

Joanna JEŻ-WALKOWIAK

Politechnika Poznańska

## PARAMETRY GRANULOMETRYCZNE ZŁÓŻ FILTRACYJNYCH W PROJEKTOWANIU I EKSPLOATACJI FILTRÓW POSPIESZNYCH

### GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF FILTER BEDS IN DESIGNING AND EXPLOITATION OF HIGH-RATE FILTERS

*The role of granulometric parameter of filtration material in proper rapid filter design procedure is emphasized in the paper. The method of verifying the granulometry of filtration material based on the granulometric similarity are presented.*

#### 1. Wprowadzenie

Granulometria ziaren złóż filtracyjnych należy do podstawowych parametrów charakteryzujących złoża filtracyjne i wpływa w zasadniczy sposób na proces filtracji, a w szczególności na efekty uzdatniania wody. Granulometria ziaren kwalifikuje je do układów polidispersyjnych. Wielkość ziarna kulistego może być jednoznacznie wyznaczona przez pomiar średnicy. Jednak ziarna złóż filtracyjnych nie mają tak wygodnej geometrii, przez co pojęcie ich wielkości nie jest tak jednoznaczne jak ziaren kulistych. Wielkość ziaren o kształcie odbiegającym od kuli może być określona na podstawie definicji operacyjnej wynikającej z metodyki pomiaru. Materiały filtracyjne stosowane jako złoża filtrów pospiesznych składają się z ziaren frakcji piaskowej, a ich wielkość jest mierzona metoda analizy sitowej. W metodzie tej segreguje się (rozdziela się) ziarna całego materiału filtracyjnego w szereg bardziej jednorodnych wymiarowo frakcji, za pomocą sit o znanych wielkościach oczek. Ocena wielkości ziaren materiałów filtracyjnych metodą analizy sitowej jest podstawowym działaniem:

- \* warunkującym precyzyjną identyfikację uziarnienia złóż filtracyjnych w fazie badań procesu filtracji,
- \* umożliwiającym monitoring – kontrolę uziarnienia zakupionego materiału filtracyjnego, poprzedzający zasypywanie komór filtrów pospiesznych, gwarantując tym samym właściwą granulometrię złóż filtracyjnych.

Stosowane obecnie procedury postępowania w fazie rozruchu nowych zakładów uzdatniania wody i/lub w fazie modernizacji filtrów pospiesznych, w tym wymiany złóż filtracyjnych, na ogół nie zapewniają starannego doboru materiałów filtracyjnych

o pożądaną precyzję uziarnienia złożeń filtracyjnych. Działania te są szczególnie istotne przy dużych inwestycjach, w których projektowanie filtrów pospiesznych poprzedzają badania pilotowe mające na celu dobór optymalnego uziarnienia złożeń filtracyjnych w aspekcie kryteriów technologicznych i ekonomicznych. Tematyka dotycząca znaczenia precyzyjnego doboru uziarnienia złożeń filtracyjnych w projektowaniu oraz w eksploatacji jest przedmiotem niniejszej pracy.

## 2. Parametry granulometryczne złożeń filtracyjnych

Analiza sitowa jest bez wątpienia najprostszą laboratoryjną metodą pomiaru wielkości ziaren próbki materiału filtracyjnego. Należy jednak zauważyć, iż podkreślana wyżej prostota analizy sitowej jest złudna. W rzeczywistości teoria przesiewania z jej złożonymi oddziaływaniami między ziarnami różnych wymiarów podczas ich próby przejścia przez otwory w sicie jest poznana w bardzo małym stopniu. Poza tym jest rzeczą niemożliwą wyprodukować sito doskonałe. Czynną częścią sit są bowiem siatki, które wytwarza się różnymi sposobami (konstrukcja siatki) wpływającymi na zdolność przesiewającą siatki. Nie wnikając jednak w całą złożoność teorii przesiewania należy podkreślić podstawowe zalety analizy sitowej w tym:

- \* precyzyjność i odtwarzalność wyników pod warunkiem używania sit będących w dobrym stanie oraz stosowania standardowej metody pomiaru,
- \* niskie koszty aparatury, jej dużą wytrzymałość, prostotę w użyciu i konserwacji.

