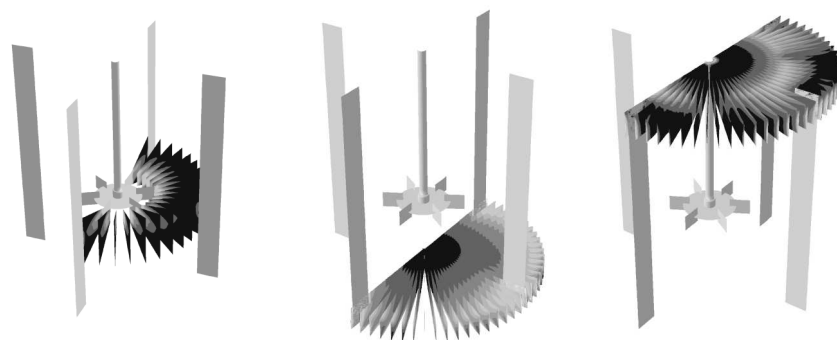


Rys.5. Strefy dyssypacji energii w reaktorze zbiornikowym (**u** - strefy powyżej powierzchni mieszadła, **d** - strefy poniżej powierzchni mieszadła)

Fig. 5. Zones of energy dissipation in reactor vessel.

Następnie w pracy wyznaczono wartości względnej szybkości dyssypacji energii oraz skali dużych wirów jako najlepiej charakteryzujące przepływ burzliwy oraz niezbędne do późniejszego rozwiązania bilansu populacji komórek roślinnych. Względne szybkości dyssypacji energii definiowane jako stosunek  $\phi_r = \epsilon_r/\epsilon$  oraz skale dużych wirów  $L_i$  w

poszczególnych strefach określono przez uśrednienie wartości szybkości dyssypacji energii i skal dużych wirów na powierzchniach kontrolnych. Dla podobszarów 2 i 6 stworzono powierzchnie o stałym promieniu odległe od siebie o 2-3 mm. Dla pozostałych stref utworzono powierzchnie o stałych współrzędnych osiowych odległe od siebie o 3-5 mm (rys. 6.). Skala dużych wirów związana jest z szybkością dyssypacji energii i w przypadku burzliwości izotropowej może być oszacowana dla modelu k-ε jako  $L=(2k/3)^{3/2}/\varepsilon$ . Podobny sposób wyznaczania wyżej wymienionych wartości można znaleźć np. w pracy Alopaeus V., Koskinen J., Keskinen K. [1999]. Wyniki przedstawiono w tab. 1.



Rys.6. Wyznaczanie średnich wartości parametrów burzliwości powierzchni kontrolne - rozkład szybkości dyssypacji energii w poszczególnych strefach

Fig. 6. Determination of mean values for turbulence parameters; control areas – distribution of energy dissipation velocity in particular zones.

Tab.1. Wartości bezwymiarowych objętości podobszarów  $X_i$ , współczynnika  $\varphi_i$  oraz całkowitej skali burzliwości  $L_i$  w odpowiednich podobszarach

Table 1. Dimensionless volume values for sub-areas  $X_j$ , coefficient  $\varphi_1$  and total scale of turbulence  $L_j$  in corresponding sub-areas.

strefa	$d_{imp}/T = 1/3$			$d_{imp}/T = 2/3$		
	$X_i$	$\varphi_i$	$L_i$	$X_i$	$\varphi_i$	$L_i$
1	0,00756	16,0300	0,00432	0,02869	4,3764	0,00917
2	0,07079	10,3100	0,00646	0,05365	4,4727	0,01371
3u	0,23491	0,0700	0,01328	0,14715	0,9974	0,01770
3d	0,09684	0,0770	0,01200	0,13703	0,9974	0,01160
4u	0,09664	0,0970	0,01806	0,05145	0,4156	0,01866
4d	0,09830	0,2300	0,01120	0,04396	0,4531	0,01157
5u	0,05961	0,2330	0,02960	0,13051	0,4365	0,06019
5d	0,02234	0,2520	0,01120	0,11484	0,4205	0,02277
6u	0,23629	0,2400	0,02200	0,14864	0,6983	0,04473
6d	0,07665	0,2200	0,01484	0,14408	0,6986	0,03017

## Wnioski

W pracy wykorzystano pakiet Obliczeniowej Mechaniki Płynów do wyznaczenia trójwymiarowego pola prędkości oraz parametrów burzliwych ( $k$ ,  $\varepsilon$ ) dla bioreaktora zbiornikowego. Wyniki modelowania zweryfikowano przy użyciu anemometrii laserowej. Analiza rezultatów pozwoliła na wyznaczenie charakterystycznych stref w reaktorze, a następnie uśrednienie wartości parametrów burzliwych niezbędnych do rozwiązania bilansu populacji komórek roślinnych hodowanych *in vitro* w bioreaktorze.

## Bibliografia

Alopaeus V., Koskinen J., Keskinen K. 1999.: *Chem. Eng. Sci.*, **54**, str. 5887-5899;  
Bałdyga J., Bourne J. R. 1999. : Turbulent mixing and chemical reactions. Chichester, Wiley;  
Bałdyga J., Makowski Ł. 1999 Prace Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW, tom 25, str. 45-52;  
Bałdyga J., Makowski Ł. 2004: *Chem. Eng. Technol.*, 27, 3, str. 225-230.  
Sowana D. D., Williams D. R. G., Dunlop E. H., Dally B. B., O'Neill B. K., Fletcher D. F. 2001.: International Symposium on Mixing in Industrial Processes – ISMIP4, Toulouse, str. 200-212;  
Yu S. 1993 Micromixing and parallel reactions., PhD thesis, ETH Zurich

## **MODELING OF THE FLOW IN BIO-REACTOR**

### **Summary**

The study aimed at determination of characteristic values for turbulent flow in bio-reactor in order to their later application to modeling the balance of plant cell aggregate population. During to the use of computational fluid dynamics (CFD) as well as the verification of obtained in this way results by means of the laser anemometry (LDA), it was possible to determine the mean values of parameters describing turbulent flow in bio-reactor for characteristic zones in reactor vessel.

**Key words:** multizonal modeling, CFD, LDA measurements, flows in bio-reactor.

Recenzent- Józef Grochowicz