



Mechaniczne mieszanie w procesach technologicznych – eksperymentalna weryfikacja prototypowania kształtu wirnika

Anna MŁYNARCZYKOWSKA¹⁾

¹⁾ PhD; Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering and Resource Management, AGH University of Krakow, Mickiewicza 30, Krakow, Poland; ORCID: 0000-0001-8072-5113, email: mindziu@agh.edu.pl

<http://doi.org/10.29227/IM-2025-01-23>

Submission date: 15-05-2025 | Review date: 28-06-2025

Abstrakt

Mieszanie mechaniczne jest powszechnym procesem w systemach technologicznych w wielu gałęziach przemysłu. Jest to kluczowa operacja w wielu systemach inżynierskich, obejmująca reakcje chemiczne, dyspersję gazów w cieczach, tworzenie zawiesin i mieszanin oraz zapobieganie agregacji osadów. Ten pozornie prosty proces zależy od właściwości fizycznych i chemicznych mieszanych substancji, geometrii zbiornika i wirnika oraz warunków hydrodynamicznych generowanych podczas pracy mieszadła.

Niniejszy artykuł przedstawia przykładowe wyniki badań opracowanej metodyki, która umożliwia prototypowanie mieszadeł, a w szczególności kształtu wirnika. Opiera się ona na obliczeniach numerycznych (CFD – Calculated Fluid Dynamics) i symulacji komputerowej z wykorzystaniem pakietu ANSYS Fluent, analizie rozkładu wektorów prędkości (metoda PIV – Particle Image Velocity) oraz wyznaczeniu wskaźników kryterialnych charakteryzujących przepływ, takich jak wskaźnik mocy (N_p), wskaźnik pompowania (K_c) i sprawność mieszania (E).

Słowa kluczowe: mieszanie mechaniczne, projektowanie wirników, CFD, PIV

WPROWADZENIE

Mieszanie mechaniczne to proces powszechny w układach technologicznych w wielu branżach przemysłu np.: przetworzeniu surowców mineralnych (procesy separacji), inżynierii chemicznej, przemyśle spożywczym, farmaceutycznym czy kosmetycznym. Jest to kluczowa operacja w dużej liczbie systemów inżynierskich, tj. dyspersja gazów w cieczach, reakcje chemiczne, tworzenie zawiesin i mieszanin wolno sedymentujących czy zapobieganie agregacji osadów. W klasycznym ujęciu, układy mieszające realizują proces mieszania tj. utrzymanie ośrodka w ciągłym ruchu z uwzględnieniem zaburzeń, co pozwala na intensyfikację procesów zachodzących w mieszalniku, właściwą wymianę ciepła i masy, przebieg reakcji chemicznych lub biochemicznych. Efekt końcowy mieszania zależy od zastosowanego systemu mieszającego – szczególnie mieszadła, czasu po jakim uzyskuje się dobry stopień wymieszania, wydajności urządzenia, rodzaju płynów zadowalająco wymieszanych w ustalonych warunkach. Proces ten obrazuje Rysunek 1.

Ten pozornie prosty proces zależy od właściwości fizycznych i chemicznych mieszanych substancji, geometrii zbiornika i wirnika oraz warunków hydrodynamicznych wytworzonych podczas pracy mieszalnika. Zatem skuteczność mieszania zależy od stanu skupienia zmieszanych faz, temperatury, lepkości i gęstości cieczy, wzajemnej rozpuszczalności mieszanych cieczy, rodzaju mieszadła i przede wszystkim od kształtu wirnika. Oczekiwany cechami mieszadeł nowej generacji są: zmniejszenie energochłonności procesów (mniejsza prędkość obrotowa, brak napowietrzania medium), nieniszczący charakter mieszania, małe opory ruchu a tym samym mała generacja ciepła. Ostatni czynnik jest szczególnie ważny w przypadku procesów wrażliwych na zmiany temperatury podczas ich realizacji. Należą do nich min.: produkcja polimerów czy też, na przykład nektarów i soków (ograniczenie rozpadu witamin i aktywności enzymów).

