

DOMINIK BUKSA  
PAWEŁ MADEJSKI  
MICHAŁ KARCH

# Szybkie prototypowanie dysz wodnych z wykorzystaniem wyników modelowania CFD oraz druku 3D

*W ostatnich latach zwiększa się zainteresowanie metodami szybkiego prototypowania, które wykorzystywane są w różnych gałęziach przemysłu. Prototypy coraz częściej są wykonywane w technologii druku 3D, co wynika głównie ze względnie niskich kosztów opracowania i wytworzenia takiej konstrukcji oraz krótkiego czasu potrzebnego na ich fizyczne wykonanie. Praca przedstawia możliwości zastosowania technik szybkiego prototypowania na przykładzie wodnych dysz napędowych. Wykorzystywane są one głównie w energetyce, np. do produkcji mgły wodnej, w strumienicach czy skraplaczach. Dysze takie umożliwiają formowanie strugi, jej zasięgu czy wydajności w zależności od wymagań projektowych. W celu oceny efektywności dyszy wykorzystane zostaną narzędzia CFD (computational fluid dynamics) oraz druk 3D. Do wytworzenia prototypów dysz użyto drukarki 3D opartej na technologii FDM. Wyniki CFD zweryfikowano z eksperymentem. Przedstawiono analizy dotyczące czterech różnych kształtów dysz i wyjaśniono rozbieżności pomiędzy wynikami wstępnej analizy eksperymentalnej oraz numerycznej. By wskazać niedoskonałości wynikające z druku 3D, wykorzystano skaner 3D, za pomocą którego przedstawiono wewnętrzny przekrój dyszy. Przeprowadzone badania wskazują na znaczący potencjał druku 3D w szybkim prototypowaniu oraz jego skuteczność w tworzeniu funkcjonalnych modeli dla różnych zastosowań inżynierskich.*

Słowa kluczowe: CFD, szybkie prototypowanie, druk 3D, dysze wodne

## 1. WSTĘP

Szybkie prototypowanie to grupa technik stosowanych do tworzenia trójwymiarowego modelu określonego produktu lub części mechanicznej w skali [1]. Obejmuje ona pięć etapów [2]:

1. Stworzenie projektu: za pomocą oprogramowania CAD tworzony jest model 3D obiektu.
2. Przygotowanie danych: przetworzenie modelu CAD do odpowiedniego formatu, zależnego od wybranej technologii.
3. Konfiguracja urządzenia: kalibracja, przygotowanie oraz zapewnienie odpowiedniego materiału wykorzystywanego do budowy obiektu.
4. Budowa prototypu: konstruowanie produktu przez maszynę w określony sposób, np. warstwa po warstwie.
5. Obróbka końcowa: prototypy często wymagają obróbki końcowej, by uzyskać pożądane wykończenie lub właściwości mechaniczne. Proces ten obejmuje wykończenie powierzchni przez szlifowanie, malowanie czy montaż.

W ostatnich latach zwiększa się zainteresowanie metodami szybkiego prototypowania, które znajdują zastosowanie w różnych obszarach, np. w medycynie w celach rekonstrukcyjnych i implantacyjnych. Główne techniki obejmujące szybkie prototypowanie to: stereolitografia (SLA), spiekanie proszków (SLS), osadzanie stopionego materiału (FDM). Prototypy coraz częściej są wykonywane w technologii druku 3D, co związane jest głównie ze względnie niskim kosztem opracowania takiej konstrukcji oraz z szybkością procesu [3]. Ponadto techniki te umożliwiają inżynierom szybką weryfikację wstępną opracowywanego produktu. W związku z tym możliwe jest przetestowanie większej liczby wariantów w określonych ramach czasowych [4].

W zastosowaniach przemysłowych często łączy się metody szybkiego prototypowania z symulacją numeryczną. Gwałtowny rozwój obserwowany jest szczególnie przy procesach projektowania nowych samolotów, gdzie modele CFD są uznawane za klucz do sukcesu. W artykule [5] badano prototypy statku powietrznego

Generic Future Fighter. Opracowano model CFD, za pomocą którego autorzy badali kąty natarcia i kąty ślizgu w przypadku różnych wariantów skrzydeł samolotu. Zastosowanie druku 3D umożliwiło wydrukowanie części wykorzystanych do złożenia tunelu aerodynamicznego oraz obiektu samolotu. Wyniki symulacji numerycznej zostały potwierdzone testami w tunelu aerodynamicznym dla różnych wariantów. Miało to istotne znaczenie ze względu na to, że projekt opierał się na rzeczywistym samolocie GFF zbudowanym w skali, który sterowany jest radiowo. Wykorzystanie szybkiego prototypowania, druku 3D oraz CFD umożliwiło stworzenie skrzydeł samolotu, które są bardziej efektywne i zostaną zainstalowane na tym modelu w rzeczywistości. Szacuje się, że wykonanie całości projektu: części koncepcyjnej, symulacyjnej oraz dokumentacji zajmuje od 6 miesięcy do roku wraz z testami rzeczywistymi w locie. Druk 3D jest częścią procesu walidacyjnego, który wspomaga CFD. Często dobra wizualizacja obliczeń numerycznych obejmuje skomplikowane kształty 3D, których rozpoznanie na wyświetlaczach 2D bywa trudne. Alternatywą jest podejście wykorzystujące druk 3D, za pomocą którego drukowane są obiekty reprezentujące wyniki symulacji, np. rozkłady temperatury na ściankach wewnątrz konstrukcji [6].

W artykule skupiono uwagę na dyszach wodnych. Znajdują one zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu oraz w gospodarstwach domowych. Są to elementy urządzeń złożonych, skomplikowanych, a także sprzętów codziennego użytku. Budowa dysz i procesy, do jakich są używane, zależą od ich przeznaczenia. Najczęściej stosowane są tam, gdzie konieczne jest odpowiednie nakierowanie oraz rozprzodzenie płynu (mycie, odkamienianie, systemy zraszające, chłodzące) [7]. W energetyce wykorzystywane są w turbinach wodnych (regulacja prędkości wirnika) [8], systemach gaśniczych (jako mgła wodna) [9], do chłodzenia natryskowego, hartowania [10], a także w wielu innych rozwiązaniach. Wskazuje się, że dysze dla sektora energetycznego powinny zapewniać łatwość obsługi, prostą instalację i kon-

serwację. Dysze takie znajdują zastosowanie także w OZE, przez co stają się w obecnych czasach szczególnie interesujące. W turbinach wiatrowych służą jako technika do odladzania łopatek zimą, a w fotowoltaice zapewniają równomierne rozłożenie strumienia wody, który usuwa brud bez uszkodzania paneli. Nowoczesne rozwiązania w zakresie systemów magazynowania energii wymagają ścisłej kontroli poziomu wilgotności w przypadku wykorzystywania materiałów litowych. Z tego powodu dysze wodne służą jako natrysk, który wytwarza kropelki rozpylone powietrzem, co zapewnia lepszą kontrolę wilgotności [11].

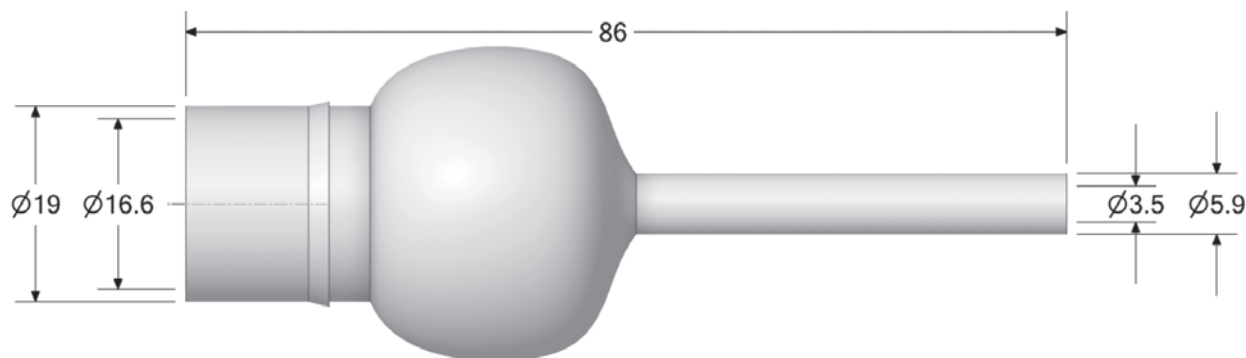
W artykule [12] opisano wykorzystanie dysz wodnych w urządzeniach odpylających, np. do neutralizacji wybuchowych właściwości mieszanin w kontakcie z powietrzem. Dysze rozpylają wodę, dzięki czemu cząstki stałe (pyły) są absorbowane do wewnątrz kropeł wody. Efektywność działania dyszy wodnej zależy od energii zawartej w wypływających kroplach wody, wynikającej z ciśnienia generowanego przez pompę dostarczającą wodę do dyszy. W związku z tym coraz częściej wykorzystywane są dysze wirowe, w których obrotowy ruch wirnika nadaje kroplom energię kinetyczną.

Badania omówione w tym tekście dotyczyły porównania efektywności dysz. W eksperymencie badano zmiany strumienia objętościowego dyszy w zależności od wytworzonego ciśnienia na jej wlocie.

## 2. ANALIZA NUMERYCZNA

### 2.1. Geometria

Dla przedstawionych poniżej dysz (rys. 1–4) zachowano jednakowe kluczowe wymiary, które zaznaczono na rysunku 1. Dysze te różnią się od siebie kształtem, co może mieć istotny wpływ na sposób rozprzestnienia się wody oraz jej prędkość. Kształt i struktura dysz mogą wpływać na to, czy strumień wody będzie bardziej skoncentrowany, czy rozproszony, jak i również na jego zasięg.



