

RYSZARD WÓJTOWICZ¹

NUMERYCZNA IDENTYFIKACJA PRZEPŁYWU CIECZY W MIESZALNIKU Z PRZEGRODAMI O NIEPEŁNEJ DŁUGOŚCI

NUMERICAL IDENTIFICATION OF THE LIQUID FLOW IN A MIXING VESSEL EQUIPPED WITH NOT FULL-LENGTH BAFFLES

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki symulacji *CFD* ruchu cieczy w mieszalniku mechanicznym z przegrodami o niepełnej długości. Na podstawie modelowania numerycznego wyznaczono wartości i rozkłady hydrodynamicznych parametrów przepływu (prędkości, parametrów burzliwości) w strumieniu cieczy generowanym przez mieszadło. Dla badanych konfiguracji przegród w mieszalniku oszacowano zmiany mocy mieszania i kryterialną liczbę Newtona.

Słowa kluczowe: mieszanie, mieszalnik mechaniczny, przepływ cieczy, symulacje CFD, przegrody

Abstract

In the paper the results of *CFD* simulations of the liquid flow in a stirred tank with not full-length baffles are presented. On the basis of a numerical modelling the values and distributions of main flow parameters (velocities, turbulence parameters) in the liquid flow generated by impeller were determined. Additionally, for investigated baffles configurations the changes of power input and criteria Newton number were estimated.

Keywords: mechanical mixing, stirred tank, liquid flow, CFD simulations, baffles

¹ Dr inż. Ryszard Wójtowicz, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Wytwarzanie układów wielofazowych w warunkach przemysłowych prowadzone jest zazwyczaj w zbiornikowych mieszalnikach cieczy, z mieszadłami turbinowymi wykonującymi ruch obrotowy. Dobór rodzaju mieszadła oraz optymalnej geometrii aparatu rzutuje bezpośrednio na efektywność i przebieg mieszania oraz – co równie istotne – nakłady energetyczne niezbędne do jego realizacji [1-3].

Wpływ rodzaju stosowanego mieszadła, jego usytuowania w mieszalniku oraz kształtu i wymiarów zbiornika aparatu na przebieg mieszania był przedmiotem badań wielu autorów. Uzyskane wyniki prezentowali w rozmaitej postaci – np. określając zapotrzebowanie mocy niezbędnej do realizacji procesu [4-6], wyznaczając graniczną częstość obrotów mieszadła gwarantującą pełne rozproszenie faz [7-9] czy też czas niezbędny do homogenizacji mieszanego układu [10, 11]. Mniej uwagi poświęcono natomiast zagadnieniom związanym z doбором optymalnej geometrii (kształtu, wymiarów) przegród sytuowanych wewnątrz zbiornika mieszalnika, mimo iż elementy te spełniają one istotną rolę w procesie mieszania, eliminując bezproduktywny, okrężny ruch cieczy w aparacie [2, 3].

W nielicznych publikacjach z tego zakresu analizowano przede wszystkim zasadność stosowania przegród podczas wytwarzania układów wielofazowych np. podczas rozpraszania gazu w cieczy [12] czy też wytwarzania zawiesin [13], badano również w jaki sposób ich długość wpływa na moc mieszania [14, 15]. W literaturze brakuje natomiast podstawowych informacji na temat wpływu długości przegród na cyrkulację i charakter przepływu cieczy w mieszalniku – informacji niezbędnych podczas projektowania i optymalizacji konstrukcji aparatów z mieszadłami.

2. Zakres i metodyka modelowania

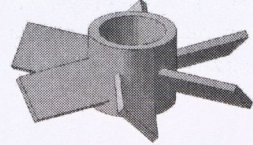
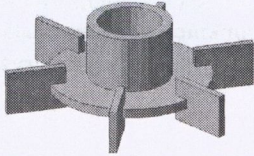
Mieszalnik składał się z cylindrycznego zbiornika o średnicy wewnętrznej $D = 0,286$ m, wewnątrz którego znajdowało się wysokoobrotowe mieszadło turbinowe. Analizowano działanie dwóch różnych mieszadeł: turbinowego tarczowego *Rushtona* (RT) (rys. 1a) wytwarzającego promieniowy ruch cieczy w aparacie oraz turbinowego o łopatkach pochyłonych ($\alpha = 45^\circ$) (PBT) (rys. 1b), tłoczącego ciecz w dół i generującego cyrkulację osiową. Średnica mieszadła wynosiła zawsze $d = D/3$, było ono sytuowane w odległości od dna równej $h = d$. Cieczą wypełniającą zbiornik do wysokości $H = D$ była woda ($\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Mieszadło poruszało się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara z częstością obrotów $n = 300$ [1/min], w zakresie rozwiniętego ruchu burzliwego $Re_m = 2,16 \cdot 10^5$.

