

Eksperymentalna i numeryczna analiza procesu mieszania w mikro-kanale

Sławomir Błoński, Piotr Korczyk, Tomasz A. Kowalewski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów

1. WSTĘP

Proces tworzenia emulsji, jako jednorodnego układu dwóch niemieszających się cieczy, jest jednym z podstawowych zagadnień w wielu gałęziach przemysłu, jak na przykład przemysł spożywczy, chemiczny czy farmaceutyczny. Idealna i przydatna dla przemysłu linia produkcyjna powinna wytwarzać taką mieszaninę w sposób jak najmniej skomplikowany, ciągły i zapewniający niemal dowolnie dużą wydajność masową produkcji. Dodatkowo, otrzymywana emulsja powinna charakteryzować się zadaniem i jednorodnym rozkładem rozmiaru fazy rozproszonej.

Najczęściej stosowanymi, rzeczywistymi układami produkcji emulsji są układy przepływowe wykorzystujące przepływ turbulentny jako mechanizm rozdrabniania kropelek fazy rozproszonej. Rozwiązanie takie zapewnia przemysłową wydajność procesu. Niestety, otrzymywana w ten sposób emulsja nie jest emulsją jednorodną. Dlatego też, wszelkie prace mające na celu poprawę właściwości otrzymywanych emulsji są ważne dla wspomnianych gałęzi przemysłu.

Opisana w pracy analiza miała na celu dokładne poznanie struktury przepływu w modelu przepływowego emulsyfikatora [1], którego zasadniczym elementem są dwie mikro-szczeliny o wysokości $400\mu\text{m}$ i długości 1mm . Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały techniką micro-PIV na unikalnym w skali kraju stanowisku pomiarowym. Wykonana została również symulacja numeryczna przepływu, zarówno przez bezpośrednie rozwiązywanie równań Naviera-Stokesa (*DNS* – Direct Numerical Simulation), jak i wykorzystanie hipotezy Reynoldsa, uśredniającej fluktuacje prędkości i ciśnienia (model $k-\varepsilon$). Przeprowadzone prace pozwoliły zlokalizować obszary emulsyfikatora o najwyższym stopniu turbulizacji przepływu oraz zweryfikować poprawność obliczeń numerycznych.

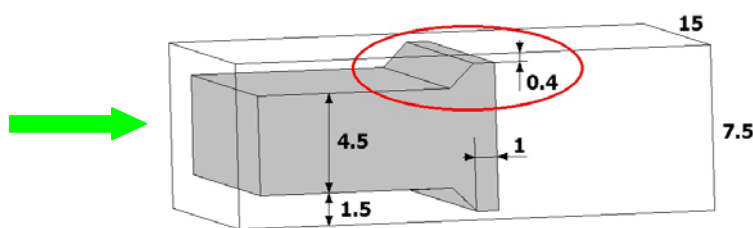
2. ANALIZA EKSPERYMENTALNA PRZEPŁYWU PRZEZ MIKRO-KANAŁ

Przedmiotem analizy był przepływ wody przez płaski model emulsyfikatora zbudowanego z dwóch kanałów wlotowych o wysokości 1.5mm i szerokości 15mm , które po gwałtownym zmniejszeniu wysokości tworzyły dwa mikro-kanale o wysokości $400\mu\text{m}$, długości 1mm i szerokości 15mm . Mikro-kanale następnie połączone były z kanałem wylotowym o wysokości 7.5mm i szerokości 15mm (rys. 1). Całkowita długość odcinka wlotowego wynosiła 97.5mm , a wylotowego 78.5mm . Wykonane ze szkła ścianki zewnętrzne emulsyfikatora (górna i dolna) zapewniały optyczny dostęp do jego wnętrza, umożliwiając tym samym wykorzystanie optycznych metod analizy struktury przepływu (micro-PIV). Przepływ wody wymuszany był za pomocą specjalnie zaprojektowanego układu ciśnieniowego, składającego się z butli zawierającej sprężony azot, ciśnieniowego zbiornika wyrównawczego – regulacyjnego, dwóch zbiorników na wodę: zasilającego i odbiorczego oraz systemu przewodów ciśnieniowych, zaworów i czujników ciśnienia. Żądana szybkość przepływu osiągana była poprzez zadanie odpowiedniego, wcześniej wyznaczonego w procesie kalibracji, ciśnienia w zbiorniku wyrównawczo – regulacyjnym. Azot zgromadzony w tym zbiorniku był kierowany następnie do zbiornika zasilającego i wymuszał przepływ wody w nim zawartej przez emulsyfikator do zbiornika

odbiorczego. Strumień objętościowy przepływu wody w przeprowadzonych eksperymentach wynosił $Q_v = 0.204 dm^3 / s$ i zapewniał odpowiednio wysokie wartości liczby Reynoldsa, zdefiniowanej jako:

$$Re = \frac{\rho l V}{\mu}, \quad (1)$$

gdzie ρ i μ są odpowiednio gęstością i lepkością wody, a l i V – wysokością kanału i średnią prędkością przepływu w tym kanale. Dla zadanej wartości strumienia przepływu, średnia prędkość w przewodzie zasilającym emulsyfikator, mającym średnicę $8mm$, wynosiła około $1m/s$ i wzrastała do około $17m/s$ w mikro-szczelinie emulsyfikatora. Liczba Reynoldsa wyznaczona dla przepływu w przewodzie zasilającym (wymiar l przyjęty jako średnica przewodu) oraz w szczelinie ($l = 400\mu m$ – wysokość szczeliny) wynosiła odpowiednio 8000 i 6770. Wartości liczby Reynoldsa były zatem dostatecznie wysokie, aby oczekiwać, że analizowany przepływ będzie przepływem turbulentnym.