Geometrię ziaren złożeń filtracyjnych charakteryzują:

- \* wymiary i ich rozkład,
- \* kształt,
- \* powierzchnia i objętość.

Metoda analizy sitowej polega na przesiewaniu materiału filtracyjnego przez szereg sit o stopniowo malejących oczkach. Dokonana w ten sposób analiza frakcyjna umożliwia określenie pełnej charakterystyki wymiarowej, tj. masowego składu frakcyjnego poprzez przyporządkowanie udziałów masowych poszczególnych frakcji (materiału filtracyjnego) rozdzielanych przez sita, wymiarom określonym wielkością oczek tych sit. Wielkość oczka sita, przez które przeszły ziarna frakcji zatrzymanej z kolei na sicie następnym, określa wymiar ziaren tej frakcji. W interpretacji geometrycznej ziaren o kształtach izometrycznych uważa się, iż jest to drugi co do wielkości wymiar ziarna – leżący w przedziale między jego wymiarem minimalnym i maksymalnym. Wyniki analizy sitowej można zestawić w tabelach, jednak częściej przedstawia się je w formie wykresów, jako **Krzywe Składu Granulometrycznego** – KSG (rys. 1). Najprostszym wykresem, zwanym **histogramem składu granulometrycznego** (rys. 1a), jest wykresem słupowym przedstawiającym **Udział Procentowy** (UP) poszczególnych frakcji ziaren w materiale filtracyjnym, za pomocą szeregu pionowych prostokątów o jednakowej szerokości – określającej zakres zmian wielkości ziaren w obrębie materiału filtracyjnego. Jeżeli będziemy zwiększać ilość frakcji segregujących to w skrajnym – hipotetycznym przypadku zamiast histogramu otrzymamy krzywą ciągłą, tzw. **krzywą różnicową** (lub krzywą gęstości) **składu granulometrycznego** (rys. 1a). Innym wygodnym graficznym przedstawieniem wyników analizy sitowej jest **histogram sumowy (kumulacyjny) składu**

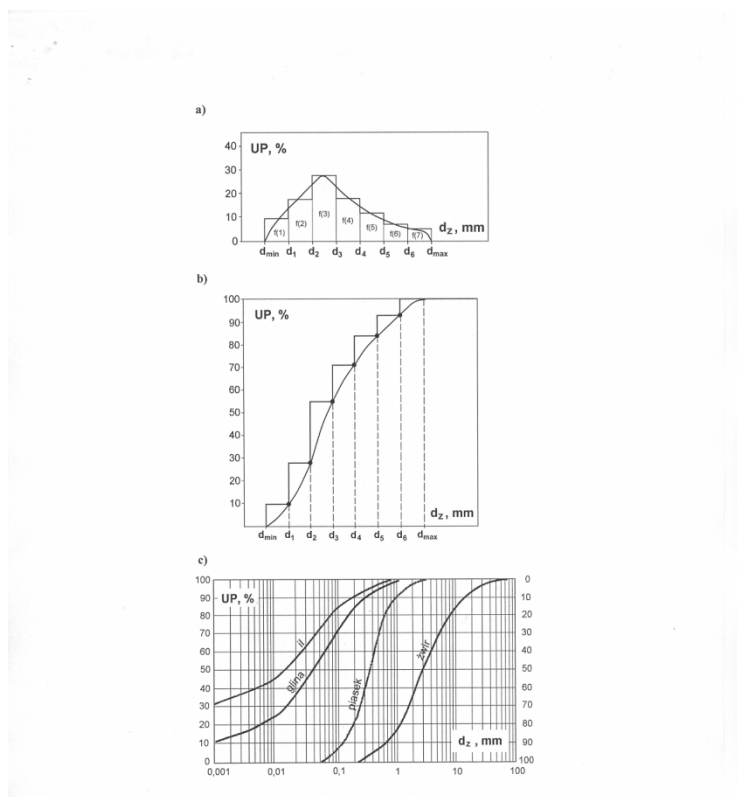
**granulometrycznego** materiału filtracyjnego przedstawiony na rys. 1b. W histogramie sumowym wysokość prostokąta każdej frakcji następnej jest sumą wysokości prostokąta tej frakcji oraz wysokości prostokątów wszystkich frakcji poprzednich. Zatem wysokość prostokąta każdej frakcji w tym histogramie obejmuje także sumę udziałów wszystkich poprzednich frakcji o mniejszych ziarnach. Stąd też wysokość prostokąta ostatniej frakcji, będąca sumą wysokości prostokątów wszystkich frakcji, określa całkowity względny ich udział w materiale filtracyjnym równy jedności lub 100% (rys. 1b). Również i histogram sumowy przez zmniejszenie szerokości prostokątów i zwiększenie ich liczby zdąży – jako do granicy – do krzywej ciągłej będącej statystycznym analogiem dystrybuanty, stąd też nazywanej **dystrybuantą empiryczną** składu granulometrycznego materiału filtracyjnego (rys. 1b). Na rys. 1c przedstawiono przykładowo dystrybuanty empiryczne składu granulometrycznego czterech materiałów ziarnistych o różnej dyspersji w tym: iłu, gliny, piasku i żwiru. Przedstawiono je na płaszczyźnie półlogarytmicznej, zwanej też siatką semilogarytmiczną, w której na osi odciętych w skali logarytmicznej podano wartości średnic ziaren –  $d_z$ , z kolei na osi rzędnych w skali dziesiętnej – arytmetycznej, podano udziały procentowe – UP poszczególnych frakcji tych materiałów. Przedstawienie na osi opisującej średnice ziaren w skali logarytmicznej jest bardzo praktyczne, ponieważ znaczna rozpiętość wartości średnic ziaren tych materiałów bardzo wydłużyłaby te wykresy, gdyby oś odciętych wykonano w skali arytmetycznej.

