

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Jan Chmielowski  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu  
Katedra Inżynierii Gazowniczej  
adres: Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
telefon: 12 617 56 44, kom. 698-611-964  
e-mail: krzysztof.chmielowski@agh.edu.pl

Kraków, dnia 05.09.2023 r.

ADMINISTRACJA  
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Wpłynęło dnia 3.10.2023  
Nr 1068 szt. 1

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Guzdką pt. „Badania złóż wielowarstwowych stosowanych w filtrach do uzdatniania wody”

#### 1. Podstawa opracowania

Zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej – Pana dr. hab. inż. Stanisława Rybickiego, nr ŚO.520-728/2023/SMR z dnia 27.06.2023 r.

#### 2. Ogólne omówienie rozprawy

W ramach recenzowanej rozprawy Autor rozprawy doktorskiej podjął się ciekawego i ważnego problemu badawczego związanego z badaniem złóż wielowarstwowych stosowanych w filtrach do uzdatniania wody. Praca zawiera przegląd literaturowy, analizę dostępnych na rynku materiałów filtracyjnych oraz weryfikację obecnie stosowanych rozwiązań w praktyce. Do badań Autor wybrał materiały o różnych uziarnieniach, jak: piasek kwarcowy, antracyt, keramzyt o dużej i małej gęstości właściwej, kruszone szkło filtracyjne, aktywowane szkło filtracyjne AFM, garnet.

Doktorant w ramach rozprawy doktorskiej zrealizował zadania badawcze (będące jednocześnie celem badań), w ramach których:

- Zbadał możliwości stosowania w filtrach wielowarstwowych takich materiałów sypkich jak keramzyt o niskiej i wysokiej gęstości właściwej, szkło kruszone czy garnet i porównanie ich z tradycyjnymi materiałami złóż wielowarstwowych, takimi jak piasek kwarcowy i antracyt.
- Eksperymentalnie zbadał parametry fizyczne wpływające na proces fluidyzacji oraz czas eksploatacji materiałów filtracyjnych: keramzytu o niskiej i wysokiej gęstości właściwej, szkła kruszonego, garnetu oraz piasku kwarcowego i antracytu.

- Dobrał złoża wielowarstwowe przy użyciu badanych nowych materiałów sypkich: keramzytu o niskiej i wysokiej gęstości właściwej, szkła kruszonego, garnetu oraz materiałów tradycyjnych: piasku kwarcowego i antracytu.
- Zbadał wpływ temperatury na ekspansję filtrów jedno i wielowarstwowych zbudowanych z keramzytu o niskiej i wysokiej gęstości właściwej, szkła kruszonego, garnetu oraz piasku kwarcowego i antracytu.
- Eksperymentalnie zbadał straty ciśnienia podczas fluidyzacji analizowanych złóż jedno i wielowarstwowych w różnych temperaturach.
- Zbadał wpływ prędkości płukania na zmianę oporów hydraulicznych i ekspansję zaprojektowanych złóż jedno i wielowarstwowych.
- Zweryfikował metody doboru złóż wielowarstwowych.
- Zweryfikował modele matematyczne do wyznaczania minimalnej prędkości fluidyzacji badanych materiałów filtracyjnych.
- Wyzначył dla badanych materiałów filtracyjnych bezwymiarowe wykładniki  $n$  w modelu matematycznym Richardsona-Zaki opisującym zależność ekspansji od intensywności fluidyzacji.

Praca doktorska Pana mgr inż. Pawła Guzdkę została podzielona na 8 zasadniczych rozdziałów (plus spis literatury, spis tabel, spis rycin). Po spisie treści Autor mógł zamieścić wykaz ważniejszych oznaczeń zastosowanych w pracy co poprawiło by jej czytelność.