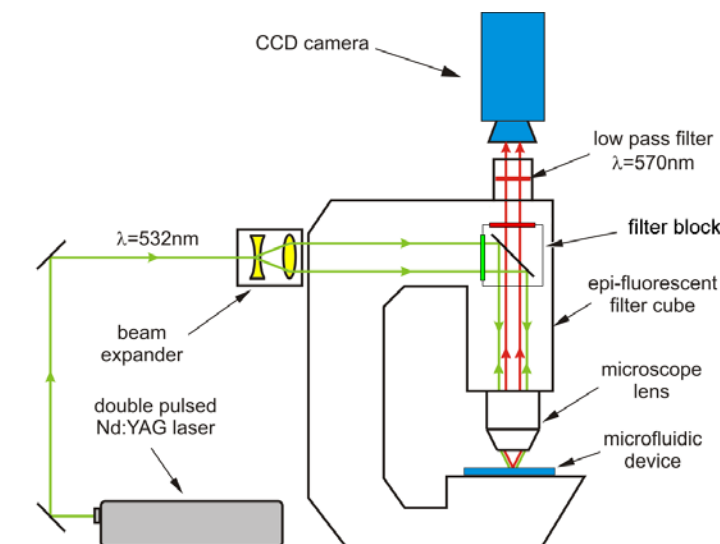


Rys. 1. Geometria emulsyfikatora z zaznaczonym położeniem analizowanego mikro-kanału; wymiary mikro-kanału: wysokość $400\mu m$, szerokość $15mm$ i długość $1mm$; wlot zaznaczony zieloną strzałką; wysokości kanałów wlotowych i wylotowego wynoszą odpowiednio $1.5mm$ i $7.5mm$.

Analiza eksperymentalna przepływu wody przez model emulsyfikatora wykonana została przy wykorzystaniu optycznej techniki mikro-przepływowej anemometrii obrazowej (micro-PIV – micro Particle Image Velocimetry) [2,3], będącej adaptacją tradycyjnej techniki PIV, umożliwiającej wykonanie pomiarów w kanałach o mikrometrowych wymiarach. PIV jest bezinwazyjną metodą pomiaru chwilowego pola prędkości poruszającego się płynu [4]. Dodanie do przepływającego czynnika odpowiednio dobranych cząstek znacznikowych pozwala na „śledzenie” ruchu tego czynnika. Po zarejestrowaniu w znanych odstępach czasowych sekwencji obrazów i skorelowaniu przemieszczenia cząstek znacznikowych na tych obrazach, otrzymujemy dwuwymiarowe wektorowe pole prędkości analizowanego przepływu. W tradycyjnej technice PIV [4], aby uwidocznnić cząstki znacznikowe w postaci jasnych punktów na jednej, wybranej płaszczyźnie przepływu, która podlega rejestracji cyfrową kamerą, należy badany przepływ oświetlić w zadanym przekroju wąską warstwą świetlną, tzw. nożem świetlnym (light sheet). W ten sposób widoczny jest tylko badany przekrój, a pozostała część przepływu jest zaciemniona i nie podlega rejestracji.

Pomiary prowadzone techniką PIV w mikro-przepływach, z uwagi na brak miejsca na prawidłowe uformowanie noża świetlnego oraz użycie bardzo małych cząstek znacznikowych, często mniejszych niż długość fali światła widzialnego, wymagają innego sposobu oświetlenia i wyboru płaszczyzny rejestracji. Zmodyfikowaną metodę PIV, zaadoptowaną na potrzeby pomiarów mikro-skalowych nazwano micro-PIV [5]. Obserwację przepływu przeprowadza się pod mikroskopem, a cząstkami znacznikowymi są tutaj zazwyczaj cząstki fluorescencyjne, które po wzbudzeniu światłem o danej barwie (długości fali) emitują światło o barwie innej niż światło wzbudzające, przy czym długość fali światła emitowanego jest dłuższa niż światła wzbudzającego (przesunięcie Stokesa). Użycie takich cząstek pozwala na wyeliminowanie konieczności formowania światła oświetlającego w wąską płaszczyznę świetlną. Możemy zastosować tutaj źródło światła oświetlające cały badany przepływ [6] (tzw. volume illumination) i poprzez system filtrów doprowadzić do rejestracji tylko światła emitowanego przez cząstki fluorescencyjne, odcinając światło wzbudzające, odbite od ścianek mikro-kanału i cząstek znacznikowych. Odcięcie to jest konieczne, gdyż jasność światła wzbudzającego jest dużo wyższa niż światła emitowanego przez fluorescencyjne cząstki znacznikowe; bez odcięcia

światło emitowane byłoby niewidoczne na tle światła wzbudzającego. Wyboru płaszczyzny rejestracji dokonuje się przez zmianę odległości pomiędzy badanym mikro-kanalem a obiektywem mikroskopu. Jako „ostre” i jasne punkty widoczne są jedynie cząstki znajdujące na płaszczyźnie ostrości obiektywu. Pozostałe cząstki, będące poza płaszczyzną ostrości, również emitują światło, które przez obiektyw dociera do kamery, ale ich obraz jest „nieostry” i powoduje jedynie dodanie do rejestrowanych obrazów tzw. szumu tła. Powoduje to jednak ograniczenie stosowania techniki micro-PIV do badania stosunkowo cienkich warstw poruszającego się płynu, maksymalnie 10 – 15mm. Dla warstw grubszych stosunek sygnału (obrazu cząstek będących w płaszczyźnie ostrości) do szumu (szum tła) jest zbyt mały i uniemożliwia prawidłowe przeprowadzenie pomiarów.