Rys. 1. Dysza nr 1



Rys. 2. Dysza nr 2



Rys. 3. Dysza nr 3

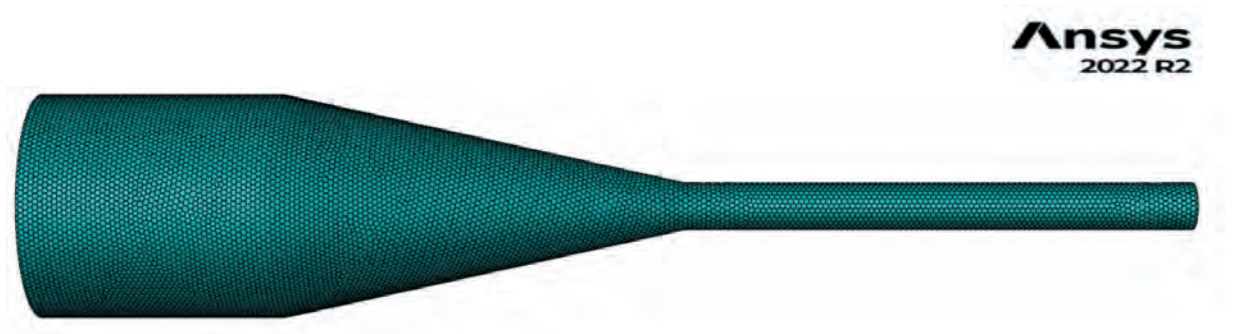


Rys. 4. Dysza nr 4

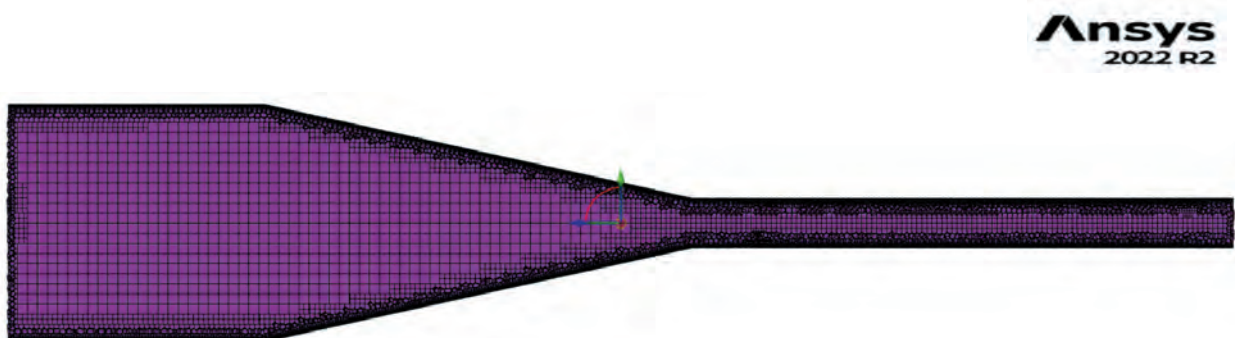
## 2.2. Dyskretyzacja przestrzeni obliczeniowej

Przestrzeń zdyskretyzowano, używając oprogramowania Fluent Meshing. Stworzono siatkę typu Poly-Hexcore Mosaic. Technologia ta łączy ze sobą dowolne rodzaje elementów, a dokładniej opisana jest w pracy [1]. Fundamentalną zaletą użycia takich kształtów jest zmniejszenie ilości elementów siatki – na ogół o 20% do 50%, co przy-

śpiesza obliczenia o średnio 10–50% [2]. Proces konstruowania siatki przebiega odmiennie przy zastosowaniu różnych modeli turbulencji, ponieważ każdy z nich ma własne ograniczenia i wymagania. W modelu bieżącym zastosowano na granicach płyn–ciało stałe warstwy inflacyjne, tak by zachować wartość  $y^+$  mniejszą od 2. Praktykę taką zaleca się dla modelu turbulencji  $k-\epsilon$  realizabile wykorzystującym zaawansowaną funkcją ściany [3].



Rys. 5. Siatka powierzchniowa dyszy

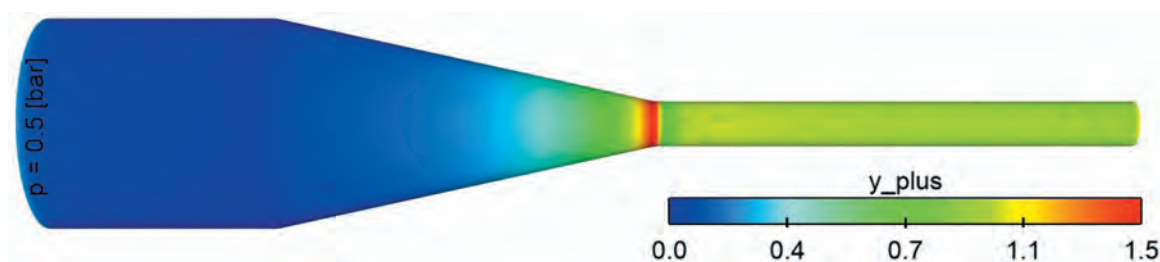


Rys. 6. Siatka objętościowa w przekroju wzdłużnym dyszy

Odpowiednio skonstruowana siatka wymagała zastosowania 12 warstw inflacji o współczynniku wzrostu wynoszącym 0,25. Wysokość pierwszej komórki ustalono na 0,0044 mm. Minimalna długość pojedynczego elementu wyniosła 0,04 mm, natomiast maksymalna 0,70 mm.

Zgodnie z założeniami udało się stworzyć siatkę odpowiednią dla testowanych modeli turbulencji. Maksymalna wartość parametru  $y^+$  wyniosła 1,51 i wystąpiła

w miejscu zwężenia. Zwężenie przekroju poprzecznego geometrii wymusiło zmianę wielkości elementów siatki oraz zamodelowanie płynnego przejścia w tym miejscu, w związku z tym wartość  $y^+$  jest tam największa, ponieważ pierwsza komórka oddaliła się od ścianki. Było to konieczne, by móc zamodelować płynne przejście między kolejnymi elementami siatki. Na zwiększenie wartości  $y^+$  ma również wpływ zmiana prędkości, która powoduje wzrost naprężeń ścinających ściany.



Rys. 7. Wizualizacja wartości  $y^+$  dla skonstruowanej siatki

### 2.3. Jakość siatki

Wykorzystując trzy podstawowe kryteria, które pomagają określić jakość siatki: skośność, ortogonalność i współczynnik kształtu, zoptymalizowano siatkę, tak by spełnić wymagane przez badaczy zalecenia. Średnie wartości tych parametrów w przypadku analizowanej geometrii przedstawiono w tabeli 1.

Zgodnie z podręcznikiem użytkownika [4] uzyskano zadowalające wartości optymalizowanych parametrów. W wygenerowanej siatce stwierdzono bardzo małe różnice między kształtem dowolnej i równobocznej komórki. Spełniono również zalecany warunek, zgodnie

z którym maksymalna wartość skośności nie powinna przekraczać 0,95 [5].

Solvery CFD są najbardziej wydajne dla siatek, które mają wysoki współczynnik ortogonalności [6]. Wartości, które uzyskano, pozwalają na stwierdzenie, że jakość utworzonych elementów jest zadowalająca.

Współczynnik kształtu maksymalną wartość osiągnął w elementach znajdujących się w warstwie przyściennej. Gdyby wartość ta była znacząco większa, mogłoby to wpłynąć na zbieżność obliczeń numerycznych lub na otrzymywane wyniki. Przedstawione wartości oraz testy siatek wskazują, że ich wpływ w przypadku wybranej siatki nie jest obserwowalny.

Tabela 1  
Parametry jakości siatki numerycznej

Wartość	Skośność	Ortogonalność	Współczynnik kształtu
Minimalna	0,00	0,48	1,00
Średnia	0,02	0,98	25,51
Maksymalna	0,51	1,00	126,67

### 2.4. Niezależność rozwiązania

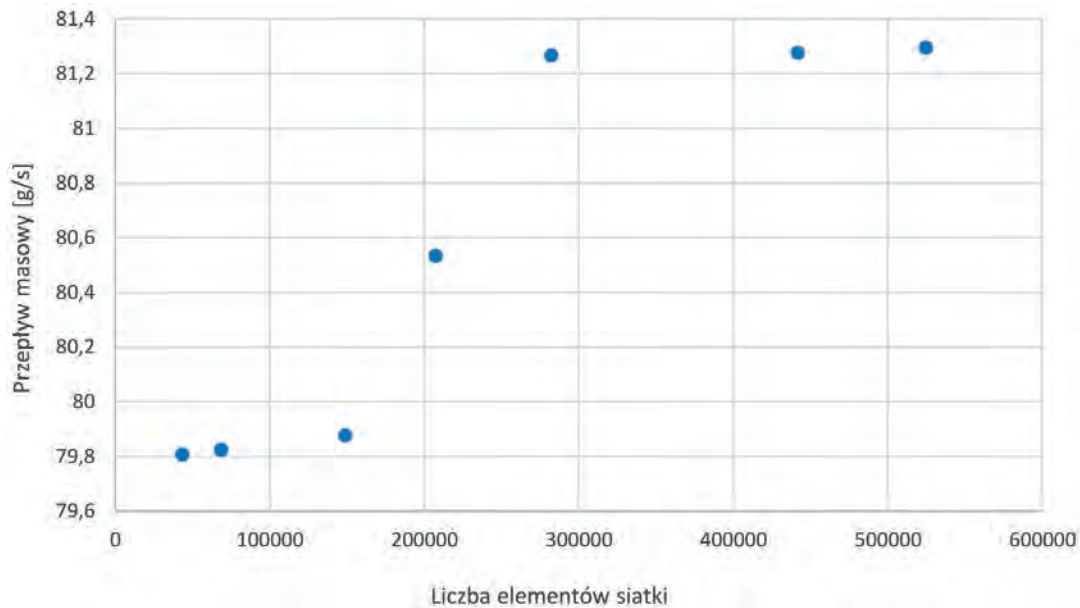
Przed wyborem ostatecznie używanej przy analizie numerycznej siatki zbadano zależność otrzymywanych wyników od liczby jej elementów. Ustalono wcześniej stałą warstwę przyścienną, w której  $y^+_{maks.} = 1,51$ ,  $y^+_{średni} = 0,32$ , by zmianie ulegała wyłącznie liczba elementów związana z ich wielkością, a nie warstwą

przyścienną. Badanie przeprowadzono, analizując natężenie strumienia masowego wody na przekroju wylotowym dyszy, ponieważ w pracy bieżącej ma to fundamentalne znaczenie.