Pierwszy rozdział „Wprowadzenie” stanowi ponad trzystronicowe wprowadzenie czytelnika we właściwą tematykę. W rozdziale tym Autor przedstawił tezy pracy oraz cel pracy. Autor przedstawił w tym rozdziale problem naukowy, który zawarł w pracy doktorskiej. Doktorant przedstawił następujące tezy pracy:

- Wybrane materiały filtracyjne, między innymi szkło kruszone, keramzyty niskiej i wysokiej gęstości oraz garnet, charakteryzują się dobrymi właściwościami do zastosowań w złożach wielowarstwowych filtrów pospiesznych, z punktu widzenia płukania wodą (fluidyzacji).
- Wybrane materiały filtracyjne zastosowane w złożach wielowarstwowych pozwalają na uzyskiwanie wysokich efektywności płukania przy relatywnie niskiej intensywności płukania.
- Dobór granulacji materiałów filtracyjnych w oparciu o graniczne prędkości fluidyzacji dla poszczególnych warstw złóż wielowarstwowych pozwala na uzyskiwanie ekspansji niewynoszącej ziaren najbliższych do koryta nad złożem wraz z popłuczynami, a zarazem gwarantuje niemieszanie się warstw złoża i ich efektywne płukanie.
- Dobór wybranych materiałów złóż wielowarstwowych pozwala zminimalizować ilości wody zużywanej podczas płukania, przyjmując możliwie niskie prędkości przepływu w trakcie fluidyzacji.

Doktorant, jako cel pracy podjął się badań w zakresie zjawiska fluidyzacji złóż wielowarstwowych wykorzystywanych w filtrach pospiesznych w procesie uzdatniania wody. Doktorant badaniu poddał klasycznie stosowane materiały kwarcowe i antracytowe oraz nowe materiały filtracyjne, dotąd rzadko eksploatowane w systemach uzdatniania wody, jak garnet, szkło kruszone oraz keramzyt o niskiej i wysokiej gęstości. Doktorant w pracy dokonał analizy

teoretyczno-eksperymentalnej złoż, która dotyczyła hydrauliki filtrów pospiesznych i oceny możliwości wykorzystania w różnych konfiguracjach, wskazanych materiałów w złożach wielowarstwowych. W pracy doktorskiej Autor dokonał modelowania matematycznego fluidyzacji oraz przeprowadził matematyczną weryfikację poprawności doboru złoż wielowarstwowych nowych materiałów filtracyjnych.

Drugi rozdział "Przegląd literatury" stanowi opracowanie zbierające ważniejsze informacje dotyczące poruszanej przez Doktoranta tematyki. Rozdział nie został podzielony przez Autora na żadne podrozdziały i całość materiału zawarta jest w jednym rozdziale. Autor mógł podzielić ten rozdział na kilka podrozdziałów np. budowa filtrów wielowarstwowych, stosowane materiały, wybrane parametry pracy filtrów wielowarstwowych itp. Taki zapis pozwolił by czytelnikowi na szybsze dotarcie do danego materiału pracy. W znacznej części tego rozdziału Autor powołuje się na literaturę zagraniczną oraz krajową. Rozdział ten jest zajmuje 11 stron maszynopisu, co stanowi około 10% całej pracy. Literatura wykorzystana przez Autora rozprawy doktorskiej świadczy o jego zaangażowaniu w poszukiwaniu dostępnych źródeł, co z kolei pozwoliło na przejrzyste nakreślenie problemu, który zamierzał rozwiązać.

W kolejnym, trzecim rozdziale Autor przedstawił metodykę badań. Rozdział ten został starannie przygotowany, jego układ jest czytelny i nie budzi wątpliwości. Metodyka badań przedstawiona w pracy jest odpowiednia i pozwoliła Autorowi na zrealizowanie postawionych celów badawczych. Rozdział ten składa się z 2 zasadniczych części dotyczących: badań wstępnych oraz badań zasadniczych. Metodyka badawcza została opisana i przedstawiona poprawnie.

Rozdział czwarty (Model matematyczny) zawiera trzy zasadnicze podrozdziały. Pierwszym z nich jest rozdział dotyczący metod teoretycznych wyznaczania początku fluidyzacji i prędkości swobodnego opadania ziaren złoża. Drugi podrozdział opisuje model matematyczny ekspansji złoża w funkcji intensywności płukania. Natomiast trzeci podrozdział opisuje teoretyczny dobór złoż wielowarstwowych pod kątem fluidyzacji. W rozdziale Doktorant zastosował liczne wzory w oparciu, o które w dalszej części pracy wykonał obliczenia. Układ rozdziału jest poprawny i nie budzi zastrzeżeń.