Optymalizacja parametrów pracy układów mieszających z uwzględnieniem specyfiki procesu technologicznego jest możliwa poprzez powiązanie opisu fenomenologicznego z modelami z obszaru mechaniki płynów. Analizując ruch przepływu płynów newtonowskich i nienewtonowskich w różnych warunkach eksploatacyjnych przy wykorzystaniu wirników o zadanym kształcie w porównaniu do pracy wirnika referencyjnego (turbiny Rushtona), możliwe jest dokonanie parametrycznego opisu pracy badanego układu mieszania (zbiornik z mieszadłem mechanicznym). Możliwe jest również wskazanie korelacji empirycznych, które pozwalają na przewidywanie zużycia energii (wymaganej mocy) podczas pracy układu. Ich podstawą jest powiązanie liczby Reynoldsa z liczbami kryterialnymi przepływu płynu.

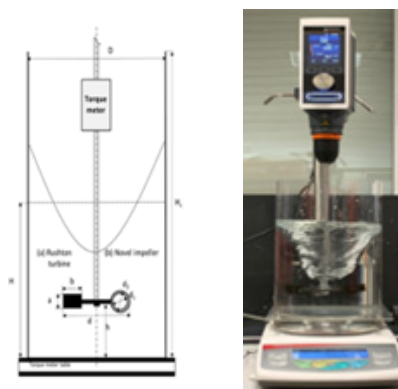
W opracowaniu przedstawiono przykłady wyników badań dla wypracowanej metodyki postępowania, która umożliwia prototypowanie mieszalników, a szczególnie kształt wirnika. Oparta jest ona na obliczeniach numerycznych (CFD – Calculated Fluid Dynamic) i symulacji komputerowej z wykorzystaniem pakietu ANSYS Fluent, analizie rozkładu wektorów prędkości (metodą PIV – Particle Image Velocity) oraz wyznaczeniu wartości liczb kryterialnych charakteryzujących przepływ, tj. liczba mocy – (N_p), wydajność pompowania – (K_c) czy efektywność mieszania (E).

UKŁAD EKSPERYMENTALNY I METODOLOGIA

Doświadczalnej weryfikacji pracy mieszadła dokonywano na stworzonym do tego celu stanowisku badawczym MIXER-STIR (Rysunek 2). Jest ono wyposażone w miernik momentu obrotowego na wale mieszadła (DATAFLEX 16 KTR, maks. $10 \pm 0,001$ Nm) oraz skrzętomierz (FSA-2 (AXIS, max 2Nm $\pm 0,001$ Nm) umożliwiające pomiar momentu obrotowego wynikających z ruchu płynu. Możliwe jest programowanie pracy



Rys. 1. Przedstawienie graficzne procesu mieszania (a) segregacja początkowa, (b) mieszanie idealne, (c) losowe mieszanie
Fig. 1. Graphical representation of the mixing process (a) initial segregation, (b) ideal mixing, (c) random mixing



Rys. 2. Schemat mieszalnika i laboratoryjny układ MIX&STIR (po lewej) oraz zdjęcie rzeczywistego układu mieszającego (po prawej) [3]
Fig. 2. Schematic diagram of the mixer and the laboratory MIX&STIR system (left) and a real-photo of the mixing system (right) [3]

mieszadła przy różnych ustawieniach jego wysokości od dna zbiornika dla ustalonego lub zmiennego kształtu zbiornika. Pomiar realizowano w zbiorniku cylindrycznym o gładkich ścianach i bez przegród. Referencyjnym wirnikiem była sześciłopatkowa turbina Rushtona, natomiast nowe trójłopatkowe wirniki stanowiły przeskalowane kopie rzeczywistych projektów przemysłowych [1].

Wymiary poszczególnych składowych elementów układu mieszającego przedstawia Tabela 1. Dane dla wirnika oznaczonego jako „Novel” dotyczą dwóch przebadanych wersji wirników różniących się kształtem elementu mieszającego (Novel-1 i Novel-0). Użyte symbole oznaczają odpowiednio: H – poziom płynu, H_c – wysokość zbiornika, D – średnicę zbiornika, d – średnicę wirnika, niezależną od typu wirnika, wysokość (a), szerokość (b) i grubość (l) dla łopatek turbiny Rushton oraz d_1 , d_2 to średnica na wejściu i wyjściu z „łopatki” nowatorskiego wirnika, zaś al to długość.