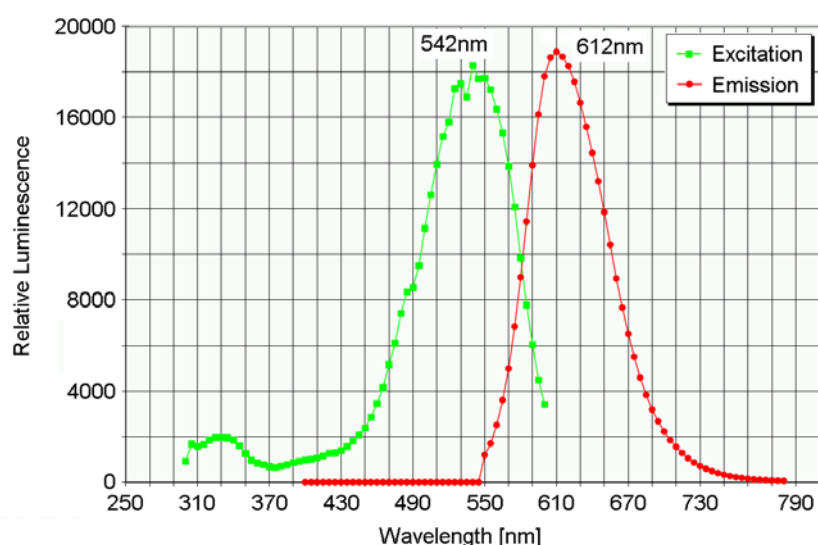


Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego micro-PIV.

W pierwszych opublikowanych pracach [5] opisujących eksperymentalną analizę mikro-przepływów techniką micro-PIV, źródłem światła była emitująca ciągle światło białe lampą rtęciowa. Za pomocą filtrów świetlnych, z całego spektrum światła białego, separowana była jedna barwa światła zgodna z maksimum wzbudzenia użytych cząstek fluorescencyjnych. Cząstki te, dodane do przepływu obserwowanego pod mikroskopem, wskutek dużego powiększenia przestrzennego, charakteryzowały się bardzo dużym względnym przemieszczeniem na rejestrowanych obrazach. Ograniczało to układy pomiarowe wyposażone w lampy rtęciowe do analizy jedynie powolnych, laminarnych przepływów, w których prędkość maksymalna nie przekraczała 0.1m/s. Szybkozmiennne procesy mikro-przepływowe, wymagające od technik pomiarowych wyższej rozdzielczości czasowej, wymusiły użycie szybkich kamer cyfrowych [7], pozwalających na rejestrację zdjęć analizowanego przepływu z bardzo dużą częstotliwością. Wykonywanie zdjęć z bardzo krótką migawką (czasem ekspozycji obrazu) wymagało jednak zapewnienia wystarczająco dużej ilości światła, niezbędnej do prawidłowego wykonania zdjęć w tak krótkich czasach. Spowodowało to zastąpienie lampy rtęciowej bardziej wydajnym źródłem światła, jakim jest laser, który dodatkowo może emitować ciągle światło monochromatyczne zgodne ze spektrum wzbudzenia cząstek fluorescencyjnych. Użycie szybkich kamer i lasera jako źródła światła pozwoliło zwiększyć zakres prędkości możliwych do analizy techniką micro-PIV do około 1m/s [7]. Nadal jednak taki układ charakteryzował się zbyt niską rozdzielczością czasową, aby możliwe było jego użycie do badań bardzo szybkich, turbulentnych przepływów przez mikro-kanaly. Aby „zamrozić” przemieszczenie cząstek znacznikowych dodanych do takich przepływów konieczne jest ich oświetlenie impulsem trwającym kilka czy kilkanaście nanosekund [2]. Oświetlenie takie zapewniają lasery typu Nd:Yag, mogące emitować impulsy światła o długości nawet poniżej 1ns.

Stanowisko pomiarowe, wykorzystane do badań przepływu przez model emulsyfikatora, przedstawione na rysunku 2, składa się z mikroskopu epi-fluorescencyjnego (*Nikon Eclipse 50i*)

wyposażonego w zestaw obiektywów zapewniających odpowiednie powiększenie analizowanego przepływu, lasera Nd:Yag (*SoloPIV Nd YAG Lasers, New Wave Research Inc.*) emitującego impulsy światła o długości $5ns$, długości fali $532nm$ i energii $30mJ$, cyfrowej kamery wysokiej rozdzielczości (*12bit PCO SensiCam*), zestawu filtrów optycznych oraz układu zwierciadeł i soczewek. Światło zielone ($532nm$) emitowane przez laser, po odpowiednim uformowaniu przez układ soczewek (beam expander) kierowane jest do wewnętrznego toru optycznego mikroskopu, gdzie przez blok filtrów i obiektyw mikroskopu dociera do analizowanego przepływu oświetlając fluorescencyjne cząstki znacznikowe w nim zawarte. Cząstki te, po wzbudzeniu, emitują światło czerwone ($612nm$), które podlega rejestracji kamerą cyfrową. Światło zielone, odbite od ścianek kanału i cząstek znacznikowych, jest odcięte przez układ filtrów i nie podlega rejestracji. Tak zbudowany układ pomiarowy pozwala na akwizycję par obrazów o rozdzielczości 1280×1024 pikseli z częstotliwością $3.75Hz$, z minimalnym odstępem czasowym zdjęć w parze wynoszącym $200ns$.

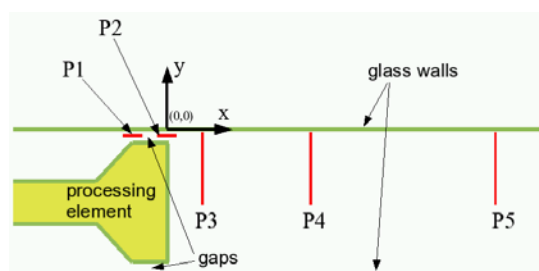


Rys. 3. Spektrum wzbudzenia i emisji użytych fluorescencyjnych cząstek znacznikowych [8].