Okazuje się, że wraz ze zwiększaniem liczby elementów siatki rośnie wartość natężenia strumienia objętościowego wody na przekroju wylotowym. Błąd sumowania może mieć istotny wpływ na wyniki, dlatego tak

ważny jest proces walidacji symulacji numerycznych. Znaczących różnic nie stwierdzono przy porównaniu siatki zawierającej 282 096 i więcej elementów. W związku z tym, mając na uwadze koszt obliczeniowy,

zdecydowano się na wybór właśnie tej siatki. Umożliwi to przyspieszenie czasu obliczeń z zachowaniem takiej samej dokładności przez oszczędność zasobów stacji roboczej.



Rys. 8. Zależność natężenia strumienia objętości wody na wylocie z dyszy od liczby elementów siatki

## 2.5. Model turbulencji, warunki brzegowe i ustawienia numeryczne

W związku z tym, że celem symulacji jest zbadanie głównie wydajności dyszy, a w modelu nie zakłada się użycia równania energii czy modelu wielofazowego użyto najbardziej uniwersalnego modelu turbulencji, czyli modelu hybrydowego  $k-\omega$  SST. Model ten opisują równania (1) i (2).

Energia kinetyczna turbulencji  $k$  opisana jest następującym równaniem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b \end{aligned} \quad (1)$$

Natomiast właściwa dyssypacja energii kinetycznej turbulencji  $\omega$  dana jest jako:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_w \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w + S_w + G_{wb} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- $t$  – czas [s],
- $k$  – energia kinetyczna turbulencji [J/kg],
- $x$  – zmienna przestrzenna [m],
- $\rho$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>],
- $u$  – prędkość [m/s],
- $\Gamma_k, \Gamma_w$  – czony modelujące efektywną dyfuzyjność dla  $k$  i  $\omega$  [m<sup>2</sup>/s],
- $G_k$  – generacja energii kinetycznej turbulencji na skutek gradientów prędkości [J/(sm<sup>3</sup>)],
- $Y_k, Y_w$  – dyssypacja  $k$  i  $\omega$  na skutek turbulencji [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>],
- $S_k, S_w$  – czony źródłowe zdefiniowane przez użytkownika [J/(sm<sup>3</sup>)],
- $G_k, G_{wb}$  – generacja energii kinetycznej turbulencji na skutek działającej siły wyporu [J/(sm<sup>3</sup>)].

Dostępne sposoby modelowania członów zawartych w równaniach (1) oraz (2) zaprezentowane są w podręczniku użytkownika Ansys Fluent [7]

Dla modelu założono następujące warunki brzegowe:

- Wlot: warunek oparty na ciśnieniu manometrycznym. Badano następujące wartości: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 bar.
- Wylot: warunek ciśnieniowy z wartością referencyjną nadciśnienia na wylocie 0 Pa.
- Ścianki: założono, że ścianki są doskonale izolowane.

Na potrzeby symulacji bieżącej założono:

- przepływ nieściśliwy, wobec czego użyto solvera opartego na ciśnieniu;
- stan ustalony, przy wyłączonej grawitacji;
- schemat rozwiązania sprzężony (*coupled*);
- dyskretyzację równań zachowania schematami drugiego rzędu;
- przy kontroli stabilności rozwiązania wyłączono pseudokrok czasowy i zastosowano podejście oparte na liczbie Couranta; wskazuje się, że pełna stabilność sięga maksymalnego CFL z zakresu 5–100 [8], w symulacji bieżącej zastosowano wartość 10.

## 2.6. Wyniki analizy numerycznej

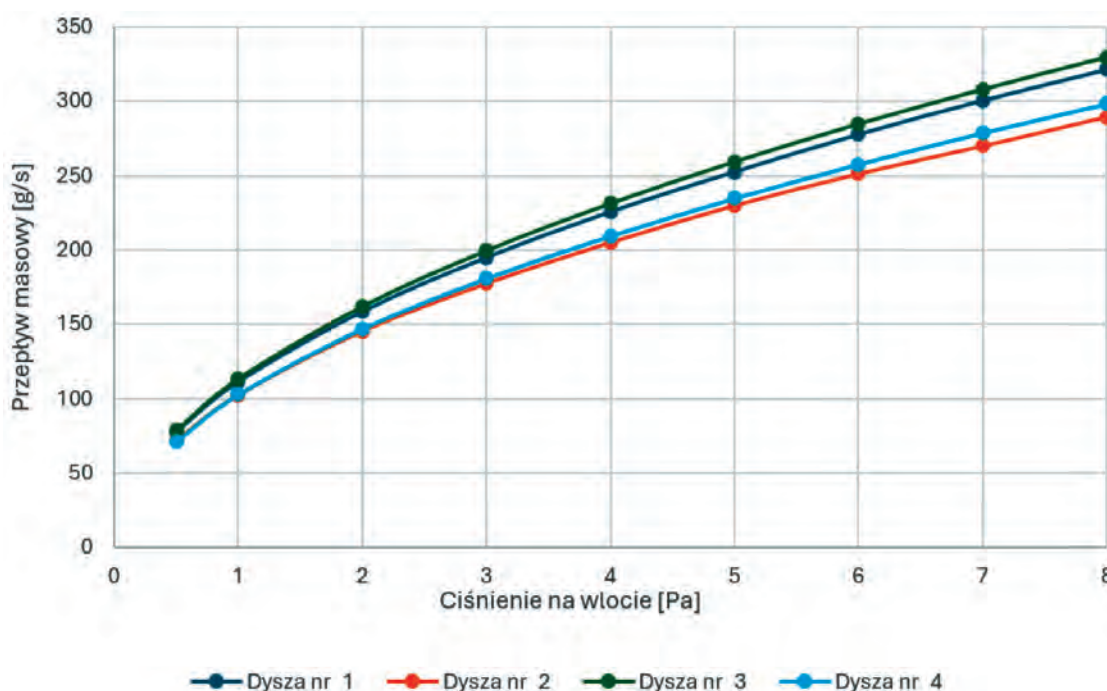
Na rysunku 9 przedstawiono porównanie wyników otrzymanych podczas analizy numerycznej czterech badanych dysz. Zgodnie z tym, co weryfikowane będzie w rzeczywistości, uwagę skupiono na przepływie masowym w przekroju wylotowym z dyszy.

Okazuje się, że dysza nr 3 jest najbardziej efektywna. Przy takich samych wartościach ciśnienia na wlocie wytworzyła ona największy strumień masy wody. Największe opory przepływu wywarła geometria nr 2, w której natężenie przepływu czynnika było najmniejsze. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia na wlocie różnice między analizowanymi wariantami dysz stają się coraz większe. Sytuację taką najlepiej zaobser-

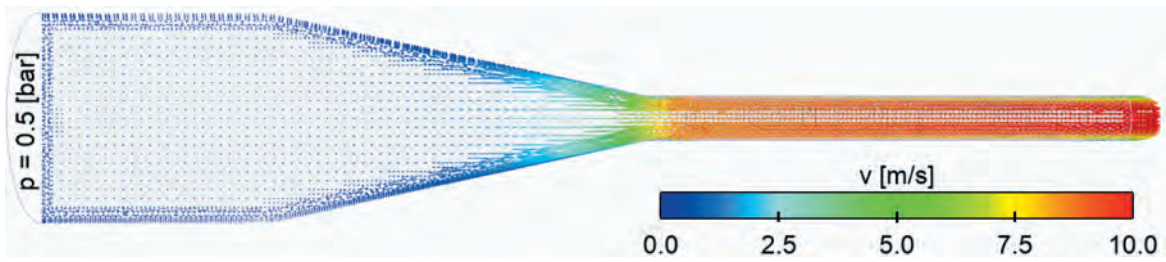
wować, porównując pary wariantów: 1 z 3 oraz 2 z 4. Przy ciśnieniu wlotowym 0,5 bara przepływy masowe dla omawianych par są niemalże tożsame. Kolejno każda modyfikacja, która polegała na wywarciu większego ciśnienia na wlocie do układu, powoduje, że przepływ w jednej z dysz zaczyna coraz intensywniej odstawać od przepływu w drugiej.