Analizowano ruch cieczy w mieszalniku bez przegród (rys. 2a) oraz z czterema, płaskimi przegrodami rozmieszczonymi symetrycznie wewnątrz zbiornika. Długość

przegród zmieniano w zakresie $L = 1/3H$, $1/2H$, $2/3H$, $5/6H$ i H (rys. 2b ÷ 2e), ich szerokość w każdym przypadku była standardowa i wynosiła $B = D/10$.

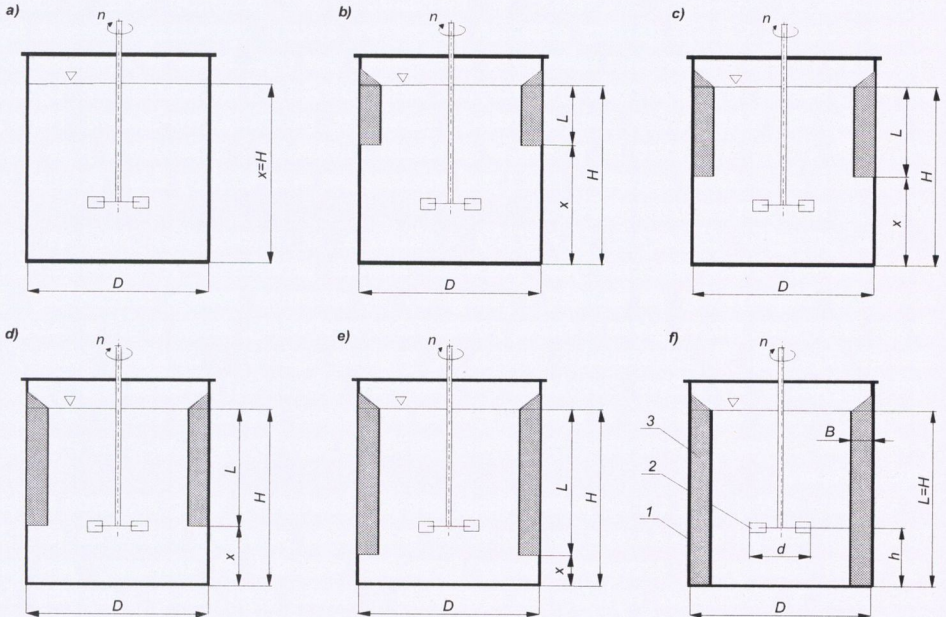
a)

b)



Rys. 1. Mieszadła stosowane podczas symulacji: a) turbinowe tarczowe *Rushtona* (RT), b) turbinowe o łopatkach pochylonych ($\alpha = 45^\circ$) (PBT)

Fig. 1. The impellers used for simulations a) *Rushton* turbine (RT) b) pitched blade turbine ($\alpha = 45^\circ$) (PBT)



Rys. 2. Długość i rozmieszczenie przegród w mieszalniku

(1 – zbiornik, 2 – mieszadło, 3 – przegrody):

a) mieszalnik bez przegród, b) $L = 1/3H$, c) $L = 1/2H$, d) $L = 2/3H$, e) $L = 5/6H$, f) $L = H$

Fig. 2. The length and arrangement of baffles in the mixing vessel

(1 – vessel, 2 – impeller, 3 – baffles)

a) non-baffled vessel, b) $L = 1/3H$, c) $L = 1/2H$, d) $L = 2/3H$, e) $L = 5/6H$, f) $L = H$

Obliczenia numeryczne prowadzono z wykorzystaniem pakietu *FLUENT 6.3.26* w oparciu o kody numerycznej mechaniki płynów (*CFD*) [17]. Ruch mieszadła modelowano metodą wielokrotnego układu odniesienia (*MRF*), do opisu przepływu cieczy w mieszalniku wykorzystano standardowe równania transportu pędu Naviera-Stokesa, uśredniane metodą Reynoldsa (*RANS*). Jako metodę zamknięcia zastosowano klasyczny model burzliwości $k-\epsilon$ w wersji standard ze standardowymi funkcjami przyściennym [16, 17].

