

Małgorzata MARKOWSKA<sup>1</sup>, Agnieszka FUS<sup>2</sup>, Sylwia WŁODARCZAK<sup>1</sup>, Izabela KRUSZELNICKA<sup>3</sup>,  
Marek OCHOWIAK<sup>1</sup>

e-mail: malgorzata.markowska@doctorate.put.poznan.pl

<sup>1</sup> Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

<sup>2</sup> Katedra Inżynierii Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

<sup>3</sup> Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska, Poznań

## Symulacje CFD procesu separacji układu ciało stałe-ciecz w zmodyfikowanych osadnikach wirowych

### Wstęp

Rozwój i postęp nauki oraz technologii, a także ochrony środowiska prowadzą m.in. do zwiększenia zainteresowania systemami oczyszczania wód opadowych oraz do wdrażania narzędzi informatycznych, które wspomagają modelowanie systemów oczyszczania [Gromiec i in., 2014; Trębicka, 2016].

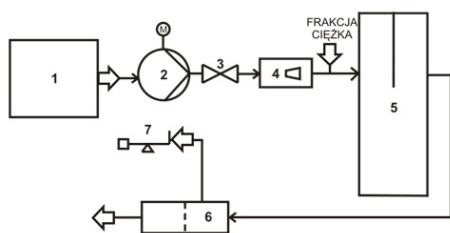
Tworzenie modelu ma na celu utrzymanie nadzoru nad planowanymi procesami oczyszczania oraz zapewnienie niezbędnej ilości zależnych parametrów procesowych. Dokładność predykcji zależy od zbioru danych, który został wzięty pod uwagę w trakcie tworzenia modelu [Skoczko i in., 2016; Trębicka, 2011]. Mnogość wyników pomiarowych ma kluczowe znaczenie w naukach zarówno technicznych, jak i środowiskowych, ze względu na wzrost badań przeprowadzonych na danym obiekcie dla uzyskania większej szansy na zaobserwowanie zjawiska ekstremalnego. Wiedza ta daje możliwość zapobiegania przeciążeniu danego aparatu lub przewidywaniu jego ewentualnej awarii [Skoczko i in., 2016].

Za pomocą współczesnych metod obliczeniowych możliwe jest wykonanie symulacji komputerowej. Zazwyczaj składa się ona z czterech etapów: odwzorowania geometrii obiektu rzeczywistego, dyskretyzacji domeny na komórki obliczeniowe, rozwiązania, czyli wykonania obliczeń i na końcu weryfikacji i walidacji wyników tych obliczeń [Kruszyński, 2016].

Celem pracy było wybranie modelu komputerowego i stworzenie symulacji procesu separacji ciała stałego i cieczy za pomocą programu ANSYS Fluent w zmodyfikowanych osadnikach wykorzystujących ruch wirowy. Modyfikacja osadników polegała na zastosowaniu zanurzonego króćca wlotowego oraz różnie umiejscowionej przegrody: w osi aparatu oraz bliżej ujścia z osadnika. Porównano zmienne konstrukcje do standardowego osadnika wirowego. Określono trajektorię ruchu cząstek stałych w płynie podczas zadanego obciążenia hydraulicznego. Wyznaczono sprawność separacji cząstek ciała stałego i cieczy. Symulacje zweryfikowano eksperymentalnie.

### Charakterystyka obiektu badań

**Aparatura.** Badania przeprowadzono na skonstruowanym systemie oczyszczania cieczy z zanieczyszczeń w postaci ciała stałego. Proces separacji faz zachodził w zmodyfikowanym osadniku wirowym. Specyfikę i zastosowanie tych separatorów dokładniej opisano w poprzednich pracach [Ochowiak i in., 2016; Ochowiak i in., 2018]. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu oczyszczania strumienia cieczy: 1 – zbiornik cieczy, 2 – rotacyjna pompa cieczowa, 3 – zawór, 4 – przepływomierz cieczowy, 5 – osadnik wirowy, 6 – filtr, 7 – laboratoryjna waga analityczna

Ciecz była transportowana ze zbiornika do osadnika. Natężenie przepływu mierzono przy użyciu rotametu. Strumień po wyjściu z osadnika podawany był na sito, gdzie następowało odseparowanie ciała stałego, które nie zostało zatrzymane wewnątrz aparatu. Po wysuszeniu i zważeniu osadu można było określić sprawności separacji urządzenia wg zależności:

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$\eta$  – sprawność separacji osadnika wirowego, [%];

$m_1$  – masa ciała stałego dodawanego na wejściu do aparatu, [kg];

$m_2$  – masa ciała stałego odbierana na wyjściu z aparatu, [kg].