W kolejnych krokach analiza numeryczna przeprowadzona będzie dla wariantu nr 3 dyszy, której wyniki okazały się najbardziej obiecujące. Przedstawiana wizualizacja dotyczyć będzie przypadków, w których ciśnienie na wlocie wynosiło 0,5 bara i 8 barów. Jeżeli okaże się, że nie pojawią się interesujące różnice pomiędzy wariantami, to przedstawiony zostanie tylko jeden (ciekawszy) przypadek.

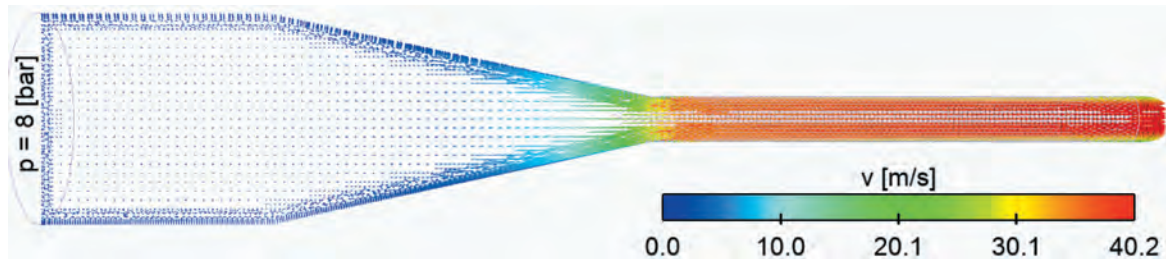
Ze względu na to, że omawiana geometria jest dosyć prosta, a czynnikiem roboczym jest woda, której gęstość jest znacząco wysoka, nie stwierdzono występowania intensywnych wirów wstecznych w przepływie (rys. 10 i 11), które miałyby wpływ na kształtowanie się strugi. Skonstruowana geometria powoduje niemalże idealne ułożenie się wektorów prędkości, które w zintensyfikowanej ilości widoczne są głównie przy ściankach. Cząsteczki wody ślizgają się po ścianach, ponieważ zmiana przekroju nie jest gwałtowna, lecz stopniowa. Wymuszenie aż szesnastokrotnie większego spiętrzenia na wlocie spowodowało maksymalnie czterokrotny wzrost prędkości przepływu.



Rys. 9. Porównanie wyników CFD dotyczących analizowanych kształtów dysz



Rys. 10. Wektory prędkości dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 0,5$  bara



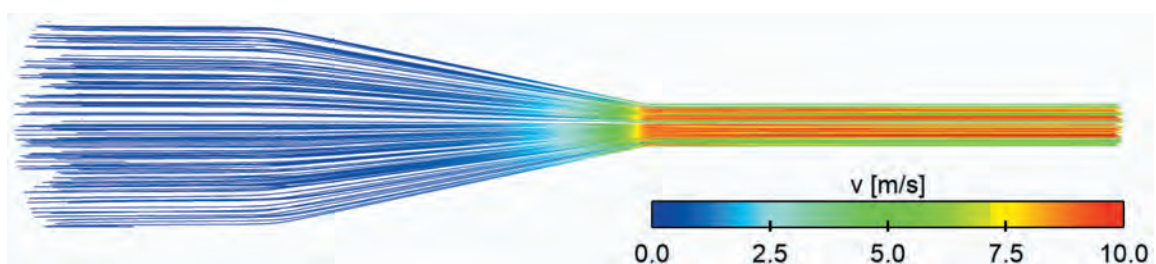
Rys. 11. Wektory prędkości dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów

Uwaga: Zwiększona liczba wektorów przy ściankach związana jest wyłącznie z numeryką. W obszarze tym występuje warstwa przyścienna, wobec czego elementy są gęściej upakowane.

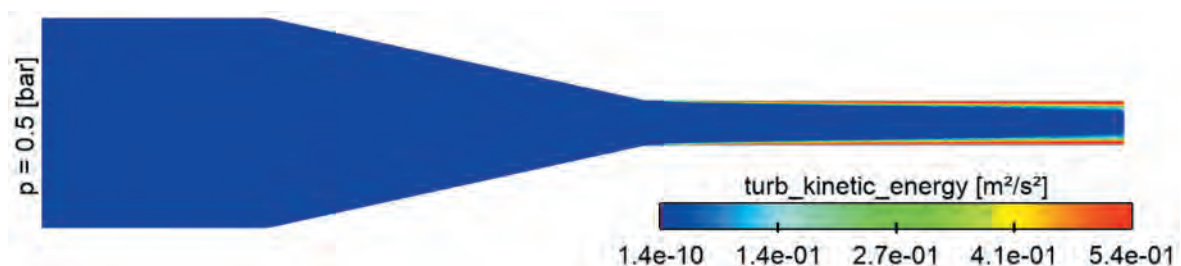
W celu poparcia wniosków wyciągniętych podczas omawiania wektorów prędkości w przekroju wzdłużnym przeanalizowano również linie prądu wykreślone w całej objętości dyszy (rys. 12). Stwierdzono, że struga jest bardzo dobrze formowana, a odpowiednio dobrane, łagodne zwężenie oraz symetria osiowa dyszy eliminują powstawanie jakichkolwiek recyrkulacji. Jest to zjawisko pożądane, ponieważ wystąpienie stref recyrkulacji spowalniałoby wypływ płynu przez kanał wylotowy. Poza wahaniami

w wartościach prędkości, które omówiono przy analizie rysunku 13, nie odnotowano istotnych różnic w kształtowaniu się strugi przy ciśnieniu wlotowym 8 barów.

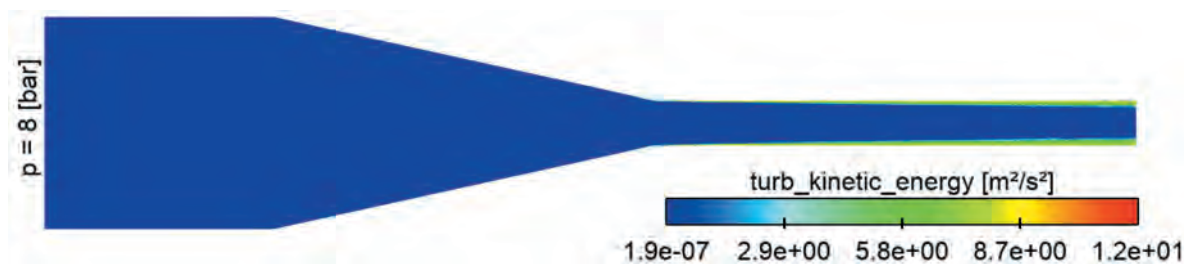
Intensyfikacja energii kinetycznej turbulencji następuje głównie w części wylotowej dyszy, która odpowiedzialna jest za wyprostowanie/uformowanie strugi. Z pewnością związane jest to z gwałtownym wzrostem prędkości płynu, który nastąpił właśnie w tym miejscu. Nagłe zwężenie przekroju poprzecznego wywołało chaotyczny ruch cząsteczek, które zderzając się ze sobą, zwiększyły powstałe wiry i turbulencje. Przy spiętrzeniu 8 barów wzrost energii kinetycznej turbulencji jest nawet ponad dwudziestodwukrotnie większy.



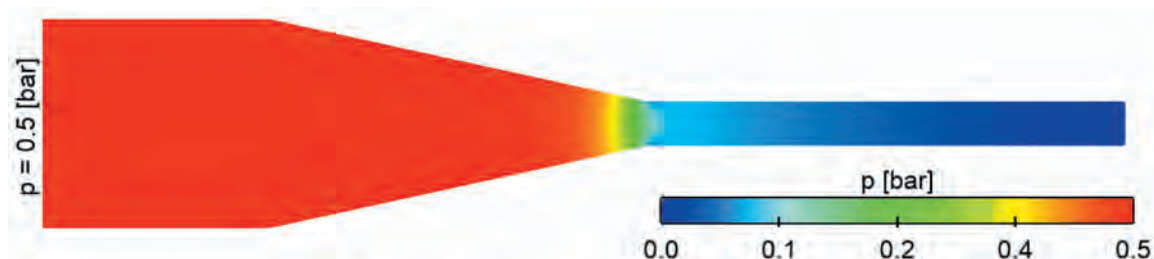
Rys. 12. Linie prądu dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 0,5$  bara



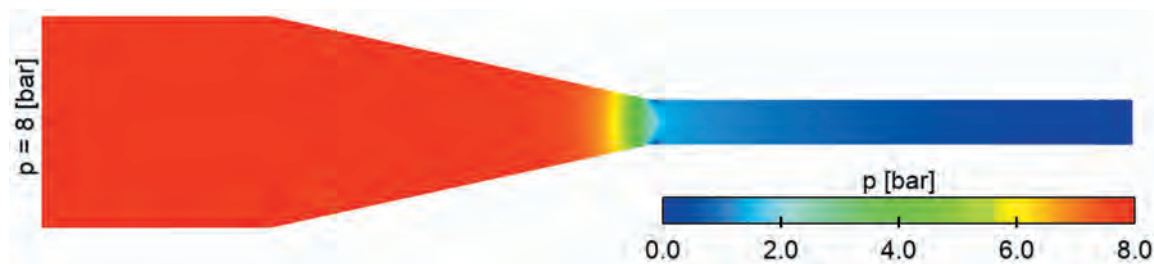
Rys. 13. Energia kinetyczna turbulencji dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 0,5$  bara



Rys. 14. Energia kinetyczna turbulencji dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów



Rys. 15. Spadek ciśnienia statycznego dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 0,5$  bara



Rys. 16. Spadek ciśnienia statycznego dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów

Każdorazowe zwężenie przekroju poprzecznego przepływu, które wywołało zwiększenie prędkości, powoduje również spadek ciśnienia statycznego. Proces ten związany jest silnie ze ściśliwością płynu, która w tym przypadku nie występuje. W związku z tym objętość płynu która przepływała przez przekrój początkowy, jest równa objętości, która przepływa przez zwężenie. Przepływająca woda wywiera mniejszy nacisk na ścianki dyszy, ponieważ kierunek strugi skupiony jest poziomo ku wylotowi.