3. Wyniki symulacji i wnioski

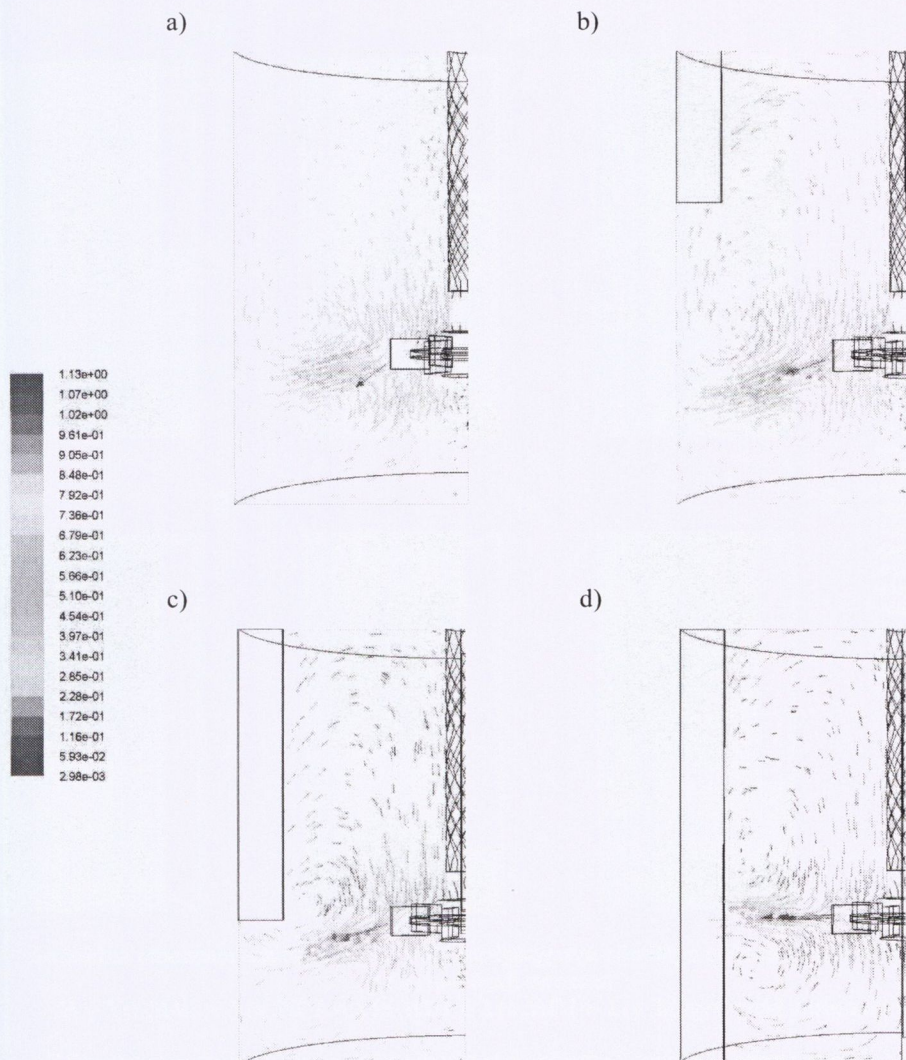
Na rys. 3 ÷ 6 przedstawiono przykładowe wektorowe i konturowe mapy przepływu cieczy w wybranej, pionowej płaszczyźnie przekroju mieszalnika, przechodzącej przez osł zbiornika i dwie przeciwnieległe przegrody (tzw. płaszczyźnie przegród).

Jak pokazano na rys. 3 mieszadło turbinowe tarczowe *Rushtona* (RT) może generować w aparacie różną cyrkulację cieczy, zależnie od obecności i długości przegród usytuowanych wewnątrz zbiornika. W mieszalniku bez przegród oraz z krótszymi przegradami ($L \leq 2/3H$) główny strumień przepływu cieczy, opuszczając obszar łopatek mieszadła zostaje nieznacznie odchylony w kierunku dna (rys. 3a-c). W zbiorniku tworzą się wtedy różnej wielkości pętle cyrkulacyjne, niesymetryczne i zniekształcone. Cyrkulacja w mieszalniku przypomina tzw. cyrkulację mieszaną, promieniowo-osiową. Najwyższe prędkości cieczy widoczne są w strefie działania mieszadła i sąsiedztwie jego łopatek, w pozostałym obszarze aparatu – nad i pod mieszadłem oraz okolicy dna i ścianek zbiornika – jej ruch jest znacznie słabszy.

Dla przegród dłuższych ($L > 2/3H$) cyrkulacja w mieszalniku zmienia się na promieniową. Ciecz tłoczona jest poziomo wzdłuż promienia, w kierunku ścianek zbiornika. Napotykając na ściankę i przegrody jej strumień zostaje rozdzielony, jedna struga kierowana jest ku górze w stronę powierzchni swobodnej, druga w dół w okolice dna aparatu (rys. 3d). W mieszalniku tworzą się większe (górne) i mniejsze (dolne) pętle cyrkulacyjne, z wyraźnym zwrotnym (w kierunku mieszadła) strumieniem przepływu w okolicy wału. Również i w tym przypadku najwyższe prędkości cieczy wyznaczono w obszarze mieszadła, w strumieniu wylotowym blisko jego łopatek, mniejsze w pozostałej części aparatu.