Rysunek 3 przedstawia geometrię wirników: Novel-1 (prosty element mieszający) i Novel-0 (kubelkowy element mieszający), które podlegały badaniom. W celu sprawdzenia możliwości zastosowania wirników dla szerokiego zakresu lepkości płynów, pomiary bezpośrednie momentu obrotowego wykonano dla różnych cieczy roboczych w stałej temperaturze ($t=20^\circ\text{C}$). Były to: woda ($\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$, $\mu=0.001003 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$), 100% gliceryna ($\rho=1261.1 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1410.1 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$) i glikol etylenowy ($\rho=1036 \text{ kg/m}^3$, $\mu=0,0457 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$). Dodatkowymi zmiennymi parametrami były: położenie wirnika nad dnem zbiornika i liczba obrotów wirnika. Pomiary wykonano przy wypełnieniu zbiornika spełniającego warunek $H=D$, dla zakresu szybkości obrotowej wirnika gwarantującej brak turbulencji na powierzchni płynu oraz braku wirów powstających wzdłuż statora [2,3]

Technikę PIV (Particle Image Velocity) użyto dla oceny właściwości mieszania, pola przepływu i wydajności pompowania. Aby zminimalizować zniekształcenia optyczne podczas pomiarów, cylindryczny zbiornik umieszczono wewnątrz kwa-

dratowego naczynia wypełnionego wodą. Do analizy zarejestrowanych serii podwójnych klatek, a do wyznaczenia składowych prędkości zastosowano oprogramowanie Davis w wersji 8.0 z modułem PIV/LIF. Szczegółowa procedura została opisana we wcześniejszych opracowaniach [3, 4]. Na podstawie pomiarów momentu obrotowego oraz średnich prędkości płynu (u_z) wyznaczono istotne liczby kryterialne: liczbę mocy (N_p) i liczbę Reynoldsa (Re) oraz skonsumowaną energię w postaci mocy (P), zdefiniowane zestawem równań:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5}; Re = \frac{Nd^2 \rho}{\mu}; P = 2\pi \cdot N \cdot \tau \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość (kg/m^3), μ – lepkość dynamiczna ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$), N – prędkość obrotowa (rps), d – średnica wirnika (m), P – moc mieszadła (W), zależna od momentu obrotowego τ (Nm).

Wyliczono także wydajność pompowania (Q) dla zmiennych wartości liczb Reynoldsa (Re), jako ilość płynu przenoszonego wertykalnie przez powierzchnie cylindryczną o zadanym promieniu (Q_z) (na przykład poniżej wirnika dla średnicy równej rozmiarom wirnika, albo ograniczanej średnicą zbiornika). W przypadku oceny wydajności pompowania w kierunku promieniowym stosuje się odpowiednio wielkości wyznaczone horyzontalne (Rów. 3) dla wszystkich pozycji osiowych. Dla wirnika Novel-1 był to zakres od $z_1=0$ (m) do $z_2=0,24$ (m) – Rysunek 4.

Dla celów porównawczych skuteczności pompowania wirników o odmiennym kształcie zastosowano znormalizowaną wartość tego parametru opisaną zależnościami:

$$Kc = \frac{Q_z}{Nd^3}; \text{gdzie } Q_z = \int_{r_1}^{r_2} |u_z| dS \quad (2)$$

$$\text{lub } Q_r = 2\pi r \int_{z_1}^{z_2} |u_r| dz \quad (3)$$

REZULTATY I DYSKUSJA WYNIKÓW

3.1. Komputerowe symulacje CFD a prototypowanie

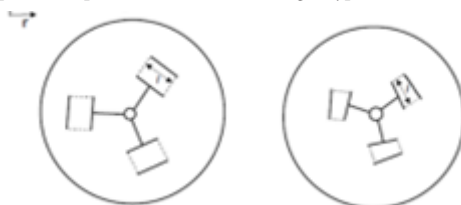
Tab. 1. Mixer dimensions

Tab. 1. Wymiary mieszalnika

Impeller type	H, H _c (mm)	h (mm)	D/d (mm)	a / d ₁ (mm)	b / d ₂ (mm)	l (mm)
Rushton	200 170	1/4H 1/3H 1/2H	170	12	15	2
Novel-0	300	42 57 85	85	15	18	40
Novel-1	270 220	80	220 /130	40	30	19