Zjawisko to jest zgodne z równaniem Bernoulliego (1), które opisuje zachowanie gęstości energii całkowitej na linii prądu. Równanie Bernoulliego w formie:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{const} \quad (1)$$

wskazuje, że suma ciśnienia statycznego ( $p$ ), ciśnienia dynamicznego ( $1/2\rho v^2$ ) oraz ciśnienia hydrostatycznego ( $\rho gh$ ) wzdłuż linii prądu jest stała w przypadku płynu nieściśliwego i nielepkiego. Traktując równanie jako przybliżenie (pomijając siły lepkie), w miarę jak przekrój poprzeczny przepływu zwęża się, prędkość przepływu  $v$  wzrasta (zgodnie z równaniem ciągłości), co prowadzi

do zwiększenia ciśnienia dynamicznego. W związku z tym, że suma gęstości energii całkowitej pozostaje stała, wzrost ciśnienia dynamicznego skutkuje spadkiem ciśnienia statycznego.

Rozkład pola prędkości (rys. 17) jest w pełni zgodny z przedstawionym na rysunku 16 rozkładem spadku ciśnienia w dyszy. Ze względu na to, że kanał dyszy jest prosty, nie zawiera skomplikowanych elementów i występuje w nim pełna symetria, to również pole prędkości jest symetryczne. Z analizy przekrojów poprzecznych pod kątem zmian prędkości wynika, że nie występują duże różnice. Najszybciej płyn porusza się środkiem symetrii, lecz różnica między środkiem a punktami w pobliżu ściany nie przekracza 12,5%.

Aby porównać różnice w wynikach uzyskanych dla różnych wariantów, zdecydowano się przedstawić wizualizację dyszy nr 1, której przepływ masowy był najbardziej zbliżony do przyprływu w dyszy wcześniej omówionej.

Wykreślając linie prądu w wariantcie nr 1 dyszy, stwierdzono występowanie istotnych różnic w charakterze hydrodynamicznym przepływu. Okazuje się, że już przy ciśnieniu wlotowym 0,5 barów pojawiają się

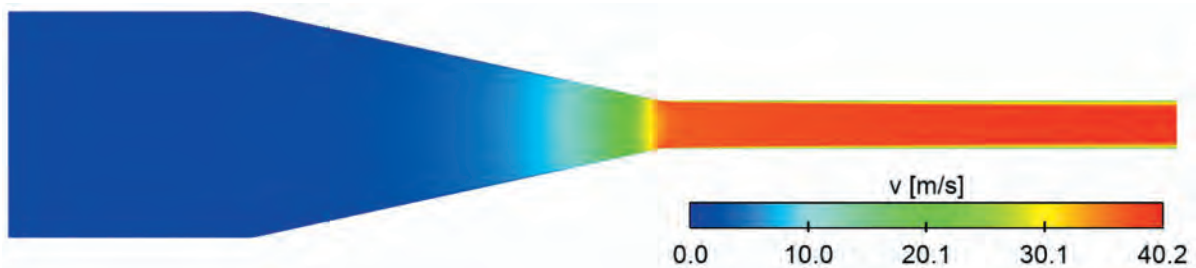


znaczące wiry wsteczne. Ponadto wraz ze zwiększeniem ciśnienia do 8 barów stają się one coraz bardziej intensywne. Struga ślizga się wzdłuż ścianki i wraca do głównego nurtu przepływu. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że występują też obszary, w których cząsteczki wpadają w wir i nie wracają do głównego ciągu, a zawirowana struga blokuje przepływ główny.

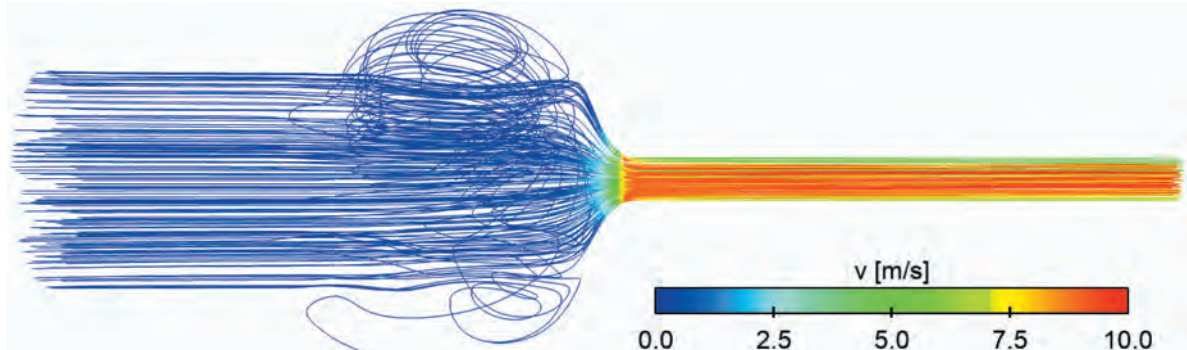
Wykreślenie wektorów prędkości potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia, a dodatkowo pokazuje, że wiry obecne są nie tylko w rozszerzonej części geometrii, lecz również w strudze głównej. Stwierdzony wniosek jest całkowicie przeciwny wobec analizy wariantu nr 3 dyszy (rys. 12). Ze względu na złożoność przepływu i chaotyczny charakter wirów nie jest on w pełni syme-

tryczny. Objawia się to tym, że podczas zmiany przekroju poprzecznego przepływu cząsteczki uderzają nierównomiernie w zwężone ścianki kanału wylotowego. Może to powodować jego uszkodzenia, szczególnie w przypadku dużych wartości prędkości.

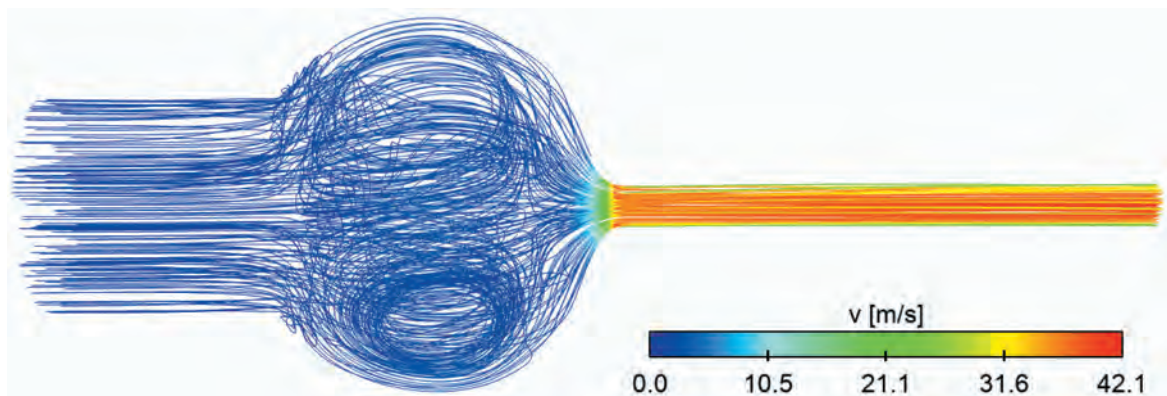
Intensyfikacja energii kinetycznej turbulencji następuje nie tylko w kanale wylotowym w pobliżu ścianek, w które uderzają cząsteczki wody, lecz także w geometrycznym środku kanału. Zjawiska tego nie zaobserwowano przy wizualizacjach dotyczących dyszy nr 3 (rys. 14). Ponadto analizowana dysza odznacza się maksymalnym wzrostem energii kinetycznej turbulencji o aż 25% w porównaniu z wariantem nr 3, co spowodowane jest specyficzną geometrią.