Rozdział piąty stanowią wyniki badań laboratoryjnych uzyskane podczas przeprowadzonych przez Autora eksperymentów. Rozdział ten składa się z dwóch podrozdziałów (wyniki wstępnych badań eksperymentalnych oraz wyniki badań eksperymentalnych złoż jednowarstwowych).

Rozdział szósty stanowią wyniki modelowania matematycznego. Rozdział ten składa się z trzech podrozdziałów (wyniki obliczeń początku fluidyzacji i prędkości swobodnego opadania ziaren złoża, wyniki obliczeniowe ekspansji złoża w funkcji intensywności płukania oraz wyniki obliczeniowe doboru złoż wielowarstwowych).

Rozdział siódmy stanowią wyniki badań eksperymentalnych fluidyzacji złoż wielowarstwowych i weryfikacja modeli matematycznych.

Doktorant badał zjawisko fluidyzacji złoż wielowarstwowych wykorzystywanych w filtrach pospiesznych w procesie uzdatniania wody. Autor badaniu poddał klasyczne materiały kwarcowe i antracytowe oraz nowe materiały filtracyjne, dotąd rzadko eksploatowane w systemach uzdatniania wody, jak gamet, szkło kruszone oraz keramzyt o niskiej i wysokiej gęstości. Analiza teoretyczno-eksperymentalna złoż dotyczyła hydrauliki filtrów pospiesznych i oceny możliwości wykorzystania w różnych konfiguracjach, wskazanych materiałów w złożach

wielowarstwowych. Doktorant założył zweryfikowanie parametrów istotnie wpływających na proces płukania. Autor przeprowadził modelowanie matematyczne fluidyzacji oraz przeprowadził matematyczną weryfikację poprawności doboru złóż wielowarstwowych nowych materiałów filtracyjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz dokonanej analizy Doktorant odpowiedział na zakładane tezy pracy. Doktorant stwierdził że:

- Określenie kształtu materiałów filtracyjnych wg klasyfikacji Zingga jest trafnym narzędziem służącym do prawidłowego wyznaczenia geometrii ziaren.
- Opracowana w oparciu o istniejące normy metodyka badania żywotności (ścieralności) złóż filtracyjnych przy użyciu Bębnow Micro-Devala pozwoliła na miarodajne wyznaczenie tego parametru dla wszystkich analizowanych materiałów.
- Wykorzystanie nowych technologii (Analizator AWK 3D) pozwoliło na bardziej precyzyjny pomiar uziarnień analizowanych materiałów i uzyskanie dokładniejszych wyników modelowania.
- Badania procesu płukania złóż filtracyjnych wykazały znaczny wpływ temperatury wody płuczącej na ekspansję złóż przy takich samych intensywnościach fluidyzacji przepływu. Opracowano krzywe zależności ekspansji od intensywności fluidyzacji dla tradycyjnych i proponowanych nowych materiałów porowatych oraz złóż wielowarstwowych stosowanych do filtracji. Krzywe pozwalają ocenić wpływ pór roku na zmiany przebiegu procesu fluidyzacji dla poszczególnych materiałów oraz oszacować korzyści ekonomiczne wynikające z dopasowywania intensywności fluidyzacji do poszczególnych okresów.
- Analiza wpływu zmieniającej się temperatury na opory hydrauliczne wykazała tendencję do zmniejszenia się oporów i tempa ich przyrostu na skutek wzrostu temperatury wody płuczącej. Opracowano krzywe strat ciśnienia dla tradycyjnych i proponowanych nowych materiałów porowatych i złóż wielowarstwowych stosowanych do filtracji w zależności od temperatury i intensywności fluidyzacji. Najniższymi spadkami hydraulicznymi charakteryzowały się jednowarstwowe złoża keramzytu NC 1.5-2.5 i NC 0.8-1.6.
- Analiza możliwości stosowania w filtrach wielowarstwowych badanych materiałów tradycyjnych wykazała zasadność stosowania nowych materiałów filtracyjnych, takich jak keramzyt o wysokiej gęstości czy szkło filtracyjne, ze względu na niższe wartości oporów hydraulicznych, a także wyższą ekspansję w porównaniu z tradycyjnie stosowanym piaskiem kwarcowym. Nowy materiał, taki jak keramzyt o niższej gęstości, może stanowić tańszy zamiennik w złożach wielowarstwowych dla materiału antracytowego ze względu na zbliżone wartości ekspansji i mniejsze opory hydrauliczne i tańszą cenę.
- Szkło kruszone może stanowić zamiennik dla piasku w złożach jedno- i wielowarstwowych, co ma walory ekologiczne.
- Złoże dwuwarstwowe z materiałów sypkich: keramzytu o niskiej i wysokiej gęstości może być stosowane zamiennie dla tradycyjnych złóż dwuwarstwowych piasek, antracyt. Wyniki badań wskazują na niższe koszty eksploatacyjne spowodowane między innymi mniejszą gęstością właściwą keramzytu. Konieczne są jednak kolejne badania tego typu nowych złóż pod kątem efektywności filtracji. Jak dotąd bowiem keramzyt jest