W opisanym układzie wykorzystano blok filtrów fluorescencyjnych typu TRITC (Ex 540/25, DM 565, BA 605/55), który zbudowany jest z dwóch filtrów i zwierciadła dichroicznego. Blok ten był dobrany tak, aby jego właściwości świetlne odpowiadały spektrum wzbudzenia i emisji użytych w eksperymentach fluorescencyjnych cząstek znacznikowych (rys. 3). Pierwszy filtr bloku przepuszcza tylko światło o długości fali $540nm$ z szerokością „okna przepuszczającego” $25nm$. Filtr ten ma za zadanie wyciąć ze światła białego, pochodzącego np. z lampy rtęciowej, światło o długości fali zbliżonej do spektrum wzbudzenia cząstek fluorescencyjnych (w przypadku wykorzystania jako źródła światła lasera emitującego światło monochromatyczne, nie ma potrzeby używania tego filtru). Światło przepuszczone przez pierwszy filtr pada następnie na zwierciadło dichroiczne, które jest elementem optycznym odbijającym światło poniżej zadanej długości fali, a przepuszczającym powyżej tej długości. Zwierciadło dichroiczne powinno być tak dobrane, aby granica pomiędzy pasmem odbijania i przepuszczania znajdowała się pomiędzy pasmem wzbudzenia i emisji cząstek znacznikowych. Granica ta, dla zwierciadła użytego w bloku TRITC wynosi $565nm$. Drugim filtrem w bloku jest filtr przepuszczający tylko światło o długości $605nm$, z „szerokością okna” $55nm$. Ma on za zadanie odfiltrowanie światła wzbudzącego, odbitego od ścianek kanału czy rozproszonego w przepływie i przepuszczenie tylko światła emitowanego przez cząstki fluorescencyjne. Tuż przed kamerą, z uwagi na skończoną sprawność elementów optycznych, zamontowano dodatkowy filtr odcinający światło o długości fali poniżej $570nm$.

Eksperymenty przeprowadzone były z użyciem dejonizowanej wody z dodatkiem polistyrenowych cząstek fluorescencyjnych o średnicy $2\mu m$, maksimum wzbudzenia światłem o długości fali $542nm$ i maksimum emisji $612nm$ (*Duke Scientific Inc.*) (rys. 3). Koncentracja objętościowa cząstek była

bardzo mała, poniżej 0.0001%, dlatego można było przyjąć, że cząstki te nie zaburzają struktury badanego przepływu.

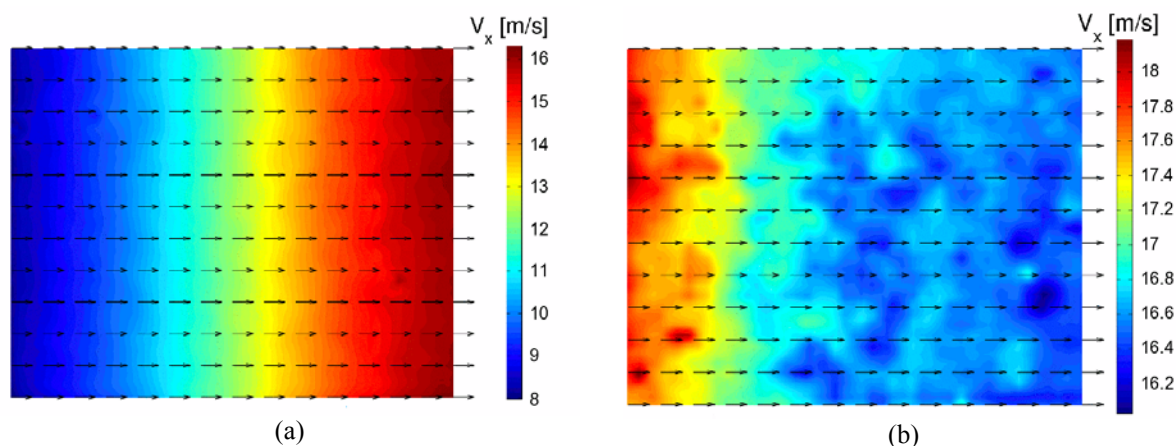


Rys. 4. Schematyczny przekrój emulsyfikatora z przyjętym układem współrzędnych i pozycją obszarów pomiarowych.