Celem wnioskowania statystycznego w badaniach uziarnienia złóż filtracyjnych jest poznanie rozkładu i wartości średnic ziaren materiału filtracyjnego badanej próbki będącej modelem całego złoża. Dlatego też wyniki analizy sitowej próbki materiału filtracyjnego w fazie ich interpretacji najczęściej nanosi się na **siatki statystyczne** zwane też płaszczyznami statystycznymi. Działanie to daje możliwość graficznego sprawdzenia zgodności rzeczywistego rozkładu wartości średnic ziaren tego materiału z założonym hipotetycznie rozkładem, mającym swój wyraz w skali funkcyjnej osi rzędnej siatki, wyznaczonej przez dystrybuantę hipotetycznego rozkładu. Jeżeli wyniki analizy sitowej po naniesieniu na siatkę statystyczną utworzą linię prostą, to świadczy to o zgodności ich rozkładu z rozkładem prawdopodobieństwa dla którego zbudowano siatkę. W badaniach piasków filtracyjnych korzystamy z **siatki logarytmiczno – normalnej**, w której liniowy (lub w przybliżeniu liniowy) przebieg ich KSG wskazuje na dystrybuantę rozkładu lognormalnego (rys.2). Siatkę logarytmiczno – normalną tworzą dwie rodziny wzajemnie prostopadłych prostych, określonych skalami przyjętymi na osiach układu współrzędnych. Na osi odciętej ( $d_z$ , mm) jest to skala logarytmiczna, na osi rzędnej (UP, %) – skala funkcyjna, wyznaczona przez dystrybuantę rozkładu normalnego (rys. 2). Doświadczalna ocena uziarnienia piasków filtracyjnych, oparta na całej KSG jest na ogół w końcowych konkluzjach i wnioskach z badań oraz w praktyce inżynierskiej, zastępowana wartościami parametrów i frakcji odzwierciedlających istotne właściwości tego uziarnienia (tabl.1). Do parametrów tych zaliczamy:

- \*  $d_{10}$  – **średnicę miarodajną**, zwaną też wymiarem czynnym,
- \* **WR** = **współczynnik równomierności uziarnienia**.