Rys. 3. Geometria zbiornika wirników-widok z góry: (a) Novel-1 (typ prosty) i (b) Novel-0 (typ kufelkowy)

Fig. 3. Geometry of impellers- top view: (a) Novel-1 (straight type) and (b) Novel-0 (bucket shape -type)



Warunki hydrodynamiczne wewnątrz zbiornika z mechanicznym mieszadłem opisują równania zachowania masy i pędu, które w warunkach ciągłości dla analizy trójwymiarowej mają postać:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_i} + \frac{\partial u_2}{\partial x_j} + \frac{\partial u_3}{\partial x_k} = 0 \quad (4)$$

Dla zachowania pędu, przy założeniu nieściśliwego płynu, równanie Naviera-Stokesa jest następujące::

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \right) \quad (5)$$

gdzie: $i=1, 2, 3$, u_i jest składową prędkości odpowiednio w kierunku i, j, k . W celu oddzielenia średnich i zmiennych składowych wielkości chwilowej oraz zastosowaniu rozkładów Reynoldsa wobec Rów.(4) i (5), uzyskuje się właściwe równania turbulencji (Rów. (6) i (7)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j') \quad (7)$$

Wygenerowane dodatkowe niewiadome podlegają obliczeniu w oparciu o tensor drugiego rzędu (pochodną względem x_j -ostatni człon Rów.7) określane jako naprężenie Reynoldsa, które definiuje efekt turbulencji. Do tego celu w obliczeniach numerycznych stosuje się model k-ε. Szczegółowe rozwiązania dla zastosowanego modelu turbulencji w odniesieniu do wirnika Novel-1 zostały opisane w dokumencie [2] – dla których przykładowe wyniki rozkładu wektorów prędkości w ustalonych warunkach prędkości obrotowej mieszadła, przedstawia Rysunek 4.

Z oceny rezultatów numerycznych obliczeń wynika, że bardzo duże wartości prędkości występują w wewnętrznej części elementów mieszających kanałowego typu wirnika jakim jest Novel-1. Ponadto wyraźnie widoczny jest przepływ osiowy i promieniowy. Potwierdziły to również profile pól prędkości uzyskane z pomiarów PIV (Rys.5) oraz wartościach liczb kryterialnych wyznaczonych w funkcji liczby Reynoldsa (Rys.7).

Bardzo silny wzrost wartości bezwymiarowej liczby pompowania (K_c), aż do osiągnięcia maksimum, zidentyfikowano

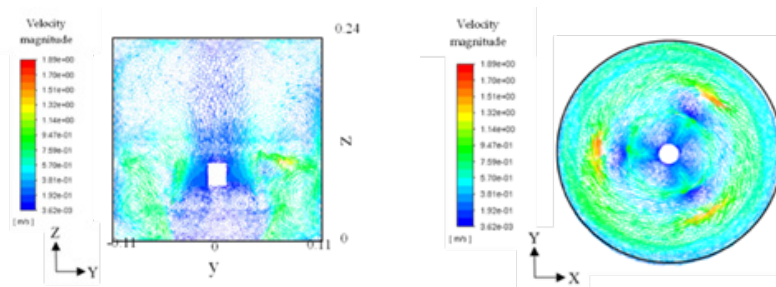
dla wartości $Re < 1000$, która wyznaczyła granice wobec turbulentnego reżimu, gdzie nastąpiła stabilizacja liczby mocy (N_p). Jej wartości są 6-10 razy wyższe względem tego parametru dla referencyjnego wirnika (turbiny Rushtona), co przedstawia Rysunek 7. Oznacza to również, że sprawność hydrauliczna, którą można zdefiniować jako stosunek liczby pompującej (K_c) do liczby mocy N_p dla wirnika Novel-1, jest znacznie wyższa od wartości obliczonych dla wirników odniesienia łopatkowych i bezłopatkowych (Rys.7c).