Tabela 1. Lokalizacja wykonanych pomiarów

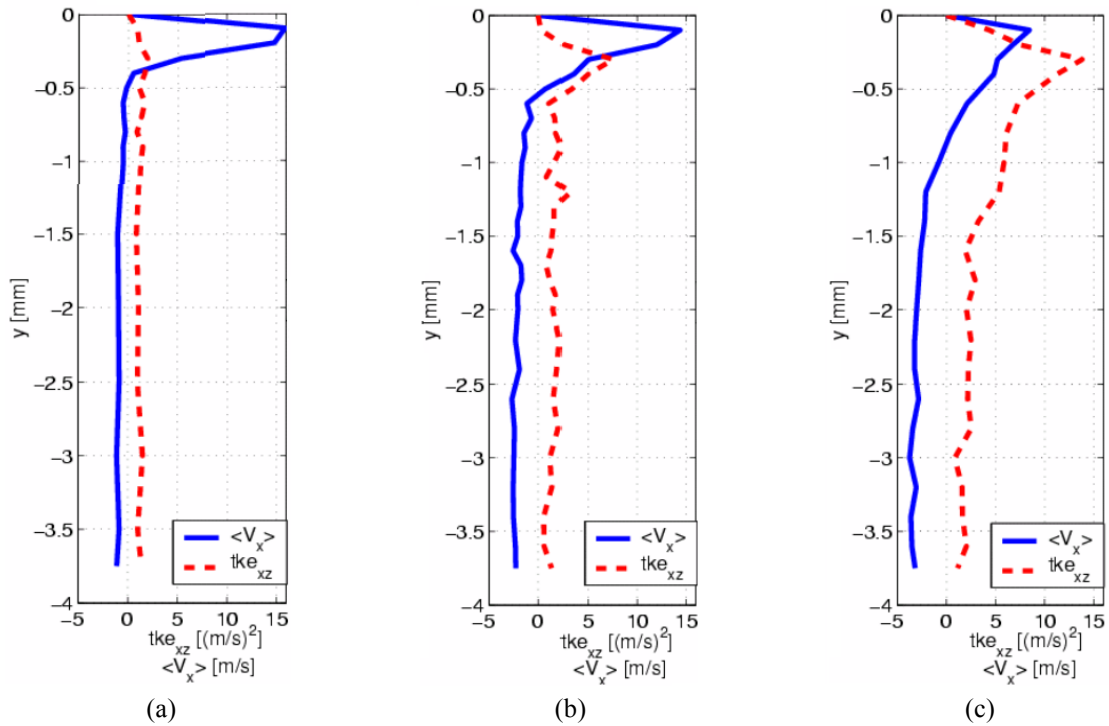
Profil	$X [mm]$	$Y [mm]$
P1	od -1.45 do -0.7	-0.2
P2	od -0.35 do 0.35	-0.2
P3	1	od 0 do -3.75 , krok $0.1 \div 0.3$
P4	3	od 0 do -3.75 , krok $0.1 \div 0.3$
P5	8	od 0 do -3.75 , krok $0.1 \div 0.3$

Podczas eksperymentów zostały wykonane pomiary dwuwymiarowego, chwilowego pola prędkości w wybranych lokalizacjach emulsyfikatora (rys. 4 i tab. 1). Lokalizacje P1 i P2 znajdują się na płaszczyźnie znajdującej się na środku szczeliny ($Y = -0.2mm$) i obejmują obszar o wymiarach $0.7 \times 0.55mm$ odpowiednio w okolicy jej wlotu i wylotu. Dla tych lokalizacji wykonano po około 100 pomiarów prędkości chwilowej. Pomiary te pokazały, że przepływ w mikro-kanale jest praktycznie niezmienny w czasie – nie zaobserwowano tutaj istotnych fluktuacji prędkości. Przedstawione na rysunku 5a pole prędkości pokazuje bardzo silne przyspieszenie przepływu, od około $8m/s$ do $16m/s$ w okolicy wlotu do szczeliny, jednak pole to wydaje się być w pełni stacjonarne. W okolicy wylotu ze szczeliny (lokalizacja P2, rys. 5b) prędkość maleje od około $18m/s$ do $16m/s$. Możemy tutaj zauważyć nieznaczne przestrzenne perturbacje prędkości, co może świadczyć o inicjacji przejścia laminarno – turbulentnego w obszarze wylotowym szczeliny. Jednak dla wewnętrznego obszaru szczeliny, pomimo wysokiej wartości prędkości wynoszącej około $17m/s$, co odpowiada liczbie Reynoldsa równej 6770, przepływ wydaje się być laminarny.



Rys. 5. Wektorowe pole prędkości i kontury prędkości wyznaczone dla lokalizacji P1 (a) i P2 (b).

Wyniki pomiarów dla lokalizacji P3, P4 i P5, będących pionowymi liniami położonymi odpowiednio $1mm$, $3mm$ i $8mm$ za wylotem szczeliny (rys. 4 i tab. 1), przedstawione są w postaci pionowych profili uśrednionej składowej prędkości V_x i energii kinetycznej turbulencji tke_{xz} (rys. 6). Każdy z tych profili wyznaczono na podstawie pomiarów wykonanych w 20 różnych położeniach, położonych wzdłuż każdej z linii P3, P4 i P5, od ścianki zewnętrznej kanału do jego płaszczyzny centralnej (rys. 4 i tab. 1). Dla każdego położenia wykonano 28 pomiarów chwilowego pola prędkości, czego wynikiem było 28 dwuwymiarowych pól prędkości, które następnie zostały uśrednione, zarówno po czasie, jak i przestrzeni. Wynikiem takich 28 pomiarów wykonanych dla jednego położenia, po uśrednieniu, jest jedna wartość średnia prędkości – wektor $\langle V_x, V_y \rangle$.



Rys. 6. Profile uśrednionej w czasie składowej prędkości V_x (linia niebieska) i energii kinetycznej turbulencji tke_{xz} (czerwona linia przerywana) dla lokalizacji P3 (a), P4 (b) i P5 (c).

Energia kinetyczna turbulencji tke_{xz} , pokazana jako czerwone przerywane linie na rysunku 6, została zdefiniowana dla dwuwymiarowego przekroju jako:

$$tke_{xz} = \langle V_x'^2 \rangle + \langle V_z'^2 \rangle, \quad (2)$$

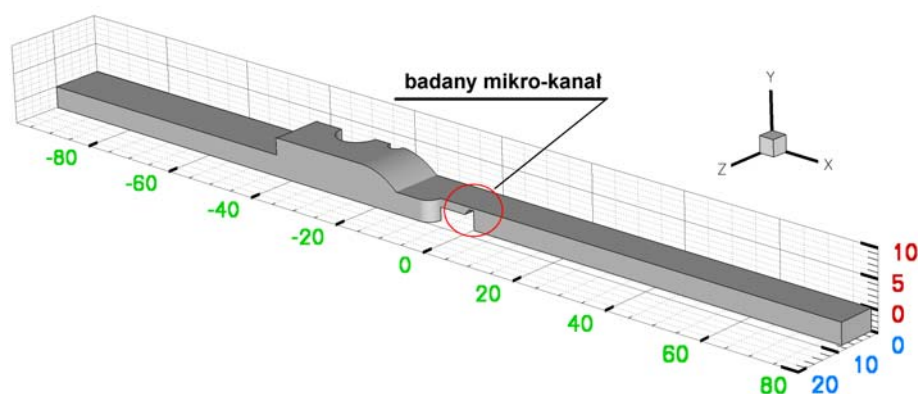
gdzie V_x' i V_z' są fluktuacjami prędkości odpowiednio w kierunku X i Z , a nawias $\langle \rangle$ oznacza wartość średnią.