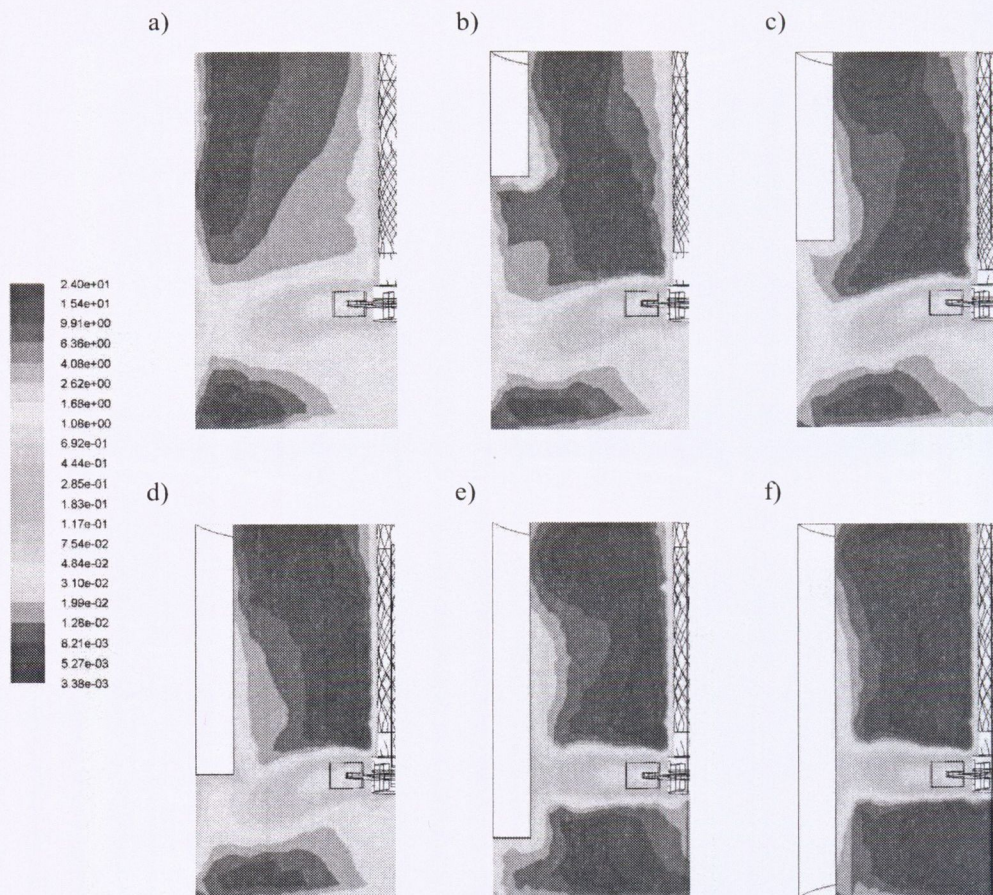
Opisany wyżej ruch cieczy potwierdzają również konturowe mapy rozkładu szybkości dyssypacji energii ϵ , pokazane na rys. 4. W przypadku przegród krótszych ($L \leq 2/3H$) (rys. 4a-d) intensywny przepływ cieczy (wysokie wartości ϵ) widoczny jest przede wszystkim w strumieniu wylotowym mieszadła – blisko jego tarczy i łopatek. Strefa intensywnej burzliwości obejmuje również obszar między ścianką zbiornika a mieszadłem, położona jest jednak nieznacznie poniżej poziomu wysokości jego zawieszenia w zbiorniku.

Gdy przegrody są dłuższe ($L > 2/3H$) intensywną dyssypację energii w cieczy wyznaczono przede wszystkim na poziomie zawieszenia mieszadła, w obszarze pomiędzy mieszadłem a przegradą i ścianką aparatu. W tym przypadku jednak strefa wysokiej szybkości dyssypacji jest węższa niż poprzednio (rys. 4e, f).