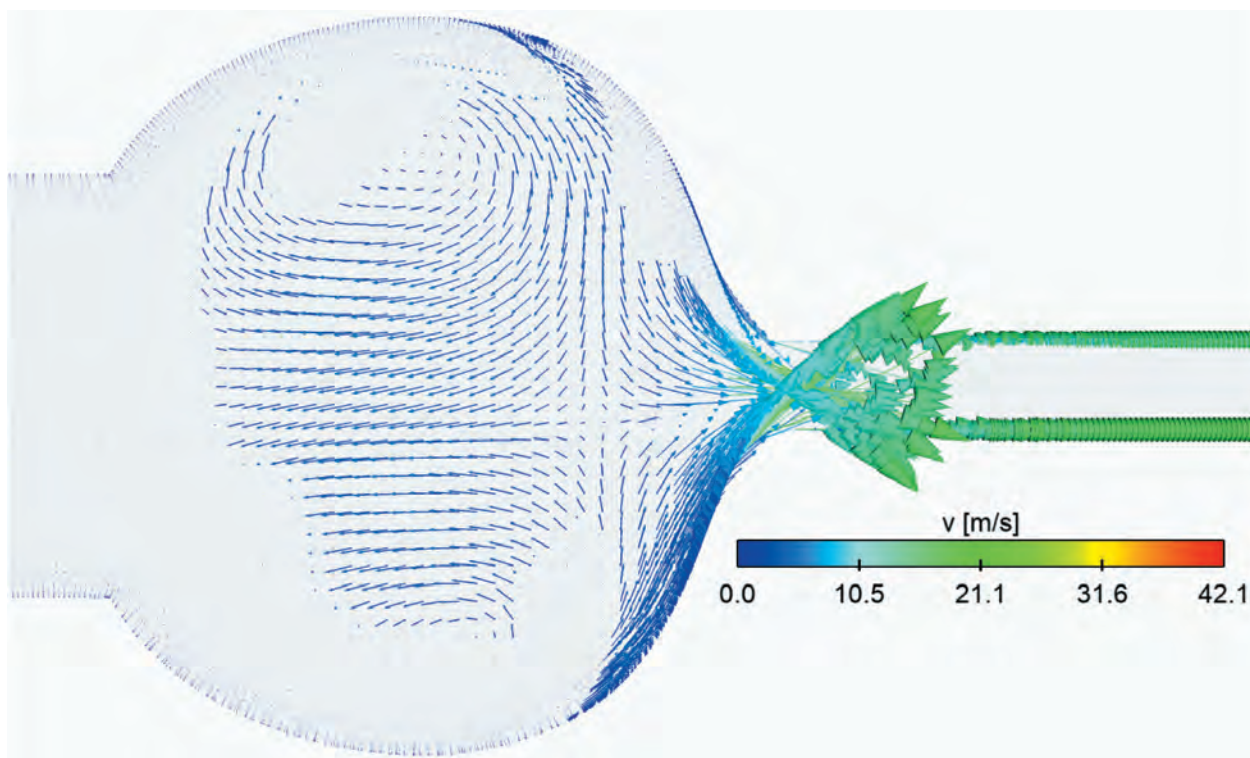
Rys. 17. Rozkład pola prędkości w dyszy,  $p = 8$  barów



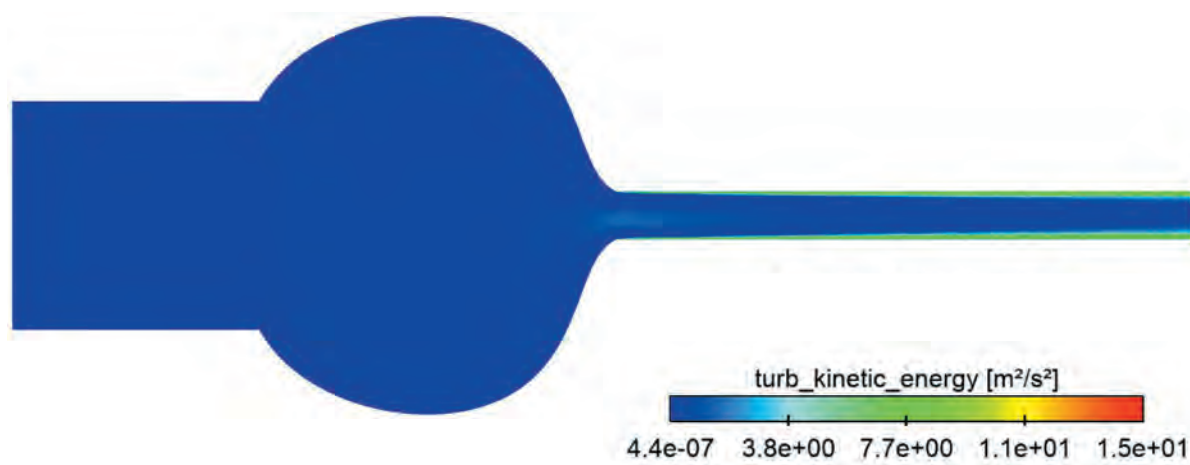
Rys. 18. Linie prądu dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 0,5$  bara



Rys. 19. Linie prądu dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów



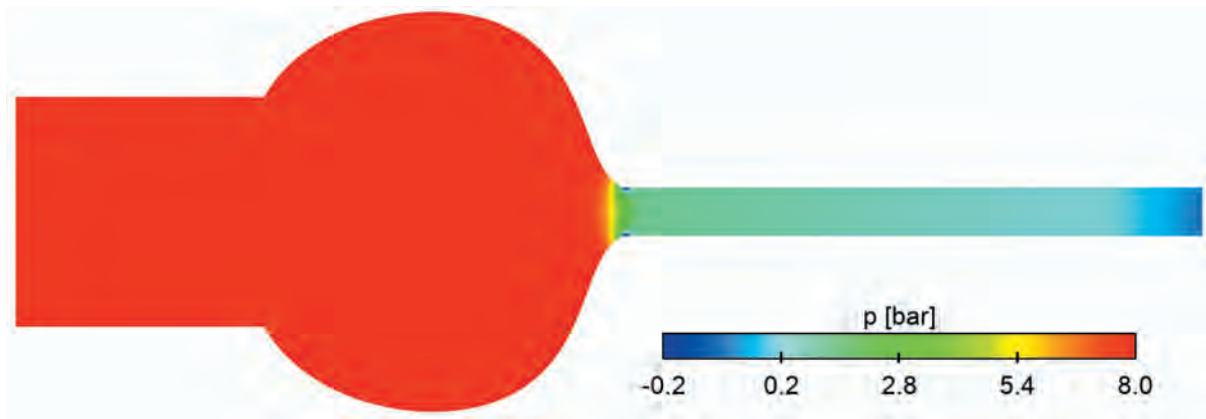
Rys. 20. Wektory prędkości dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów



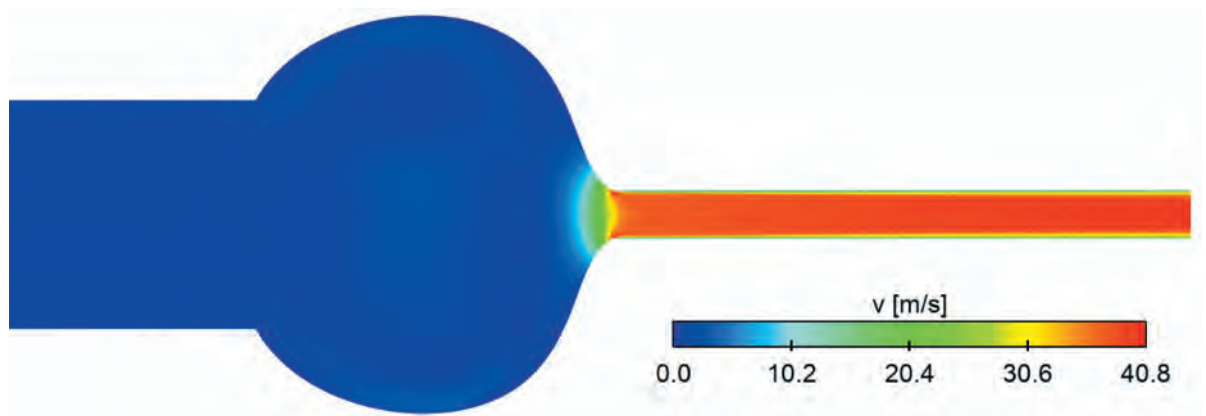
Rys. 21. Energia kinetyczna turbulencji dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów

Rozszerzenie się przekroju poprzecznego nie spowodowało znaczących zmian ciśnienia statycznego, które w przybliżeniu pozostało stałe. W miejscu zmiany przekroju w kanale wylotowym nastąpił gwałtowny spadek ciśnienia z 8 barów do 2,5 bara. Widoczne są też dwie niebieskie strefy, w których stwierdzono występowanie lekkiego podciśnienia. Sugeruje to możliwość powstania zjawiska kawitacji w tym miejscu. W związku z tym postanowiono przeanalizować rozkład pola prędkości dla tego wariantu.

Analizując pole prędkości, stwierdzono, że nie jest ono jednorodne i symetryczne. Okazuje się, że w przekroju poprzecznym wartości prędkości zmieniają nawet kilkukrotnie (rys. 23). Ponadto w miejscu, gdzie stwierdzono występowanie podciśnienia (rys. 22), następuje oderwanie się strugi od zwężającej się krawędzi, czego powodem jest duża wartość prędkości w tym miejscu (ok. 35 m/s) oraz specyfika geometrii, w której przejście nie jest gładko zaprojektowane. W związku z tym ruch strugi w tym obszarze charakteryzuje się złożonością.



Rys. 22. Spadek ciśnienia statycznego dla przekroju wzdłużnego dyszy,  $p = 8$  barów



Rys. 23. Rozkład pola prędkości w dyszy,  $p = 8$  barów

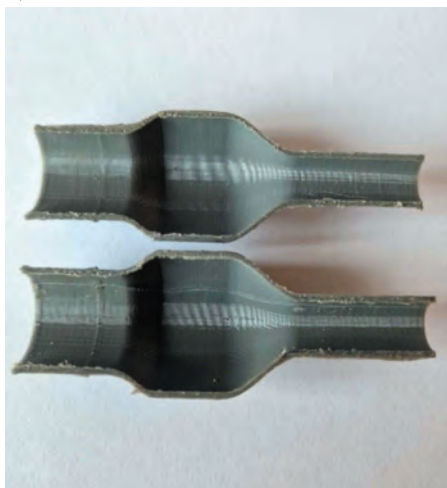
### 3. WERYFIKACJA MODELU

#### 3.1. Druk 3D

W celu weryfikacji opracowanych modeli dysz w analizie numerycznej zdecydowano się na stworzenie ich rzeczywistych prototypów. Z uwagi na dostępność aparatury, niskie koszty oraz krótki czas budowy do rea-

lizacji tego zadania wybrano technologię druku 3D. Wykorzystano drukarkę 3D Original Prusa i3, która operuje w technologii druku FDM. Proces tworzenia trójwymiarowych obiektów polega na topieniu i nakładaniu cienkich warstw termoplastycznego filamentu przez ruchomą dyszę. W przekroju wzdłużnym (rys. 24) przedstawiono jedną z wybranych dysz, tak by móc ujrzeć jej niedoskonałości względem modelu idealnego.