3.2. Charakterystyka pól prędkości przepływu – pomiary PIV

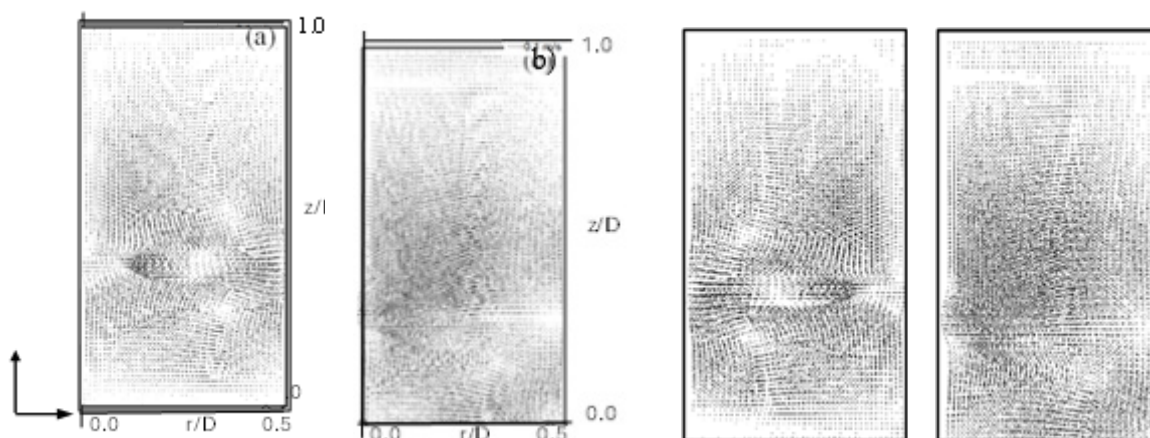
Walidacja wyników uzyskanych poprzez numeryczne obliczenia CFD jest dokonywana w bezpośrednich pomiarach PIV. Wyliczenie wartości liczby mocy (N_p) pozwala ocenić energochłonność procesu mieszania dla ustalonych warunków hydrodynamicznych i fizykochemicznych. Szczegółowe omówienie wpływu położenia wirników od dna zbiornika oraz geometrii zbiornika można odnaleźć w pracach [3,4]

Na Rysunku 5 przedstawiono przykładowe obrazy pól wektorów prędkości dla badanych innowacyjnych wirników i turbiny Rushtona jako referencyjnego rotora, zarejestrowanych w szerokim zakresie lepkości płynu.

Obrazy pól prędkości dla wirników Novel-1 i Novel-0 są podobne i wskazują na ruch płynu w obszarach poniżej i powyżej wirnika. Przestrzenią podziału strumienia płynu jest strefa pomiędzy końcówką elementu mieszającego wirnika a ścianą zbiornika. Z uwagi na pozycję rotorów spełniającą warunek $h/H=1/3$, słup cieczy roboczej ponad wirnikiem jest duży i w tym obszarze płyn początkowo przemieszczający się osiowo do ściany zbiornika jest kierowany ku górze a następnie zawraca wzdłuż wału mieszadła. Dla wody, w tej przestrzeni występują dodatkowe mniejsze lub większe turbulencje, które narastają wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika, co może powodować skrócenie czasu osiągnięcia wysokiego stopnia zmieszania. Dla gliceryny jako cieczy roboczej, zważywszy na jej znacząco większą lepkość, przepływ płynu w obrazie wektorów ma bardziej wyrazistą postać wedle tendencji opisanej powyżej, uzyskując dużą skuteczność zmieszania w stabilnych warunkach (bez dodatkowych turbulencji) dla szerokiego zakresu obrotów wirnika [5]. Porównanie w energochłonności wirnika



Rys. 4. Wektory prędkości w płaszczyźnie przekroju x-y (a) i y-z (b) dla prędkości obrotowej 200 rpm [2]
 Fig. 4. Velocity vectors in the x-y (a) and y-z (b) cross-section plane for the rotational speed at 200 rpm [2]