Rys. 3. Mapy wektorowe prędkości przepływu cieczy w mieszalniku (mieszadło turbinowe tarczowe *Rushtona* (RT))
a) mieszalnik bez przegród, b) $L = 1/3H$, c) $L = 2/3H$, d) $L = H$

Fig. 3. Vector maps of flow velocity in the mixing vessel (*Rushton* turbine (RT))
a) non-baffled vessel, b) $L = 1/3H$, c) $L = 2/3H$, d) $L = H$



Rys. 4. Mapy konturowe szybkości dyssypacji energii ϵ w mieszalniku (mieszadło turbinowe tarczowe *Rushtona* (RT))

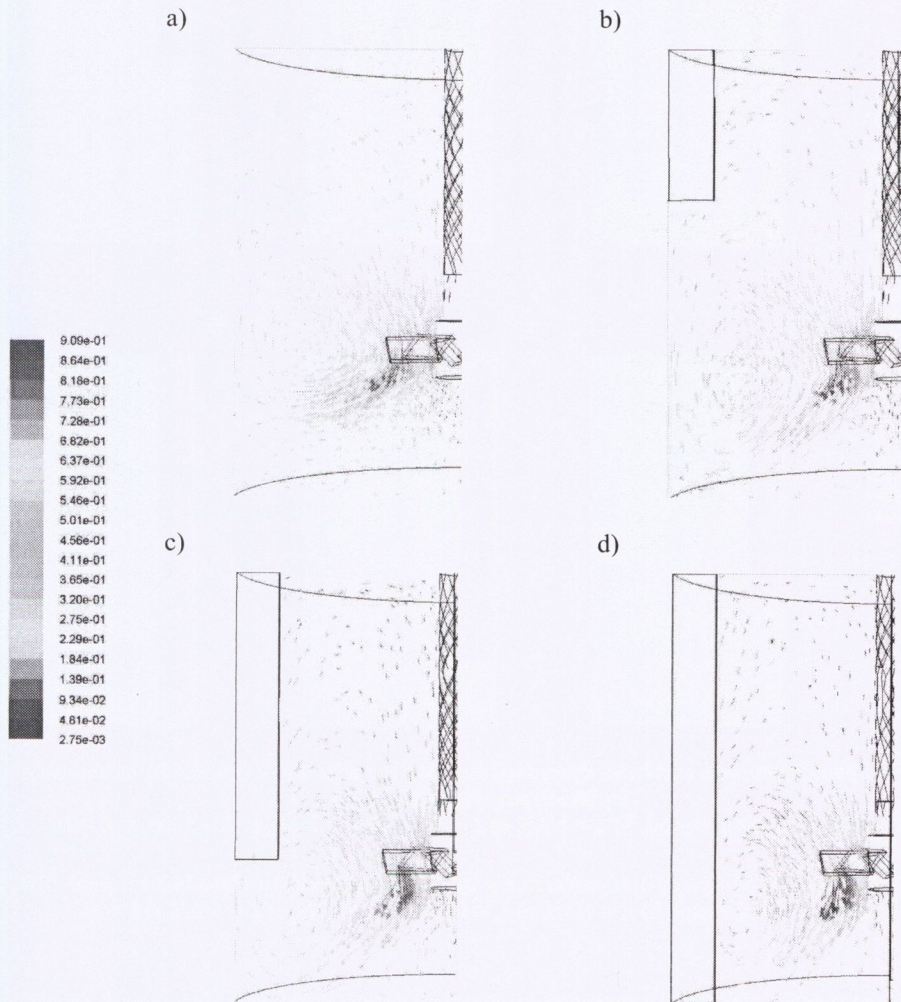
a) mieszalnik bez przegród, b) $L = 1/3H$, c) $L = 1/2H$, d) $L = 2/3H$, e) $L = 5/6H$, f) $L = H$

Fig. 4. Contour maps of energy dissipation rate ϵ in the mixing vessel (*Rushton* turbine (RT))

a) non-baffled vessel, b) $L = 1/3H$, c) $L = 1/2H$, d) $L = 2/3H$, e) $L = 5/6H$, f) $L = H$

Inną cyrkulację cieczy generuje mieszadło o łopatkach pochylonych (rys. 5 i 6). Niezależnie od długości zastosowanych przegród wytwarza ono w mieszalniku osiowy przepływ cieczy, z wyraźnymi pojedynczymi pętłami cyrkulacyjnymi obejmującymi swoim zasięgiem całą jego objętość. Wylotowy strumień z mieszadła kierowany jest początkowo w stronę dna zbiornika, następnie zaś ulega odchyleniu w kierunku ścianki i przegród (rys. 5a-d). Najwyższe prędkości przepływu cieczy widoczne są przede wszystkim w strefie działania łopatek mieszadła i bezpośrednio pod nimi, niższe w pozostałej części mieszalnika.

Mapy przedstawione na rys. 5 pokazują ponadto iż wprowadzenie do mieszalnika przegród znacznie poszerza obszar cyrkulacji cieczy w dolnej jego części (rys. 5b-d). W zbiorniku bez przegród (rys. 5a) strefa oddziaływania głównej pętli cyrkulacyjnej jest stosunkowo wąska i nie obejmuje okolicy dna aparatu, mieszanie w tym obszarze jest zatem mniej intensywne.