a)



b)

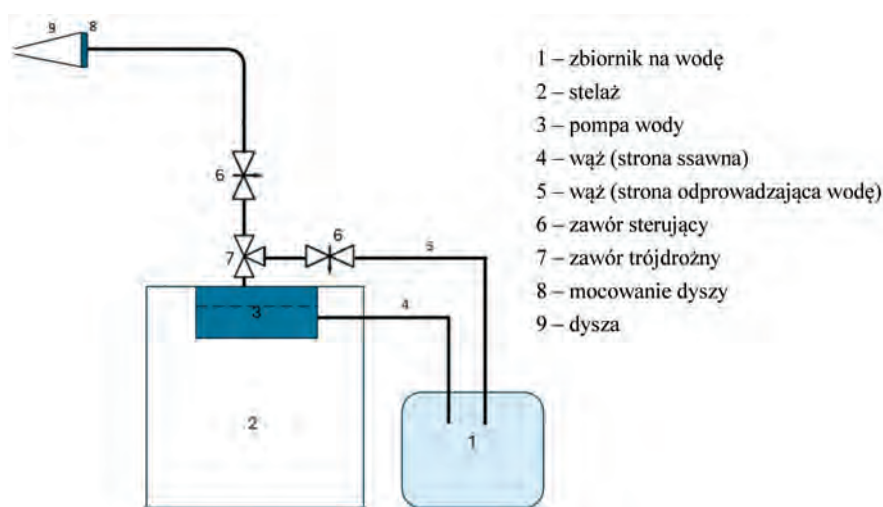


Rys. 24. Przekrój wzdłużny wydrukowanej dyszy: a) zdjęcie; b) skan 3D

Dysze wydrukowane w technologii FDM charakteryzują się warstwową strukturą, która wpływa na chropowatość powierzchni wewnętrznych. Ta warstwowość może prowadzić do zwiększonego oporu przepływu, a co za tym idzie, do większych strat energii. Dodatkowo mogą występować drobne nieciągłości i niedokładności wynikające z ograniczonej precyzji drukarki oraz właściwości samego filamentu. Te czynniki sprawiają, że przepływ w rzeczywistej dyszy może różnić się od przepływu w idealnym modelu CFD, co należy uwzględnić w analizach i interpretacji wyników.

### 3.2. Eksperyment laboratoryjny

Przy wykorzystaniu prostego układu pomiarowego, składającego się z pompy wodnej, zbiornika wody, węża



Rys. 25. Schemat stanowiska pomiarowego

Wartości przepływu masowego wody otrzymane w przeprowadzonym eksperymencie przedstawia rysunek 26.

Przeprowadzenie eksperymentu wskazuje zgodnie z wynikami analizy numerycznej, że dysza nr 3 jest bardziej efektywna w porównaniu z dyszą nr 1. Stwierdzone różnice w przepływie masowym dla obu dysz mieszczą się w zakresie 2,5–26,8%. Charakter wzrostu przepływu masowego przy wzroście ciśnienia dla dyszy nr 1 jest bardziej intensywny.

Przy porównaniu wyników eksperymentu z CFD (rys. 27) dla dyszy nr 1 stwierdzono różnice w wartości przepływu masowego z zakresu 13,1–32,3%, co przełożyło się na różnice od 10,1 g/s do 77,1 g/s. Zaobserwowano, że w przybliżeniu charakter funkcji przepływu masowego od ciśnienia wlotowego zarówno dla eksperymentu, jak i CFD jest podobny.

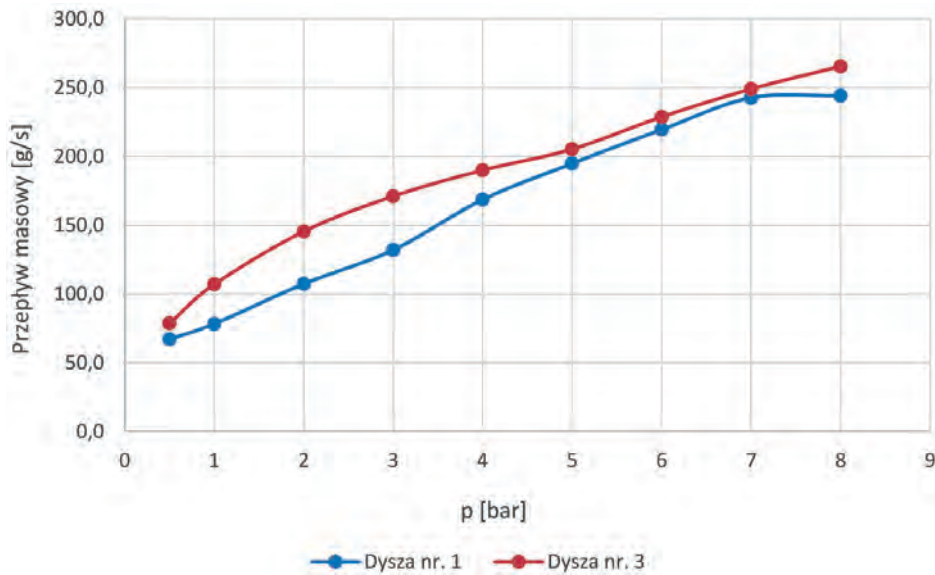
Analizując wyniki porównawcze z badania dyszy nr 3 (rys. 28), również stwierdzono istotne rozbieżności. Pomiarzy wykonane dla najmniejszych wartości ciśnień wlotowych, tj. 0,5–1,0 bara, są wysoce zgodne (błąd względny

ogrodowego oraz armatury (rys. 25), przeprowadzono wstępną weryfikację otrzymanych wyników symulacji CFD dla dwóch wariantów dysz.

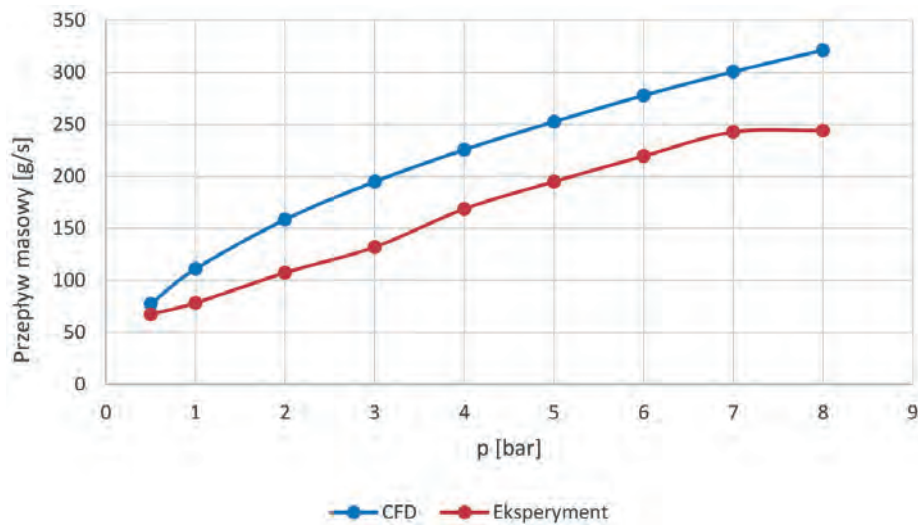
Opis eksperymentu: badanie polegało na napełnianiu zbiornika o pojemności 15 l wodą przy różnej wartości ciśnienia wytwarzanych przez pompę. Do węża podłączonego do armatury pompy montowano różne warianty dysz. Za pomocą manometru, który umieszczono na przewodzie tłocznym, mierzono wytwarzane przez pompę ciśnienie. Testowano zakres roboczy pompy wynoszący od 0,5 bara do 8 barów. Za pomocą stopera mierzono czas, który potrzebny był każdej z dysz do napełnienia zbiornika, a kolejno zbiornik z wodą umieszczano na wadze laboratoryjnej. Mając do dyspozycji czas napełniania oraz masę wody w zbiorniku, obliczono przepływ masowy wody [g/s], który porównano do wyników uzyskanych z CFD.

maksymalny wyniósł 5,5%). Natomiast wraz ze wzrostem ciśnienia wlotowego pomiary są coraz mniej zgodne z wynikami analizy numerycznej, zwiększając maksymalny błąd względny aż do 20,8%. Przypuszcza się, że przyczyną mogą być pulsacje wytwarzane przez pompę, które utrudniały dokładny odczyt wartości ciśnienia kontrolowanego za pomocą manometru. Im większe ciśnienie, tym trudniej było utrzymać w przybliżeniu stałą wartość. Powstałe różnice przełożyły się na niezgodności przepływu masowego z zakresu 2,6–64,2 g/s, co jest wynikiem bardziej zgodnym niż w przypadku dyszy nr 1.