Rys. 5. Pole prędkości z pomiarów eksperymentalnych dla $h/H=1/3$ przy $N=200$ rpm, dla turbiny Rushton (a,c), wirnika Novel-1 (b), wirnika Novel-0 (d), w wodzie (a,b) i glicerynie (c,d)
 Fig. 5. Velocity field from experimental measurements for $h/H=1/3$ at $N=200$ rpm, for the Rushton turbine (a,c), Novel-1 rotor (b), Novel-0 rotor (d), in water (a,b) and glycerine (c,d)

Novel-0 z referencyjną turbiną Rushtona (RT) dla cieczy o dużej lepkości, przedstawia Rys. 6a. Liczba mocy dla wirnika Novel-0 chociaż dla niskich wartości liczby Reynoldsa jest wyższa aniżeli dla RT, to dla cieczy o lepkości powyżej 1000 (Pa·s) wykazuje bardzo dobrą efektywność mieszania w całej objętości zbiornika (Rys. 7b). Natomiast dla mniej lepkich płynów konsumpcja energii dla porównywanych wirników jest zbliżona, przy czym wyższą efektywność wykazuje wirnik Novel-0. Dla tego obiecującego rozwiązania zweryfikowano również wpływ ustawienia wirnika ponad dnem zbiornika dla wysoko-lepkiego płynu. Wirnik kubekowy uzyskał najlepszą efektywność mieszania szczególnie dla jego pozycji ponad dnem zbiornika wynoszących odpowiednio: $h=1/2H$ oraz $h=1/3H$ (Rys. 6b)

Należy wskazać, iż dla wirnika Novel-0, kubekowy kształt elementu mieszającego powoduje, że wpływający do jego wnętrza płyn podlega turbulencjom zanim zostanie wyrzucony na zewnątrz przez wylotowy otwór o mniejszej średnicy, uzyskując duże prędkości lokalne. Ważnym parametrem konstrukcyjnym dla tego typu trójramiennego wirnika jest kąt nachylenia kubelka. Szczegółową analizę oceny wpływu tego czynnika można znaleźć w pracy [5]

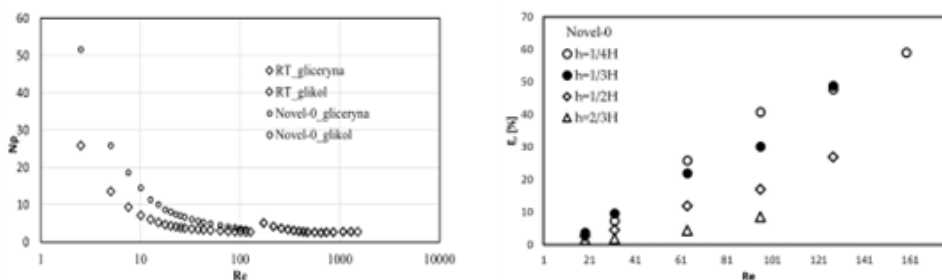
Prosty kubik stanowiący element mieszający wirnika Novel-1 ustawiony horyzontalnie, cechuje się wyższą wartością liczby pompowania (K_p) aniżeli wirnik referencyjny, co determinuje także wyższą sprawność dla procesu mieszania. Porównanie wskazanych parametrów przedstawia Rysunek 7a i Rysunek 7c., na których dodatkowo wprowadzono także obliczenia wykonane dla procesu mieszania płynu za pomocą turbiny Rushtona w zbiorniku z czterema przegrodami umieszczonymi

symetrycznie o wysokości równej wysokości naczynia i szerokości stanowiącej $1/10$ średnicy zbiornika. Modyfikacja geometrii mieszalnika poprzez wprowadzenie uspokajaczy w postaci przegród zwiększyła znacząco intensywność transportu płynu, co może zwiększyć skuteczność mieszania, ale powoduje równocześnie wzrost konsumpcji energii dla RT, co jest niekorzystne. Wirnik Novel-1 więc byłby mało interesującym rozwiązaniem wobec propozycji modyfikacji geometrii zbiornika z RT, jednak znacząco łatwiej i taniej jest wyprodukować wirnik aniżeli naczynie z przegrodami. Zatem z uwagi na koszty i dostępność rozwiązań korzystniej jest zastosować konstrukcje wirnika Novel-1.