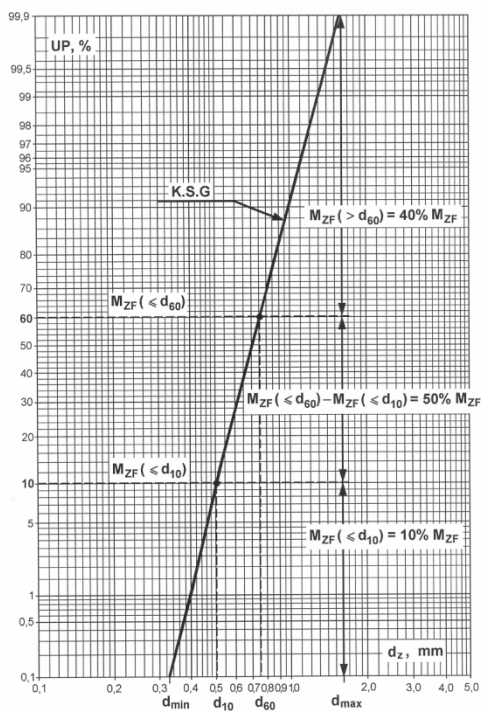
**Średnica miarodajna ( $d_{10}$ )** to średnica takiego ziarna, którego udział masowy wraz z ziarnami mniejszymi w materiale filtracyjnym wynosi 10%, stąd też średnicę tę wyznacza punkt przecięcia KSG (dystrybuanta empiryczna) z rzędną UP = 10%. Genezą przyjęcia  $d_{10}$  za średnicę miarodajną jest równość przepuszczalności polidispersyjnego materiału filtracyj-

nego o określonej KSG i przepuszczalności monodispersyjnego materiału filtracyjnego złożonego wyłącznie z ziarna o średnicy  $d_{10}$  wyznaczonej z w/w KSG.



Rys. 1. Krzywe składu granulometrycznego (KSG)  
 a) Histogram i różnicowa krzywa składu granulometrycznego,  
 b) Histogram sumowy i krzywa składu granulometrycznego,  
 c) Krzywe składu granulometrycznego układów o różnej dyspersji

Fig. 1. Granulometric curves



Rys.2. Struktura granulometryczna złóż filtracyjnych

Fig. 2. Granulometric structure of filtration material

Tab. 1. Charakterystyki granulometryczne złóż filtracyjnych

Tab. 1. Characteristics of filtration materials granulometry

Parametry i wskaźniki granulometryczne	Fracje granulometryczne
1. $d_{10}$	1. $d_z \leq d_{10} \Rightarrow M_{ZF}(\leq d_{10}) = 0,10 M_{ZF}$
2. $d_{60}$	2. $d_{10} < d_z \leq d_{60} \Rightarrow M_{ZF}(\leq d_{60}) - M_{ZF}(< d_{10}) = 0,50 M_{ZF}$
3. $\frac{d_{60}}{d_{10}}$	3. $d_z > d_{60} \Rightarrow M_{ZF}(> d_{60}) = 0,40 M_{ZF}$

$M_{ZF}$  – masa złoża filtracyjnego.

**Współczynnik równomierności** jest definiowany ilorazem:

$$WR = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

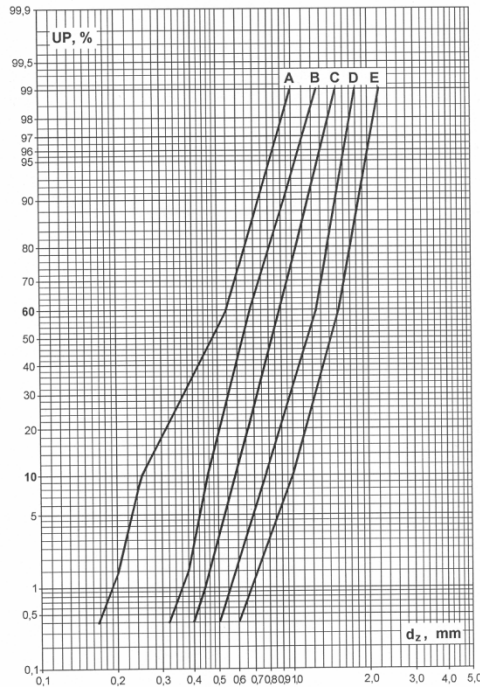
w którym  $d_{60}$  jest średnicą ziarna mającego udział masowy wraz z ziarnami mniejszymi w materiale filtracyjnym równy 60%. Współczynnik równomierności interpretuje się jako liczbowy wskaźnik rozkładu wartości średnic ziaren materiału filtracyjnego.