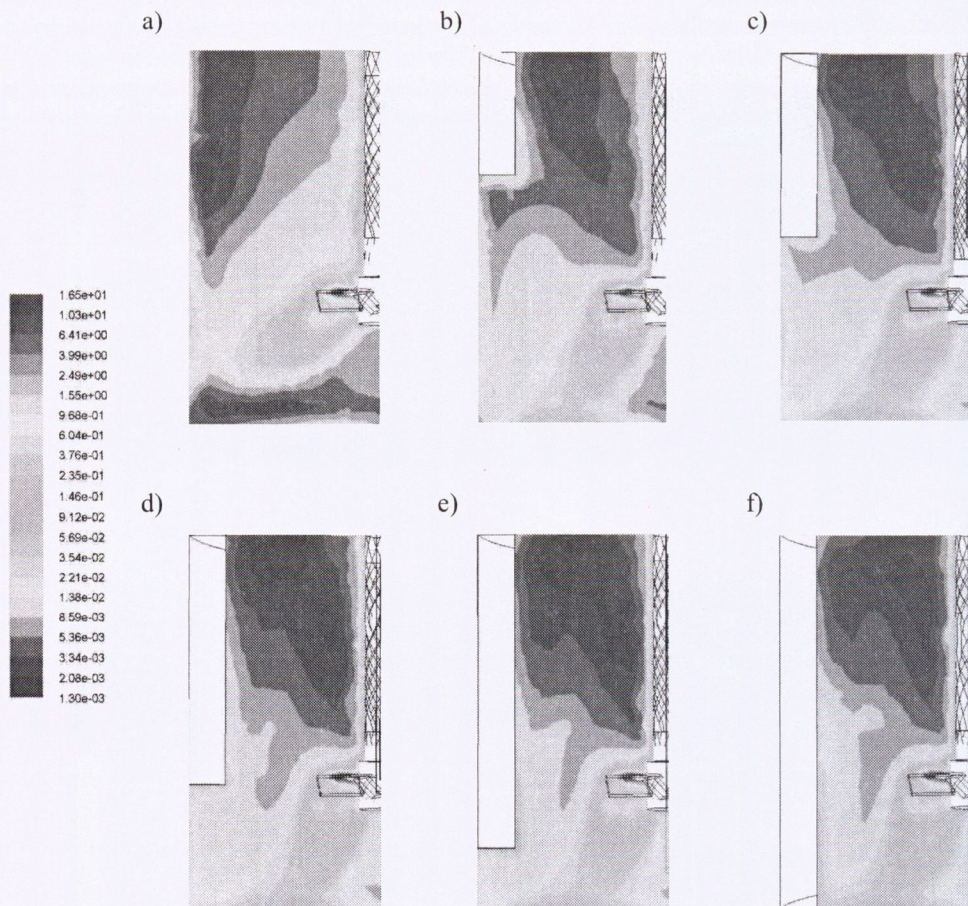


Rys. 5. Mapy wektorowe prędkości przepływu cieczy w mieszalniku (mieszadło turbinowe o łopatkach pochyłych (PBT))

a) mieszalnik bez przegród, b) $L = 1/3H$, c) $L = 2/3H$, d) $L = H$

Fig. 5. Vector maps of flow velocity in the mixing vessel (pitched blade turbine (PBT))

a) non-baffled vessel, b) $L = 1/3H$, c) $L = 2/3H$, d) $L = H$



Rys. 6. Mapy konturowe szybkości dyssypacji energii ϵ w mieszalniku (mieszadło turbinowe o łopatkach pochylnych (PBT))

a) mieszalnik bez przegród, b) $L = 1/3H$, c) $L = 1/2H$, d) $L = 2/3H$, e) $L = 5/6H$, f) $L = H$

Fig. 6. Contour maps of energy dissipation rate ϵ in the mixing vessel (pitched blade turbine (PBT))

a) non-baffled vessel, b) $L = 1/3H$, c) $L = 1/2H$, d) $L = 2/3H$, e) $L = 5/6H$, f) $L = H$

Opisane wyżej zjawisko potwierdzają również mapy szybkości dyssypacji energii ϵ , pokazane na rys. 6.

W mieszalniku bez przegród (rys. 6a) widać wąską strefę słabej burzliwości cieczy pod mieszadłem, blisko dna aparatu. Wprowadzenie do mieszalnika przegród znacznie intensyfikuje przepływ cieczy w tym obszarze, co potwierdzają znacznie wyższe wartości szybkości dyssypacji energii (rys. 6 b-f).