Jak wynika z profili średniej prędkości V_x (linie niebieskie) pokazanych na rysunku 6, dla położenia P3, czyli 1mm za wylotem szczeliny, główny strumień przepływu znajduje się tuż pod górną ścianką emulsyfikatora osiągając prędkość ok. 16m/s. Natomiast w części centralnej emulsyfikatora, tuż za wylotem szczeliny znajduje się strefa stagnacji, gdzie prędkość jest bliska zeru. Wraz ze wzrostem odległości od mikro-szczeliny strumień przy ściance ulega osłabieniu i 8mm za szczeliną jego prędkość maksymalna spada ok. 8m/s (rys. 6c). W części centralnej kanału pojawia się natomiast przepływ zwrotny o prędkości ok. -5m/s, świadczący o istnieniu strefy recyrkulacji (wartości ujemne V_x wykreślone niebieską linią na rys. 6c). Energia kinetyczna turbulencji tke_{xz} w obszarze bezpośrednio za szczeliną osiąga wartości bardzo niewielkie, bliskie zeru (czerwona przerywana linia na rys. 6a). W tym miejscu zatem przepływ charakteryzuje się bardzo niewielkimi fluktuacjami, świadczącymi o niskiej jego turbulizacji. Wzdłuż kanału wylotowego przepływ staje się coraz bardziej burzliwy, wartość tke_{xz} wzrasta i 8mm od szczeliny osiąga wartość prawie 15m²/s².

Przeprowadzone pomiary świadczą, że w mikro-kanałe emulsyfikatora, gdzie przepływ ulega przyspieszaniu i osiąga prędkość ok. 18m/s, a liczba Reynoldsa wartość 6770, nie zachodzi przejście laminarno – turbulentne. Przepływ, pomimo tak wysokiej liczby Reynoldsa, pozostaje laminarny. Dopiero za szczeliną, w kanale wylotowym, staje się przepływem burzliwym.

3. SYMULACJA NUMERYCZNA PRZEPŁYWU PRZEZ MIKRO-KANAŁ EMULSYFIKATORA

Symulacja numeryczna przepływu wykonana została metodą objętości skończonych, wykorzystując komercyjny pakiet do obliczeń przepływowych Fluent (*Ansys Inc.*) [9]. Przepływ nieściśliwej cieczy lepkiej przez emulsyfikator modelowano poprzez bezpośrednie rozwiązywanie pełnego, trójwymiarowego, niestacjonarnego układu równań Naviera-Stokesa (*DNS* – Direct Numerical Simulation) oraz wykorzystując hipotezę Reynoldsa, uśredniającą fluktuacje prędkości i ciśnienia (model $k-\varepsilon$). W symulacji *DNS* uzyskanie poprawnych rozwiązań dla turbulentnego ruchu płynu wymagało wykonania obliczeń dla bardzo małych kroków czasowych i gęstej siatki obliczeniowej. Geometria emulsyfikatora, zdefiniowana na potrzeby obliczeń, była identyczna z geometrią modelu eksperymentalnego. Stacjonarne obliczenia wykorzystujące model $k-\varepsilon$ przeprowadzono w domenie będącej $\frac{1}{4}$ całości emulsyfikatora (rys. 7), z zadanymi warunkami symetrii na pionowej i poziomej płaszczyźnie symetrii, a niestacjonarne obliczenia *DNS* wykonane zostały dla pełnej geometrii modelu. Na wszystkich ściankach przyjęto standardowe warunki braku poślizgu, na wlocie zadano strumień masy zapewniający taką samą prędkość przepływu jak w eksperymencie, a na wylocie warunek, że ciśnienie w przekroju wylotowym emulsyfikatora jest równe ciśnieniu atmosferycznemu.



Rys. 7. Schemat geometrii emulsyfikatora zdefiniowanej na potrzeby obliczeń numerycznych; przedstawiona jest $\frac{1}{4}$ całej domeny obliczeniowej, wykorzystana do stacjonarnych obliczeń z użyciem modelu $k-\varepsilon$.

Obliczenia wykorzystujące model $k-\varepsilon$ przeprowadzono na siatce składającej się z 457 473 elementów ($\frac{1}{4}$ geometrii emulsyfikatora). Zastosowano tutaj dodatkowo dynamiczne zagęszczanie siatki w tych obszarach domeny, gdzie bezwymiarowy gradient prędkości był większy niż 0.0001. W mikro-szczelinach i ich okolicy wygenerowano strukturalną siatkę sześcienną z warstwą przyścienną, a w pozostałym obszarze domeny niestukturalną siatkę czworościenną. Obliczenia *DNS* wykonane zostały przy wykorzystaniu bardzo podobnej siatki, składającej się z 1 745 830 elementów, wygenerowanej dla pełnej geometrii emulsyfikatora. Nie zastosowano tu jednak dynamicznego zagęszczania siatki w obszarach o dużych gradientach prędkości. Szczegółowe parametry przeprowadzonych obliczeń zestawione zostały w tabelach 2 i 3, odpowiednio dla symulacji *DNS* i wykorzystującej model $k-\varepsilon$.