Zastosowanie parametrów  $d_{10}$  i WR do oceny uziarnienia piasków filtracyjnych jest ograniczona warunkami:

$$0,1 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 3,0 \text{ mm},$$

$$1,0 \leq WR \leq 5,0,$$

które są w pełni spełnione w rozwiązaniach procesu filtracji w zakładach uzdatniania wody. Na rys. 3 przedstawiono na siatce logarytmiczno – normalnej przykładowe charakterystyki granulometryczne stosowanych złóż filtracyjnych.



Rys.3. Przykłady charakterystyk granulometrycznych eksploatowanych złóż filtracyjnych. A – Filtry powolne, B – Filtry pospieszne po koagulacji płukane wodą, C – Filtry pospieszne po koagulacji płukane powietrzem i wodą, D – Filtry pospieszne oddzielające i odmanganiające wody podziemne (małe i średnie stężenie Fe i Mn), E – Filtry pospieszne oddzielające i odmanganiające wody podziemne (duże stężenie Fe i Mn).

Fig. 3. Examples of granulometric characteristics of operated filtration materials.

### 3. Weryfikacja uziarnienia złoża na podstawie podobieństwa granulometrycznego złóż filtracyjnych

Materiały filtracyjne klasyfikują się do materiałów ziarnistych frakcji piaskowej, polidispersyjnych o wielkości ziaren od ok. (0,2 ÷ 0,3) mm do ok. (2,0 ÷ 2,5) mm. Ocena **podobieństwa geometrycznego** ziaren piasku opiera się na **kryteriach podobieństwa ich wymiarów, kształtu oraz chropowatości** (mikrostruktury) **powierzchni zewnętrznej**. Ziarna piasku są geometrycznie identyczne gdy ich podstawowe wymiary (długość, szerokość, grubość), kształt oraz chropowatość są jednakowe. W praktyce inżynierskiej **podobieństwo geometryczne złóż filtracyjnych opiera się na identyczności ich**

**Krzywych Składu Granulometrycznego – KSG.** To kryterium podobieństwa nie uwzględnia kształtu ziaren ani chropowatości ich powierzchni. Jednak w sytuacji gdy porównywane materiały filtracyjne pochodzą z tego samego źródła (np. ta sama kopalnia piasku) można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć iż ich ziarna mają podobny kształt i chropowatość powierzchni. Z kolei stwierdzenie podobieństwa geometrycznego dwóch materiałów filtracyjnych mineralogicznie różnych określone identycznością ich KSG powinno być interpretowane ostrożnie, ponieważ nie musi ono prowadzić do **podobieństwa charakterystyk hydraulicznych jak i efektów technologicznych złóż filtracyjnych** wykonanych z tych materiałów. Z identyczności KSG dwóch materiałów filtracyjnych wynikają warunki podobieństwa geometrycznego tych materiałów określone równością ich parametrów i wskaźników granulometrycznych. Złoża filtracyjne:  $ZF_1, ZF_2, \dots, ZF_n$  są do siebie geometrycznie podobne jeżeli spełniają **kryteria podobieństwa granulometrycznego**:

$$\begin{aligned}
 \text{KP - I} & \quad (d_{10})_{ZF1} = (d_{10})_{ZF2} = \dots = (d_{10})_{ZF_n}, \\
 \text{KP - II} & \quad (d_{60})_{ZF1} = (d_{60})_{ZF2} = \dots = (d_{60})_{ZF_n}, \\
 \text{KP = III} & \quad \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right)_{ZF1} = \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right)_{ZF2} = \dots = \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right)_{ZF_n}, \\
 \text{KP = IV} & \quad \left[ \frac{M_{ZF}(\leq d_{10})}{M_{ZF}} \right]_{1,2,\dots,n} : \left[ \frac{M_{ZF}(\leq d_{60}) - M_{ZF}(\leq d_{10})}{M_{ZF}} \right]_{1,2,\dots,n} : \\
 & \quad : \left[ \frac{M_{ZF}(> d_{60})}{M_{ZF}} \right]_{1,2,\dots,n} = 1 : 5 : 4
 \end{aligned}$$

Kryteria KP – I, KP – II, KP – III mają charakter podstawowy, natomiast kryterium KP – IV jest wtórne (wynikowe) mające jednak istotne znaczenie operacyjne.