**Obciążenie hydrauliczne** zadane na wejściu do urządzenia wynosiło  $O_h = 5,8 \cdot 10^{-3} \div 17,6 \cdot 10^{-3}$  [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)]. Jest to stosunek objętościowego natężenia przepływu na wejściu do aparatu do jego pola przekroju poprzecznego. Wykorzystanie obciążenia hydraulicznego umożliwiło uzależnienie wyników sprawnościowych od podstawowego wymiaru konstrukcyjnego osadnika wirowego.

**Konstrukcje zmodyfikowanych osadników wirowych (ZW)** będące przedmiotem badań porównano do standardowego osadnika wirowego (SW). Charakterystyki konstrukcyjne urządzeń zestawiono w tab. 1. Wszystkie zmodyfikowane osadniki charakteryzowały się następującymi podstawowymi parametrami niezmiennymi podczas kolejnych modyfikacji: średnica wewnętrzna  $D = 0,19$  m, wysokość całkowita  $H = 0,69$  m, wysokość promieniowego przecięcia osi króćców wlotowego i wylotowego ze ścianą zbiornika  $h_l = 0,416$  m oraz średnica wewnętrzna tych króćców  $d = 0,028$  m.

**Standardowy osadnik wirowy (SW)** nie posiadał zanurzonego króćca wlotowego, a wysokości przecięcia króćców ze ścianą zbiornika różniły się o 0,1 m. Osadnik ten charakteryzował się prostym króćcem wlotowym umiejscowionym stycznie do ścianki zbiornika i skierowanym poziomo. Jego konstrukcję dokładniej opisano we wcześniejszej pracy [Ochowiak i in., 2016].

**Materiały.** Zastosowano materiał będący mieszaniną ziaren kwarcu i skaleni. Był on odpowiednio zaokrąglony i przesortowany, co pozwoliło na porównanie go do cząstek kulistych uwzględnionych w symulacjach. Separację i frakcje o średnicach równych 125, 175 oraz 250  $\mu\text{m}$  przeprowadzono wykorzystując urządzenie AS 200 firmy Retsch.

Tab. 1. Parametry konstrukcyjne osadników wirowych podlegające modyfikacji: 0 – przegroda znajduje się w osi zbiornika, 1 – przegroda przesunięta od osi zbiornika o 0,055 m w kierunku ujścia ze zbiornika, x – brak przegrody

Oznaczenie osadnika	Odległość króćca wlotowego od dna, [m]	Położenie przegrody	Odległość przegrody od dna [m]
SW	0,40	x	x
ZW1	0,22	1	0,18
ZW2	0,22	1	0,27
ZW3	0,11	1	0,27
ZW4	0,11	0	0,18
ZW5	0,11	0	0,27

## Charakterystyka narzędzia do modelowania

Obliczenia prowadzono przy wykorzystaniu obliczeniowej mechaniki płynów CFD korzystając z oprogramowania *ANSYS Fluent 19.0*. W modelowanym przypadku stosowano model burzliwości  $k-\epsilon$  oraz model DPM. Przyjęto, że przepływ jest ustalony i odbywa się pod wpływem grawitacji równej  $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ .