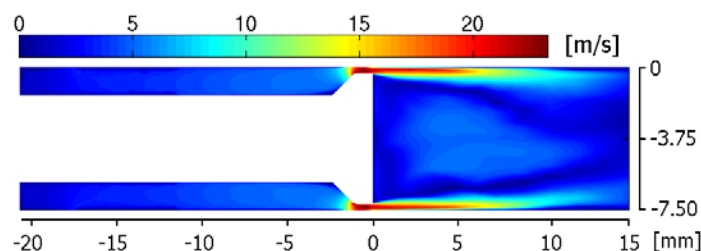
Symulacja *DNS* pozwoliła wyznaczyć dokładne, niestacjonarne rozwiązania niezmodyfikowanych równań Naviera-Stokesa. Otrzymane charakterystyki przepływu pozwoliły określić pełną, przestrzenną i czasową skalę turbulencji, od największych wirów, związanych z transportem większości energii kinetycznej przepływu, do najmniejszych, powodujących dyssypację tej energii (skala Kolmogorowa). Natomiast obliczenia wykorzystujące hipotezę Reynoldsa, uśredniającą fluktuacje prędkości i ciśnienia (model $k-\varepsilon$), dostarczyły wartość prędkości średniej badanego przepływu oraz intensywność dyssypacji energii kinetycznej.

Tabela 2. Parametry symulacji numerycznych DNS

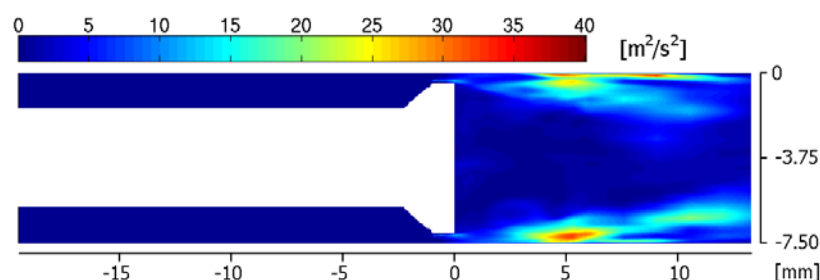
Pakiet obliczeniowy	Fluent 6.3.26, podwójna precyzja
Model	3-D, laminarny, niestacjonarny, nieściśliwy
Płyn	woda, gęstość $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$, lepkość $\mu = 0.001003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
Wydatek masowy	$\dot{m} = 0.204 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Wlot	mass-flow-inlet
Wylot	pressure outlet
Schemat	drugiego rzędu, upwind
Krok czasowy	10^{-7} s
Kryterium zbieżności	residua $< 10^{-6}$
Geometria i siatka	cała geometria emulsyfikatora, 1 745 830 elementów siatki

Tabela 3. Parametry symulacji stacjonarnych z wykorzystaniem modelu $k-\varepsilon$

Pakiet obliczeniowy	Fluent 6.3.26, podwójna precyzja
Model	3-D, laminarny, stacjonarny, nieściśliwy, standardowy model $k-\varepsilon$ z warunkiem <i>Enhanced Wall Treatment</i>
Płyn	woda, gęstość $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$, lepkość $\mu = 0.001003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
Wydatek masowy	$\dot{m} = 0.051 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\frac{1}{4}$ przepływu $\dot{m} = 0.204 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
Wlot	mass-flow-inlet, intensywność turbulencji: 12.1%; promień hydrauliczny: 0.0109
Wylot	pressure outlet, intensywność turbulencji: 12.1%; promień hydrauliczny: 0.0109
Schemat	drugiego rzędu, upwind
Kryterium zbieżności	residua $< 10^{-6}$
Geometria i siatka	$\frac{1}{4}$ całej geometrii emulsyfikatora, 457 473 elementów siatki
Adaptacja siatki	dynamiczne zagęszczanie siatki dla obszarów o wyższych gradientach prędkości niż 0.0001 Y_+ : dozwolone wartości 1 – 2

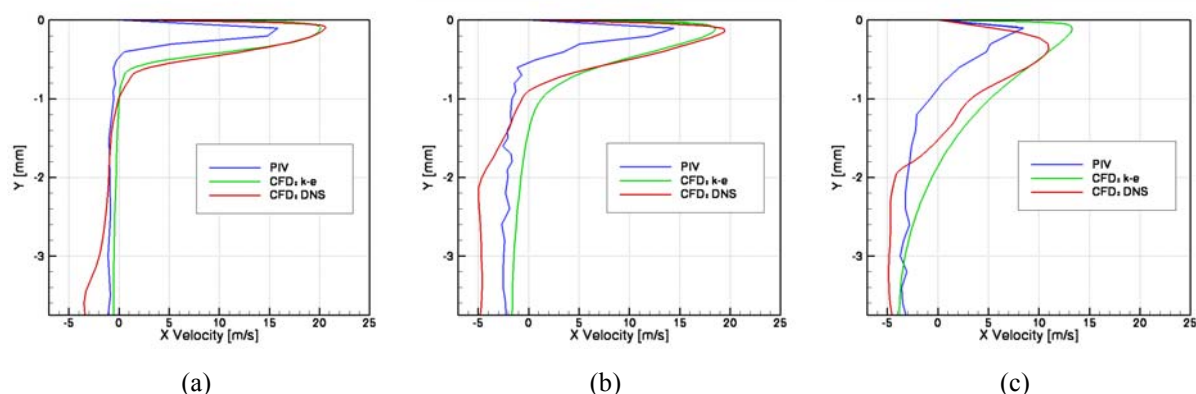
**Rys. 8.** Prędkość średnia pola prędkości na pionowej płaszczyźnie symetrii emulsyfikatora wyznaczona w obliczeniach DNS.