Charakterystyki struktury złóż filtracyjnych przedstawione na rys. 2 i w tabl. 1 określają metodę sprawdzania i weryfikacji uziarnienia materiałów filtracyjnych przed wypełnieniem zbiorników filtrów pospiesznych w końcowej fazie realizacji inwestycji.

Procedurę weryfikacji uziarnienia otrzymanego materiału filtracyjnego nazwanego – **piaskiem zamawianym (PZ)** w odniesieniu do uziarnienia optymalnego tegoż materiału filtracyjnego (określonego doświadczalnie) nazwanego **złożem filtracyjnym (ZF)** przedstawiono na rys. 4, w tabl. 2 oraz na rys. 5.

Parametry granulometryczne złoża filtracyjnego (ZF):  $(d_{10})_{ZF} = 0,50$  mm,  $(d_{60})_{ZF} = 0,75$  mm,

podzieliły piasek zamawiany (PZ) na trzy podstawowe frakcje:

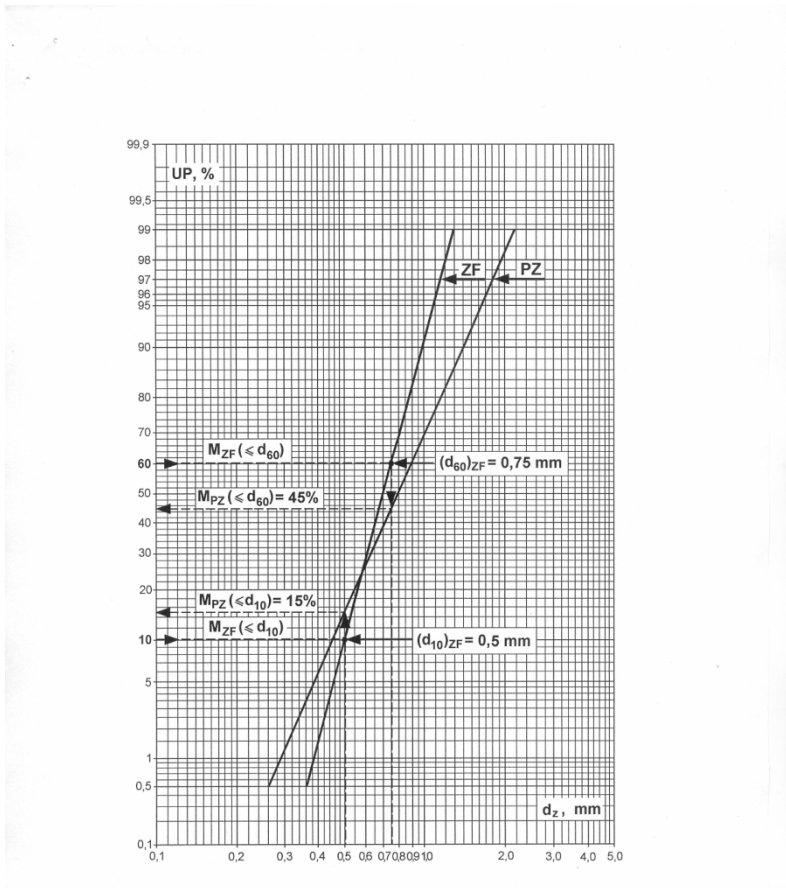
- \* pierwszą frakcję – I F(PZ) do 0,50 mm wynoszącą 15%  $M_{PZ}$ ,
- \* drugą frakcję – II F(PZ) od 0,50 mm do 0,75 mm, której udział w całej masie (PZ) wyniósł 30%  $M_{PZ}$ ,
- \* trzecią frakcję – III F(PZ) pow. 0,75 mm obejmującą 55%  $M_{PZ}$ .