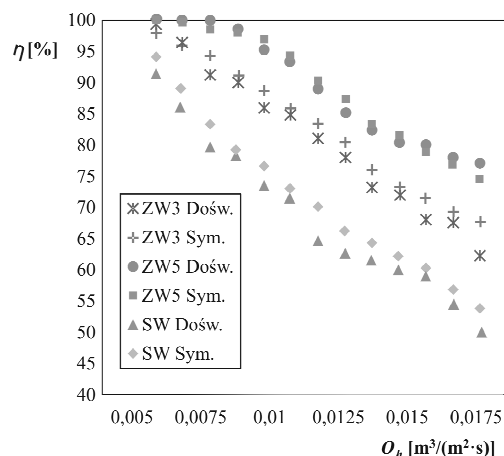
W obliczeniach jako materiały przyjęto wodę oraz cząstki stałe o zadanej gęstości  $2800 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  w trzech frakcjach o różnej wielkości cząstek (125, 175, 250  $\mu\text{m}$ ). W warunkach brzegowych zadano wartości przepływu masowego odpowiadające wartościom użytym w doświadczeniach.

Jako schematu aproksymacji użyto algorytmu *SIMPLE*. Obliczane przypadki składały się z  $350\div 550$  tysięcy komórek obliczeniowych, głównie z komórek tetraedrycznych. Podczas nakładania siatki obliczeniowej zwiększono liczbę elementów w miejscach występowania największych zmian w przepływie tj. w zagięciach, wylotach i wlotach do rur oraz przegrodzie. W tych miejscach zastosowano lokalne zagęszczenia siatki do wymiarów komórek  $1\div 2 \text{ mm}$ , co było wystarczające ze względu na fakt, że modelowano jedynie płyn. Przed przystąpieniem do obliczeń zweryfikowano niezależność wyników od siatki obliczeniowej. Dodatkowo każda z siatek spełniała kryteria jakościowe (m.in *Aspect Ratio*, *Orthogonal Quality*, *Skewness*). Przeprowadzono dodatkową walidację uzyskanych wyników pod kątem bilansu masy i potwierdzono ich poprawność.

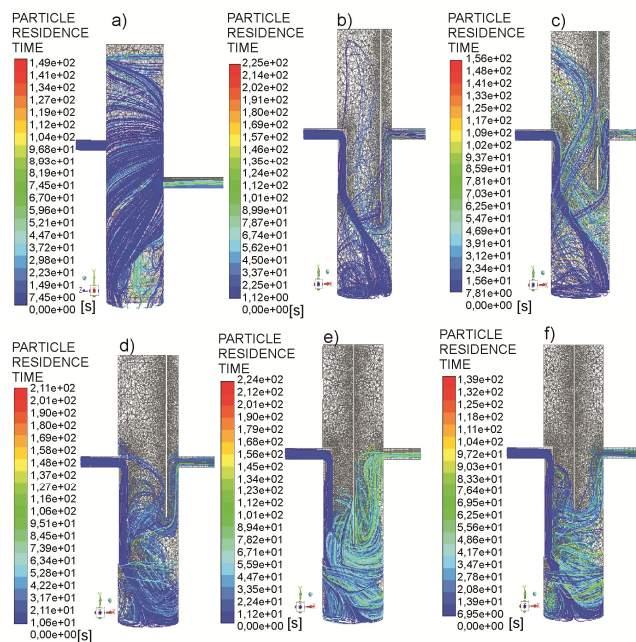
## Analiza wyników i wnioski

Modyfikacje osadników wirowych zwiększyły sprawność separacji w układzie ciało stałe-ciecz w porównaniu do standardowej konstrukcji osadnika wirowego. Największym stopniem separacji przy najdłuższym czasie zatrzymania cząstek w zbiorniku osadnika charakteryzowała się konstrukcja posiadająca przegrodę w osi zbiornika, umiejscowioną dokładnie między ujściem z króćca wlotowego a króćcem wylotowym (ZW5).