wykorzystywany tylko w jednej stacji uzdatniania wody w Polsce - SUW Wierzchowisko zapewniającej wodę dla miasta Częstochowa, co potwierdza potrzebę poszerzenia badań nad efektywnością filtracji tego materiału.

- Złoże Garnet 0.3-0.6 jest materiałem trudnym do zastosowania jako trzecia, dolna warstwa w złożach wielowarstwowych. Materiał ten wymaga bardzo wysokiej jednorodności uziarnienia w wąskim zakresie średnic, co w warunkach technicznych jest niemal niemożliwe do uzyskania. Z przeprowadzonych obliczeń i obserwacji laboratoryjnych wynika, że dla złożów trój warstwowych istnieje ryzyko wynoszenia drobniejszych frakcji gametu i mieszanie się ich z ziarnami wyższych warstw lub też niewystarczającego płukania frakcji grubszych. W każdej z analizowanych temperatur Garnet 0.3-0.6 uzyskał największą ekspansję spośród badanych materiałów.
- Analizując wyniki badania złoża trój warstwowego zakładającego połączenie materiałów filtracyjnych: GARNET 0.3-0.6 +FILTRALITE® PURE HC 0.5-1.0 + FILTRALITE® PURE NC 0.8-1.6 stwierdzono, że Garnet 0.3-0.6 jako najniższa dolna warstwa złoża dobrze współpracuje z wypełnieniem keramzytowym. W trakcie płukania prędkością zapewniającą złożu trój warstwowemu ekspansję ponad 55%, warstwa granetu i keramzytu nie wymieszały się, potwierdzając poprawność ich doboru.

Na koniec wniosków Doktorant stwierdza, że otrzymane w pracy wyniki uzupełniają lukę w badaniach teoretycznych i eksperymentalnych nać. wykorzystaniem keramzytu, szkła kruszonego i gametu w złożach wielowarstwowych. Dostarczają nowych danych o wpływie temperatury na zmianę oporów hydraulicznych złoża w procesie fluidyzacji. Przeprowadzone badania pozwoliły również na określenie parametrów empirycznych, na podstawie których można dokonać modelowania matematycznego fluidyzacji analizowanych materiałów filtracyjnych, zarówno w złożach jedno-, jak i w wielowarstwowych. Uzyskane wyniki mają znaczenie teoretyczne i praktyczne dla badanego problemu. Należy zgodzić się z tym stwierdzeniem i uznać że wyniki zawarte w pracy Doktoranta są ważne i pozwalają na zastosowanie ich w praktyce.

Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant w sposób poprawny odpowiedział na problem postawiony w celu pracy. Wnioski są rzetelne i wynikają z przeprowadzonych prac badawczych. Należy dążyć do kontynuowania badań w tym zakresie na innych obiektach, co pozwoli w przyszłości wykorzystać wyniki w praktyce.