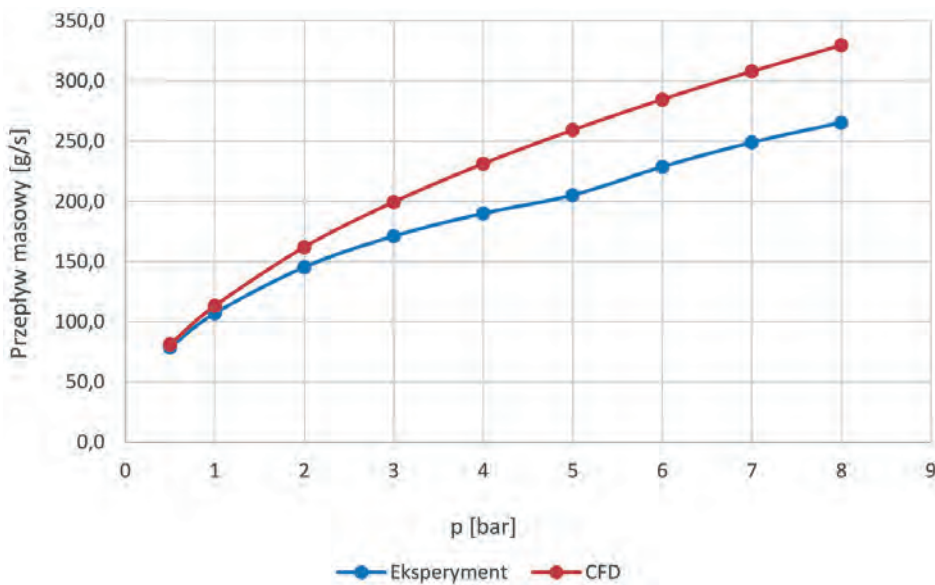
Warto zaznaczyć, że wyniki eksperymentalne są pomiarami wstępnymi. Wpływ na stwierdzone dysproporcje mogły mieć: czynnik ludzki, niedokładność odczytu ciśnienia z manometru oraz uproszczenia numeryczne. W symulacji założono brak całości armatury oraz idealnie gładkie ścianki. W rzeczywistości obecna armatura z pewnością przełożyła się na wystąpienie oporów w przepływie, co może tłumaczyć mniejszą efektywność dysz w testach eksperymentalnych.



Rys. 26. Porównanie dwóch wariantów dyszy. Wyniki eksperymentalne



Rys. 27. Porównanie wyników eksperymentu i CFD dla dyszy nr 1



Rys. 28. Porównanie wyników eksperymentu i CFD dla dyszy nr 3

#### 4. WNIOSKI

- Szybkie prototypowanie w połączeniu z symulacją numeryczną odgrywa kluczową rolę w projektowaniu nowych technologii i produktów.
- Druk 3D może być z powodzeniem wykorzystywany do weryfikacji modeli CFD.
- Wykorzystanie druku 3D prowadzi do oszczędności czasu, kosztów i zwiększenia efektywności procesu projektowania.
- Wyniki CFD dla najmniejszych wartości ciśnienia, tj. 0,5 i 1 bara, są najbardziej zgodne z eksperymentem. Dla dyszy nr 3 błąd względny między analizami dla tych wartości ciśnienia wyniósł do 5,5%.
- Dysza nr 3 w analizie eksperymentalnej oraz CFD wykazała się największą efektywnością.
- Maksymalna różnica wartości natężenia strumienia wody między wynikami analizy numerycznej a eksperymentalnymi wyniosła 77,1 g/s, co stanowi różnicę prawie 32,3%. Rozbieżność taka wystąpiła przy analizie dyszy nr 1, przy ciśnieniu 8 barów (rys. 26).
- Druk FDM do budowy wstępnych prototypów dysz wodnych wydaje się wystarczająco precyzyjny. Na uwagę należy jednak mieć to, że warstwowa struktura, która powstaje podczas druku, prowadzi do zwiększonego oporu przepływu, a co za tym idzie – do większych strat energii.
- W bardziej zaawansowanych analizach należałoby rozważyć i porównać ze sobą druki FDM oraz SLA. Przewiduje się, że zastosowanie SLA pozwoli na uzyskanie wyższej rozdzielczości druku oraz mniejszej chropowatości materiału, co powinno przełożyć się na większą powtarzalność uzyskiwanych wyników.
- Konieczne są dalsze prace nad podjętym zagadnieniem, szczególnie w celu udoskonalenia układu pomiarowego.
- Pompa wody generuje drgania i pulsacje, które negatywnie wpływają na dokładność odczytów wartości ciśnienia z manometru, co z pewnością przekłada się na otrzymywane w eksperymencie wyniki pomiarów.
- Im wyższe ciśnienie wytwarzane przez pompę, tym silniejsze generowane przez nią drgania, co może tłumaczyć większe rozbieżności wyników przy wyższych wartościach ciśnienia.
- Z uwagi na podziałkę manometru oraz drgania, które wystąpiły podczas wykonywania doświadczenia, różnice w wartości ciśnienia między modelem CFD a eksperymentem mogą wynosić  $\pm 0,1$  bara.
- Wyniki eksperymentalne są wyłącznie pomiarami wstępnymi. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że niezbędne jest rozbudowanie stanowiska pomiarowego, by móc dokładniej kontrolować wartość ciśnienia wytwarzanego przez pompę wody.
- Zmodernizowane stanowisko pomiarowe powinno uwzględniać zainstalowanie przetworników ciśnienia, falowników oraz przepływomierza. Pozwoli to na bardziej wiarygodną ocenę zgodności symulacji CFD oraz porównanie różnych technik druku 3D.

*Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” w AGH.*

#### Literatura

- [1] Davis R.: *What is Rapid Prototyping? Techniques, Software, Examples and Advantages – The Engineering Projects*. <https://www.theengineeringprojects.com/2021/05/what-is-rapid-prototyping-techniques-software-examples-and-advantages.html> [5.04.2024].
- [2] Schlick J.: *What is Rapid Prototyping: Process, Stages, Types and Tools – TechniWaterjet*. <https://www.techniwaterjet.com/what-is-rapid-prototyping-process-stages-types-and-tools/> [5.04.2024].
- [3] Laska-Leśniewicz A.: *Wykorzystanie metod szybkiego prototypowania (rapid prototyping) w nowoczesnej medycynie*. Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny Instytut Inżynierii Materiałowej, 2017.
- [4] Markforged: *Understanding Rapid Prototyping with 3D Printing*. <https://markforged.com/resources/blog/understanding-rapid-prototyping-with-3d-printing> [7.04.2024].
- [5] Larsson R., Ringertz U., Lundström D., Sobron A.: *Rapid prototyping in aircraft design using CFD, wind tunnel and flight testing*, ICAS 2022 Congress, Stockholm 2022.
- [6] Takeda H., Ohtake Y., Suzuki H.: *3D printing CFD simulation results using structural mechanics*. Journal of Computational Design and Engineering 2020, 7(3): 287–293. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa024>.
- [7] Industrie-network: *Dysze wodne do Spraylab – Industrie Network*. <https://www.industrie-network.com/dysze-wodne-do-spraylab/> [12.04.2024].
- [8] SICK: *Nozzle regulation in a water turbine – Hydropower*. <https://www.sick.com/pl/en/industries/energy/renewables/hydropower/nozzle-regulation-in-a-water-turbine/c/p675075power/nozzle-regulation-in-a-water-turbine/c/p675075> [14.05.2024].
- [9] Synapo: *Dysze mgłowe – charakterystyka, zastosowanie i zasady działania*. <https://synapo.pl/do-czego-sluzza-dysze-mglowe/> [19.05.2024].
- [10] Spraying Systems Europe: *Why spray nozzles are essential for a performant cooling process*. <https://www.spray.com/en-eu/blog/why-spray-nozzles-are-essential-for-a-performant-cooling-process> [21.05.2024].
- [11] Lechler: *Spray Nozzles for The Energy Industry*. <https://www.lechlerusa.com/en/markets/the-energy-industry> [24.05.2024].
- [12] Prostański D., Jedziniak M.: *Rozwój systemów zwalczania zagrożeń pyłowych*. Maszyny Górnicze 2013, 2: 87–98.

- [13] Buksa D.: *Analiza numeryczna konwekcji wymuszonej nanofłynu srebra w kanale kołowym*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2023 [praca inżynierska].
- [14] Zore K., Parkhi G., Sasanapuri B., Varghese A.: *Ansys Mosaic Poly-Hexcore Mesh For High-Lift Aircraft Configuration*, 21<sup>st</sup> Annual CFD Symposium, Bangalore 2019.
- [15] Wimshurst A.: *[CFD] Enhanced Wall Functions in ANSYS Fluent*. [https://www.youtube.com/watch?v=h5OIFpu0LAM&ab\\_channel=FluidMechanics101](https://www.youtube.com/watch?v=h5OIFpu0LAM&ab_channel=FluidMechanics101) [12.12.2023].
- [16] ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide – 6.2.2 Mesh Quality. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm> [12.05.2024].
- [17] Jurkowski S., Janisz K.: *Analiza wpływu parametrów siatki obliczeniowej na wynik symulacji przepływomierza*. *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 2019, 235, 12. <http://ojs.inw-spatium.pl/index.php/Autobusy/article/view/997> [4.11.2022].
- [18] Symkom: *ANSYS Fluent Mosaic – nowa technologia generacji siatki zawierająca elementy hexahedralne i polihedralne*. <https://symkom.pl/ansys-fluent-mosaic/> [18.06.2022].
- [19] Ansys Fluent Theory Guide. <http://www.ansys.com> [18.06.2022].
- [20] Kryś M., Pawłucki M.: *CFD dla inżynierów. Praktyczne ćwiczenia na przykładzie systemu ANSYS Fluent*. Helion, Gliwice 2020.

*mgr inż. DOMINIK BUKSA*  
*Instytut Mechaniki Górotworu PAN*  
*ul. W. Reymonta 27, 30-059 Kraków*  
*dominik.buksa@imgpan.pl*

*dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI, prof. AGH*  
*dr inż. MICHAŁ KARCH*  
*Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki*  
*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza*  
*al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*  
*{madejski, karch}@agh.edu.pl*