Zestawienie sprawności separacji dwóch osadników o najwyższych osiągnięciach sprawnościowych (ZW3 i ZW5) zaprezentowano na rys. 2 (zarówno wyniki uzyskane podczas symulacji, jak i doświadczenia). Porównano je z wynikami uzyskanymi dla standardowego osadnika wirowego. Doświadczenia potwierdziły przeprowadzone symulacje. Wyniki sprawności separacji z symulacji i doświadczenia różniły się  $\pm 10\%$ . Stopień separacji, czyli inaczej jej sprawność, wykazywała tendencję malejącą wraz ze zwiększającym się zadaniem obciążeniem hydraulicznym. Osadnik ZW5 osiągał 80% sprawność separacji dla cząstek o średnicy  $125 \mu\text{m}$ , dalej 88% dla  $175 \mu\text{m}$  i ponad 90% dla frakcji o największej średnicy (podano wartości przy najwyższych wartościach obciążenia hydraulicznego).



Rys. 2. Wyniki symulacyjne i doświadczenia sprawności separacji układu ciało stałe-ciecz w zmodyfikowanym (ZW5) i standardowym osadniku wirowym (SW) zależnej od obciążenia hydraulicznego dla cząstek ciała stałego o średnicy  $125 \mu\text{m}$



Rys. 3. Wybrane zdjęcia symulacji trajektorii ruchu cząstek ciała stałego o średnicy  $125 \mu\text{m}$  dla różnych konstrukcji osadników wirowych przy obciążeniu hydraulicznym  $15,68 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{/(m}^2\cdot\text{s)]}$ : a) SW b) ZW1, c) ZW2, d) ZW3, e) ZW4, f) ZW5

Wyniki te potwierdziły dane uzyskane z symulacji, gdzie dla wymienionej konstrukcji sprawności separacji cząstek ciała stałego wynosiły odpowiednio 77%, 94% oraz 98%.

Drogi i czas pobytu cząstek ciała stałego w zbiorniku osadnika przedstawiono na rys. 3. Zgodnie z legendą przypisaną do każdego zdjęcia z symulacji, ruch cząstek charakteryzował się dłuższym lub krótszym czasem przebywania, który wyrażono w sekundach.

Kolejność obrazów na rys. 3 prezentuje wybrane, sukcesywne etapy modyfikacji osadnika z przegrodą wzdłużną. Następujące po sobie zmiany konstrukcji skutkowały uzyskaniem coraz wyższych sprawności separacji. Zaobserwowano, że umieszczenie przegrody wzdłużnej w osi zbiornika aparatu powodowało wydłużenie czasu przebywania cząstek wewnątrz separatora i jednocześnie skutkowało intensyfikacją ruchu wirowego, który korzystnie wpływał na wzrost sprawności separacji. W wyniku przeprowadzonych badań dokonano doboru odpowiednich modeli opisujących separację w osadnikach wirowych DPM oraz  $k-\epsilon$ . Doświadczenia potwierdziły słuszność ich zastosowania w procesach separacji w osadnikach wirowych.

## LITERATURA

- Gromiec M., Sadurski A., Zalewski M., Rowiński P., (2014). Zagrożenia związane z jakością wody. *Nauka*, 1, 99-122
- Kruszyński W., (2016). Computer modeling of selected water quality parameters in water distribution systems. *Ecol. Eng.*, 48, 125-129. DOI: 10.12912/23920629/63283
- Ochowiak M., Matuszak M., Włodarczak S., Ancukiewicz M., Gościński A., (2016). Badania sprawności oczyszczania strumienia wód opadowych w osadnikach-piaskownikach wirowych. *Inż. Ap. Chem.*, 55(5), 199-200
- Ochowiak M., Markowska M., Matuszak M., Włodarczak S., (2018). Analiza pracy zmodyfikowanego separatora wirowego. *Inż. Ap. Chem.*, 57(1), 12-13
- Skoczko I., Ofman O., Szatyłowicz E., (2016). Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do modelowania procesu oczyszczania ścieków w małej oczyszczalni ścieków. *Rocznik Ochr. Środ.*, 18, 493-506
- Trębicka A., (2011). Zastosowanie technik informatycznych w pracach dotyczących modelowania i symulacji sieci wodociągowych. *Logistyka – Nauka*, 3, 2845-2853
- Trębicka A., (2016). Modeling of water distribution system parameters and their particular importance in environment engineering processes. *Ecol. Eng.*, 47, 47-53. DOI: 10.12912/23920629/62846

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Poznańskiej 03/32/DSMK/0822.