Doktorant odpowiedział na sformułowane w celu pracy tezy badawcze:

- Wybrane materiały filtracyjne, między innymi szkło kruszone, keramzyty niskiej i wysokiej gęstości oraz garnet, charakteryzują się dobrymi właściwościami do zastosowań w złożach wielowarstwowych filtrów pospiesznych, z punktu widzenia płukania wodą (fluidyzacji).
- Wybrane materiały filtracyjne zastosowane w złożach wielowarstwowych pozwalają na uzyskiwanie wysokich efektywności płukania przy relatywnie niskiej intensywności płukania.
- Dobór granulacji materiałów filtracyjnych w oparciu o graniczne prędkości fluidyzacji dla poszczególnych warstw złożów wielowarstwowych pozwala na uzyskiwanie ekspansji niewynoszącej ziaren najlżejszych do koryta nad złożem wraz z popłuczynami, a zarazem gwarantuje niemieszanie się warstw złoża i ich efektywne płukanie.

- Dobór wybranych materiałów złoź wielowarstwowych pozwala zminimalizować ilości wody zużywanej podczas płukania, przyjmując możliwie niskie prędkości przepływu w trakcie fluidyzacji.

### **3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne o charakterze merytorycznym i edytorskim**

Recenzent po zapoznaniu się z rozprawą doktorską ma następujące uwagi:

1. W pracy zdarzają się niedociągnięcia językowe i interpunkcyjne, które na etapie druku manuskryptu należy poprawić.
2. Brak tabulacji przy niektórych akapitach.
3. W moim odczuciu Doktorant pisząc wnioski z pracy, w pierwszej kolejności powinien odnieść się do odpowiedzi na postawione w pracy tezy. Odpowiedzi te są we wnioskach jednak powinny być one zawarte w pierwszej kolejności a dalej powinny być przedstawione wnioski pochodne. Autor może to poprawić przed oddaniem pracy do druku.
4. Proponuje się przed drukiem maszynopisu podzielić przegląd literatury na kilka podrozdziałów co poprawi czytelność tego rozdziału.
5. Zaleca się przed publikacją pracy wprowadzić na początku pracy wykaz symboli i oznaczeń z opisem.
6. Do rozdział związanych z prezentacją wyników badań można dopisać informację o dyskusji tych wyników. Albo przed drukiem pracy wydzielić osobny rozdział i przenieść odpowiednie akapity związane z dyskusją wyników badań.

Powyższe uwagi mają charakter edycyjny i nie wpływają znacząco na merytoryczną wartość pracy, którą oceniam wysoko.

W tym miejscu chciałem zadać Panu Doktorantowi kilka pytań:

- w jaki sposób zamierza przenieść wyniki badań uzyskane w trakcie realizacji pracy doktorskiej do skali technicznej (np. na inne obiekty),
- jak by sformułował warunki eksploatacyjne do potencjalnych eksploatorów SUW w terenie, aby w pełni wykorzystać opracowany materiał badawczy.
- jak wyglądają aspekty ekonomiczne zastosowania opracowanych rozwiązań.

### **4. Wniosek końcowy**

Według opinii Recenzenta, rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Guzdko jest wnikliwym i cennym opracowaniem podjętego problemu badawczego. Doktorant osiągnął zamierzony cel pracy. Autor rozprawy doktorskiej wykazał się odpowiednim przygotowaniem teoretycznym i praktycznym. Wykazał się znajomością współczesnej literatury dotyczącej tematu pracy oraz umiejętnością planowania i prowadzenia badań naukowych. Autor pokazał, że potrafi właściwie wykonać zamierzone cele badawcze oraz prawidłowo i wnikliwie zinterpretować uzyskane

wyniki badań. Pan Paweł Guzdek ubiega się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Biorąc pod uwagę zaprezentowaną powyżej pozytywną ocenę osiągnięć Doktoranta stwierdzam, że Jego praca pt. „**Badania złóż wielowarstwowych stosowanych w filtrach do uzdatniania wody**” spełnia warunki określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dlatego wnioskuję o jego przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Pawła Guzdeka do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej.

Kraków, dnia 05.09.2023 r.

  
.....  
Prof. dr hab. inż. Krzysztof Chmielowski