Jedną z podstawowych wielkości charakteryzujących proces mieszania w mieszalniku mechanicznym jest kryterialna liczba Newtona (liczba mocy). Określa ona moc mieszania (energię dostarczaną do mieszanego układu w jednostce czasu), wykorzystywana jest zatem do szacowania nakładów energetycznych dla realizowanego procesu a także podczas obliczeń konstrukcyjno-wytrzymałościowych elementów mieszalnika np. średnicy wału mieszadła.

Dla procesu mieszania liczba Newtona definiowana jest jako:

$$Ne_m = \frac{P}{n^3 \cdot d^5 \cdot \rho} \quad (1)$$

przy czym moc mieszania P jest iloczynem prędkości obwodowej mieszadła ($u = 2 \cdot \pi \cdot n$) i momentu M wyznaczonego poprzez całkowanie ciśnienia wywieranego przez ciecz na jego łopatki:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (2)$$

W tabeli 1 zestawiono wartości liczb Newtona wyznaczone numerycznie dla badanych mieszalników.

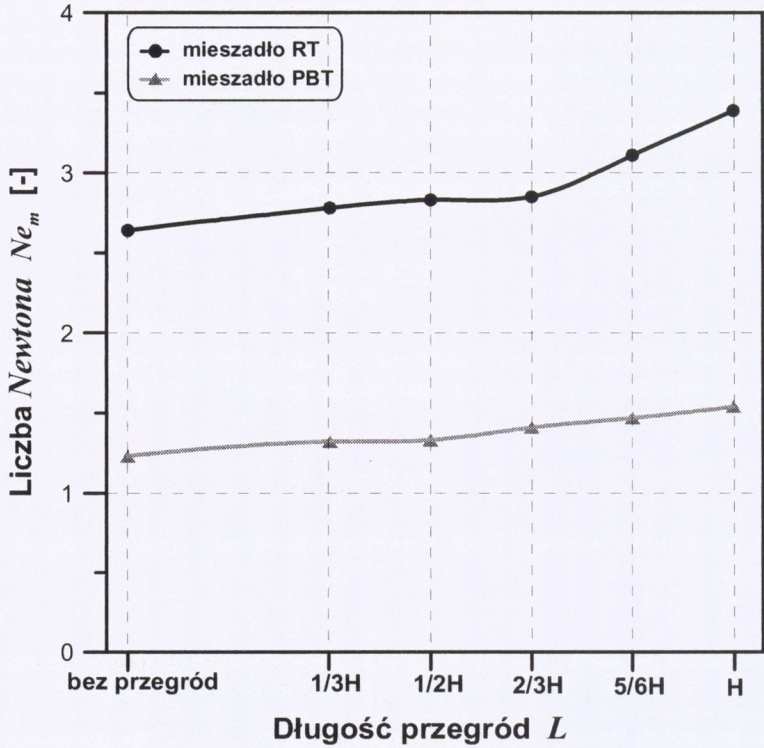
Tabela 1

Wartości liczb Newtona (Ne_m) wyznaczone na podstawie modelowania numerycznego w mieszalniku bez przegród i z przegradami o różnej długości

Długość przegród / Rodzaj mieszadła	Mieszadło turbinowe tarczowe <i>Rushtona</i> (RT)	Mieszadło o łopatkach pochylonych (PBT)
Mieszalnik bez przegród	2,64	1,24
$L = 1/3H$	2,79	1,33
$L = 1/2H$	2,84	1,34
$L = 2/3H$	2,86	1,41
$L = 5/6H$	3,12	1,47
$L = H$	3,40	1,55

Niezależnie od zastosowanego mieszadła, ze wzrostem długości przegród w mieszalniku rosną wartości liczb Newtona, przy czym dla mieszadła turbinowego tarczowego *Rushtona* wzrost ten jest bardziej widoczny (rys. 7). Uwagę zwraca również fakt wysokich wartości liczb Newtona dla mieszalników przegradami o długości $L = (2/3 \div 1) \cdot H$, co zdaje się potwierdzać opisane wcześniej zjawisko zmiany cyrkulacji cieczy z mieszanej na promieniową, z głównym przepływem cieczy na poziomie mieszadła w kierunku ścianki zbiornika.

Porównując wyznaczone numeryczne wartości liczb Newtona z danymi eksperymentalnymi prezentowanymi w literaturze [1 ÷ 3] można stwierdzić, iż w przypadku mieszadła turbinowego tarczowego *Rushtona* ich wartości są o około 30% niższe od wyznaczonych doświadczalnie ($Ne_{m(RT)exp} = 4,5 \div 5,5$) zaś dla mieszadła o łopatkach pochylonych mieszczą się w wyznaczonym zakresie ($Ne_{m(PBT)exp} = 1,3 \div 2$).