Rysunek 8 przedstawia uzyskane z symulacji DNS średnie pole prędkości w pionowej płaszczyźnie symetrii emulsyfikatora, uśrednione po czasie 1.8 ms . Średnia prędkość przed szczeliną wynosi około 5 m/s , po czym przepływ gwałtownie przyspiesza i osiąga w szczelinie wartość maksymalną równą około 23 m/s . Analiza chwilowych pól prędkości otrzymanych z symulacji DNS wykazała, że na wlocie do szczeliny, podobnie jak w przypadku wyników eksperymentalnych, fluktuacje prędkości są nieznaczne (poniżej 1%) i świadczą o stacjonarności przepływu. Wniosek ten potwierdza pokazane na rysunku 9 pole energii kinetycznej turbulencji, wyznaczone podobnie jak w przypadku analizy eksperymentalnej, według wzoru (2). Energia ta, przed szczeliną i w szczelinie praktycznie jest równa zero, i osiąga maksimum dopiero kilka milimetrów za wylotem ze szczeliny.



Rys. 9. Energia kinetyczna turbulencji tke_{xz} na pionowej płaszczyźnie symetrii emulsyfikatora wyznaczona w obliczeniach metodą *DNS*.

W celu sprawdzenia poprawności przeprowadzonych obliczeń numerycznych dokonano porównania ich rezultatu z danymi eksperymentalnymi. Rysunek 10 przedstawia profile składowej V_x prędkości wyznaczone eksperymentalnie (PIV; linia niebieska), symulacją numeryczną z wykorzystaniem modelu $k-\varepsilon$ (CFD: $k-\varepsilon$; linia zielona) oraz symulacją *DNS* (CFD: *DNS*; linia czerwona). Porównania dokonano dla trzech profili pokrywających się z lokalizacjami P3, P4 i P5 (rys. 4), czyli 1 mm , 3 mm i 8 mm za wylotem mikro-szczeliny emulsyfikatora. W okolicy mikro-szczeliny (rys. 10a i 10b) możemy zaobserwować, zarówno jakościową jak i ilościową, dość dobrą zgodność wyników eksperymentalnych i numerycznych. Dla profilu położonego 8 mm za szczeliną, różnice pomiędzy prędkością zmierzoną eksperymentalnie i wyznaczoną numerycznie stają się znaczące, niemniej jednak istnieje ich jakościowa zgodność. We wszystkich przypadkach prędkość maksymalna osiągana jest w niedużej odległości od ścianki emulsyfikatora, a w jego centralnej części istnieje dość silny ruch zwrotny (ujemne wartości prędkości).



Rys. 10. Porównanie wyznaczonych eksperymentalnie (PIV) i numerycznie ($k-\varepsilon$ i *DNS*) profili składowej V_x prędkości dla lokalizacji P3 (a), P4 (b) i P5 (c).

4. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza struktury przepływu wykazała, że pole prędkości w badanym mikro-kanale, pomimo wysokiej wartości liczby Reynoldsa równej 6770, jest niemal stacjonarne. Nie zaobserwowano w tym obszarze znaczących fluktuacji prędkości, co jest dowodem na brak w pełni rozwiniętej turbulencji. Strefa silnej recyrkulacji przepływu, występująca kilka milimetrów za wylotem mikro-kanalu, może być uznana za miejsce przejścia laminarno – turbulentnego. Potwierdzają to występujące w tym obszarze fluktuacje prędkości, które zaburzyły symetrię obserwowanego przepływu. Podobne wnioski wyciągnięto z symulacji numerycznych, których wyniki z znacznej mierze pokrywają się z rezultatami eksperymentalnymi. Obliczenia metodą *DNS* pozwoliły wyznaczyć chwilowe pola prędkości, które po wyznaczeniu średnich fluktuacji prędkości dowiodły również, że w mikro-kanale przepływ jest quasi-laminarny, a przejście do turbulencji ma miejsce kilka milimetrów za jego wylotem.

Podziękowania

Niniejsza praca została wykonana w ramach projektu EMMA finansowanego przez Austriackie Ministerstwo Nauki i Edukacji, nr grantu: GZ 45.534/1-VI/6a/2003 CONEX. Wykorzystana do analizy eksperymentalnej technika micro-PIV była rozwijana w ramach europejskiej sieci tematycznej PIVNET2.

Bibliografia

- [1] Brenn G., Emulsions with nanoparticles for new materials, *Scientific Report of EMMA Project*, Graz University of technology, TU Graz
- [2] Blonski S. Korczyk P., Kowalewski T.A., Analysis of turbulence in a micro-channel emulsifier, *Int. J. Thermal Scs* (2007), doi:10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.028
- [3] Kowalewski T.A., Błoński S. Korczyk P., 2006, Turbulent flow in a microchannel, *Proc. of ASME ICNMM2006*, CD-ROM paper 96090, Limerick, Ireland
- [4] M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [5] J.G. Santiago, S.T. Wereley, C.D. Meinhart, D.J. Beebe, R.J. Adrian, A micro particle image velocimetry system, *Exp. Fluids* 25 (1998) 316–319
- [6] Meinhart C.D., Wereley S.T., Gray M.H.B., 2000, Volume illumination for two-dimensional particle image Velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 11, 809-814
- [7] Shinohara K., Sugii Y., Aota A., Hibara A., Tokeshi M., Kitamori T., Okamoto K., 2004. High-speed micro-PIV measurements of transient flow in microfluidic devices, *Measurement Science and Technology*, 15, 1965-1970
- [8] Duke Scientific Corporation, strona internetowa: <http://www.dukescientific.com/>
- [9] Fluent 6, User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, NH, 2002

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF MIXING PROCESS IN MICRO-CHANNEL

Summary:

Turbulent flow of water in a short 0.4mm high micro-channel of an emulsifier is investigated experimentally using a micro-PIV technique and compared with numerical predictions. The micro-flow measurements are based on epi-fluorescence illumination and high-speed imaging. Velocity fields obtained from the measurements and direct numerical simulations indicate that flow turbulization is delayed and develops only at the outlet region of the micro-channel.