Ponadto, na Rysunku 7b zamieszczono kilka punktów (czarne kropki) wyliczonej w oparciu o pomiary PIV wartości efektywności hydraulicznej dla wirnika Novel-0. Jak można zauważyć, po przekroczeniu wartości $Re=500$ następuje gwałtowny wzrost efektywności przy równoczesnym spadku wartości liczby mocy. Świadczy to o bardzo dobrej charakterystyce pracy wirnika Novel-0. Należy wskazać, że dla turbulentnego reżimu przepływu efektywność mieszania dla tego rotora skokowo wzrasta, szczególnie dla lepkich cieczy, co wskazuje na duży potencjał w zakresie usprawnienia procesu mieszania, a także zmniejszenia zużycia energii i kosztów eksploatacji.

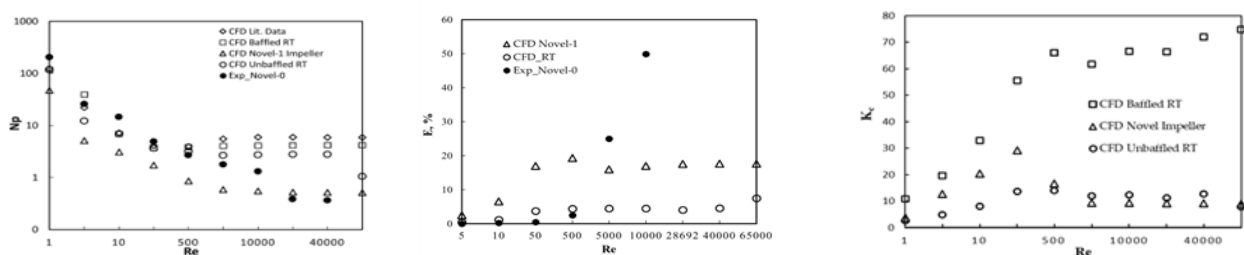
WNIOSKI

W przeszłości, ocena skuteczności rozwiązań konstrukcyjnych dla urządzeń z mechanicznym mieszaniem była ograniczona do prac eksperymentalnych z powodu braku powszechnego dostępu do kosztownych narzędzi numerycznych



Rys. 6. Porównanie współczynnika mocy N_p obliczonego na podstawie pomiarów eksperymentalnych w funkcji liczby Reynoldsa dla turbiny Rushton'a i wirnika Novel-0

Rys. 6. Comparison of the power number N_p evaluated from experimental measurements as a function of the Reynolds number for the Rushton turbine an Novel-0 impeller



Rys. 7. Porównanie współczynnika mocy N_p prognoz CFD i wyników eksperymentalnych z danymi literaturowymi [6, 7] dla analizowanych wirników (a), efektywnością procesu mieszania (b) i znormalizowanej liczby pompowania (c)

Rys. 7. Comparison of power number N_p of CFD predictions and experimental results with literature data [6, 7], for analysed impellers (a), efficiency of mixing process (b), and normalized pumping number (c)

dynamiki płynów i wystarczających zasobów pamięci oraz mocy obliczeniowych. Rozwój technologii komputerowych w ciągu ostatnich dwóch dekad, w powiązaniu ze złożonymi modelami matematycznymi stanowią obecnie doskonałe narzędzie badawcze w celu przewidywania hydrodynamiki płynów czy układów wielofazowych w oparciu o obliczenia numeryczne. Dzięki takim możliwościom uzyskuje się oszczędność czasu i kosztów, chociaż eksperymentalna weryfikacja parametrów technologicznych nadal jest konieczna z uwagi na złożoność wiele procesów, jednak może to być końcowy etap badań.

Zawsze wybór geometrii mieszadła i zbiornika zależy od rodzaju mieszanego medium (układ jedno lub wielofazowy), zawsze oznacza kompromis pomiędzy kosztami wytworzenia urządzenia, jego eksploatacji a efektywnością i oczekiwanymi rezultatami technologicznymi. Z tego powodu udoskonalanie i prototypowanie wirników mieszadeł czy też całych układów mieszających z wykorzystaniem sprawdzonej metodyki postę-

powania opartej na numerycznych obliczeniach (CFD), anemometrii obrazowej (PIV) oraz weryfikacji eksperymentalnej w warunkach laboratoryjnych pozwala opracować alternatywne i konkurencyjne rozwiązania wobec już istniejących.