Rys. 7. Zmiany numerycznie wyznaczonych liczb Newtona w funkcji długości przegród

Fig. 7. Numerically predicted Newton numbers as a function of baffles length

Oznaczenia

B	– szerokość przegród,	[m]
D	– średnica zbiornika mieszalnika,	[m]
d	– średnica mieszadła,	[m]
H	– wysokość napełnienia zbiornika cieczą,	[m]
h	– wysokość zawieszenia mieszadła nad dnem zbiornika,	[m]
k	– energia kinetyczna burzliwości,	[m ² /s ²]
L	– długość przegród,	[m]
n	– częstość obrotów mieszadła,	[m]
P	– moc mieszania,	[W]
α	– kąt pochylenia łopatek mieszadła,	[°]
ε	– szybkość dyssypacji energii,	[m ² /s ³]
η	– dynamiczny współczynnik lepkości cieczy,	[Pa·s]
ρ	– gęstość cieczy,	[kg/m ³]

Oznaczenia mieszadeł

- PBT* – mieszadło turbinowe o łopatkach pochylonych
RT – mieszadło turbinowe tarczowe Rushtona

Liczby kryterialne:

$$Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta} \quad \text{– liczba Reynoldsa dla mieszania}$$

$$Ne_m = \frac{P}{n^3 \cdot d^5 \cdot \rho} \quad \text{– liczba Newtona (mocy) dla mieszania}$$

Literatura

- [1] Paul E. L., Atiemo-Obeng W. A., Kresta S. M.: *Handbook of Industrial Mixing*, Wiley & Sons Inc., New Jersey 2004.
- [2] Zlokarnik M.: *Stirring – Theory and Practice*, Wiley-VCH, Weinheim 2001.
- [3] Kamiński J.: *Mieszanie układów wielofazowych*, WNT, Warszawa 2004.
- [4] Raghav Rao K. S. M. S., Joshi J. B.: *Liquid-phase mixing and power consumption in mechanically agitated solid-liquid contactors*, Chemical Engineering Journal, 39, 2, (1988), 111-124.
- [5] Arjunwadkar S. J., Saravanan K., Pandit A. B., Kulkarni P. R.: *Optimizing the impeller combination for maximum hold-up with minimum power consumption*, Biochemical Engineering Journal, 1, 1, (1998), 25-30.
- [6] Dohi N., Takahashi T., Minekawa K., Kawase Y.: *Power consumption and solid suspension performance of large-scale impellers in gas-liquid-solid three-phase stirred tank reactors*, Chemical Engineering Journal, 97, 2-3, (2004), 103-114.
- [7] Armenante P. M., Nagamine E. U.: *Effect of low off-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete suspension of solids in stirred tanks*, Chemical Engineering Science, 53, 9, (1998), 1757-1775.
- [8] Kamil M., Bushra A., Ahmad A.: *Minimum agitation speed for liquid-liquid-gas dispersion in mechanically agitated vessels*, Chemical Engineering and Processing, 40, 1, (2001), 49-57.
- [9] Rieger F.: *Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 41, 4, (2002), 381-384.
- [10] Hadjiev D., Sabiri N. E., Zanati A.: *Mixing time in bioreactors under aerated conditions*, Biochemical Engineering Journal, 27, 3, (2006), 323-330.
- [11] Kuzmanić N., Žanetić R., Akrap M.: *Impact of floating suspended solids on the homogenization of the liquid phase in dual-impeller agitated vessel*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47, 4, (2008), 663-669.

- [12] Lu W-M, Wu H-Z, Ju M-Y.: *Effects of baffle design on the liquid mixing in an aerated stirred tank with standard Rushton turbine impellers*, Chemical Engineering Science, 52, 21, (1997), 3843-3851.
- [13] Khazam O. , Kresta S. M.: *A novel geometry for solids drawdown in stirred tanks*, Chemical Engineering Research and Design, 87, (2009), 280-290.
- [14] Stręk F., Karcz J.: *Experimental studies of power consumption for agitated vessels equipped with non-standard baffles and high-speed agitator*, Chemical Engineering and Processing, 32, (1993), 349–357.
- [15] Karcz J., Major M.: *An effect of a baffle length on the power consumption in an agitated vessel*, Chemical Engineering and Processing, 37, (1998), 249-256.
- [16] *Fluent 6.2 – Documentation*, Fluent Inc. 2006.
- [17] Jaworski Z.: *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.