Opisane w tej pracy nowe typy wirników trójramiennych stanowią obiecujące rozwiązania mieszania cieczy w szerokim zakresie lepkości dla zarówno niskich jak i wysokości wartości liczb Reynoldsa. Mogą one być stosowane jako alternatywny wobec wirników z wirującym dyskiem lub innych typów wirników łopatkowych czy bezłopatkowych.

ŹRÓDŁO FINANSOWANIA

Badania zostały częściowo sfinansowane w ramach projektu badawczego z programu „Inicjatywa Doskonałości - Uczelnia Badawcza” dla Akademii Górniczo-Hutniczej (ID 5186). Opracowanie w ramach Konferencji CIRCULAR MINE-TECH, 3-6 czerwca 2024 Gdańsk, Sudomie.

Literatura – References

1. Jaszczur, M., Młynarczykowska, A.. (2021). Mixing impeller for mixing liquids having a wide range of viscosities.. Opis zgłoszeniowy wynalazku ; PL431451A1 .Biuletyn Urzędu Patentowego.2021. nr. 8, 13-14
2. Jaszczur, M., Młynarczykowska, A., Demurtas, L. (2019). An experimental and numerical analysis of the fluid flow in a mechanically agitated. E3S Web of Conferences 128 (08002), 1–5. XII International Conference on Computational Heat, Mass nad Momentum Transfer (ICCHMT 2019), Rome, Italy, September 3–6, 2019. Doi: 10.1051/e3sconf/201912808002.
3. Jaszczur, M., Młynarczykowska, A., Ferrari, S., Demurtas, L. (2022). An experimental investigation on the fluid flow mixing process in agitated vessel. EPJ Web of Conferences 269 (01040) 1–6. EFM19 - Experimental Fluid Mechanics 2019 : Františkovy Lázně, Czech Republic, November 19th–22nd 2019. Doi: 10.1051/epjconf/202226901040
4. Młynarczykowska, A., Ferrari, S., Demurtas, L., Jaszczur, M. (2022). Impact of baffle geometry on the fluid motion in the stirred vessel. EPJ Web of Conferences 269 (01039) 1–6. EFM19 - Experimental Fluid Mechanics 2019 : Františkovy Lázně, Czech Republic, November 19th–22nd 2019. Doi: 10.1051/epjconf/202226901039
5. Jaszczur, M., Młynarczykowska, A., Demurtas, L. (2020). Effect of impeller design on power characteristics and Newtonian fluids mixing efficiency in a mechanically agitated vessel at low Reynolds numbers . Energies 13 (3) 640, 1–19. <https://doi.org/10.3390/en13030640>
6. Rushton J. H, Costich E. W, Everett H. J. (1950). Power characteristics of mixing impellers Part II, Chem. Eng. Progress. 46, 467-476.
7. S. Malika, E. Lévêque, L. Bouaifi, L. Gamet, E. Flottes, S. Simoëns, M. El-Hajem. (2016). Shear improved Smagorinsky model for large eddy simulation of flow in a stirred tank with a Rushton disk turbine. Chem. Eng. Res Design. 108, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.035>

Mechanical Mixing in Technological Processes – Experimental Verification of Rotor Shape Prototyping

Mechanical mixing is a common process in technological systems across many industries. It is a key operation in a large number of engineering systems, including chemical reactions, gas dispersion in liquids, the formation of suspensions and mixtures, and the prevention of sediment aggregation. This seemingly simple process depends on the physical and chemical properties of the substances being mixed, the geometry of the tank and impeller, and the hydrodynamic conditions generated during mixer operation.

This paper presents examples of research results for the developed methodology, which enables the prototyping of mixers, particularly the impeller shape. It is based on numerical calculations (CFD – Calculated Fluid Dynamics) and computer simulation using the ANSYS Fluent package, analysis of velocity vector distribution (PIV – Particle Image Velocity method), and the determination of criteria numbers characterizing flow, such as the power number (N_p), the pumping number (K_p), and the mixing efficiency (E).