Kryteria podobieństwa granulometrycznego piasków (ZF) i (PZ) pozwalają na wykorzystanie (rys. 5):

- \* **6%  $M_{PZ}$  z frakcji pierwszej** i odrzucenie 9%  $M_{PZ}$  z tej frakcji o uziarnieniu poniżej 0,44 mm (rys.5),
- \* **30%  $M_{PZ}$  z frakcji drugiej** – to jest pełne jej wykorzystanie,
- \* **24%  $M_{PZ}$  z frakcji trzeciej** i odrzucenie 31%  $M_{PZ}$  tej frakcji o uziarnieniu powyżej 1,00 mm

Przedstawione rozważania (rys. 4, tabl. 2, rys. 5) prezentują metodę modyfikacji uziarnienia PZ celem osiągnięcia podobieństwa do uziarnienia ZF opartego na kryteriach podobieństwa granulometrycznego. Aby jednak tego dokonać, trzeba dla otrzymania każdego 1 m<sup>3</sup> piasku zmodyfikowanego granulometrycznie zamówić ok. 1,7 m<sup>3</sup> (PZ).



Rys.4. Ocena przydatności piasku zamawianego (PZ) jako złoża filtracyjnego (ZF).

Fig. 4. Evaluation of commercial sand material (PZ) in comparison to filtration material with optimal granulometry.

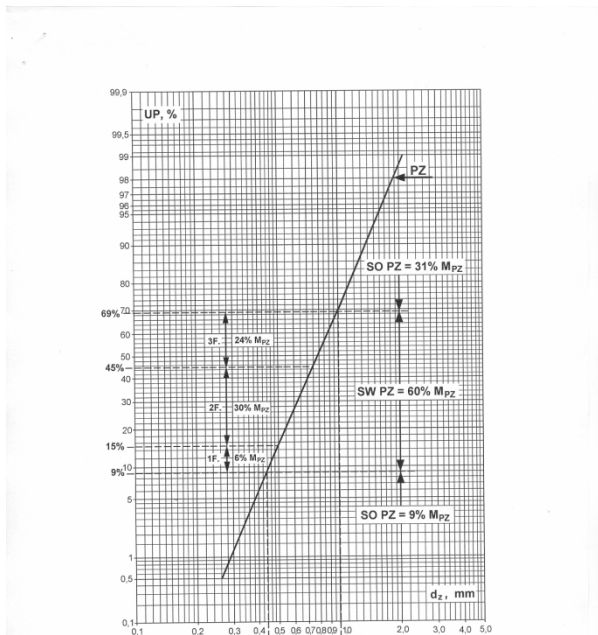
Tab. 1. Procedura weryfikacji uziarnienia materiału filtracyjnego PZ

Tab. 1. Procedure of commercial sand verification.

Sekwencja postępowania	Założenie metodyczne / działanie operacyjne	Wynik postępowania
1 krok	<b>KP – I:</b> $(d_{10})_{PZ} = (d_{10})_{ZF} = 0,50 \text{ mm}$	$M_{PZ} (\leq (d_{10})_{ZF} = 0,50 \text{ mm}) = 15\% M_{PZ}$
2 krok	<b>KP – II:</b> $(d_{60})_{PZ} = (d_{60})_{ZF} = 0,75 \text{ mm}$	$M_{PZ} (\leq (d_{60})_{ZF} = 0,75 \text{ mm}) = 45\% M_{PZ}$ $M_{PZ} (> (d_{60})_{ZF} = 0,75 \text{ mm}) = 55\% M_{PZ}$
3 krok	$M_{PZ} (\leq (d_{60})_{ZF}) - M_{PZ} (\leq (d_{10})_{ZF}) = 30\% M_{PZ}$	<b>II F(PZ) od 0,5 mm do 0,75 mm</b> $SW \text{ II F(PZ)} = 30\% M_{PZ}$
4 krok	<b>KP – IV:</b> $\frac{SW \text{ I F(PZ)}}{SW \text{ II F(PZ)} = 30\% M_{PZ}} = \frac{1}{5}$ $SW \text{ I F(PZ)} = 30\% M_{PZ} \cdot \frac{1}{5} = 6\% M_{PZ}$	<b>I F(PZ) do 0,5 mm</b> $SW \text{ I F(PZ)} = 6\% M_{PZ}$ $SO \text{ I F(PZ)} = (15\% - 6\%) M_{PZ} = 9\% M_{PZ}$
5 krok	<b>KP – IV:</b> $\frac{SW \text{ II F(PZ)} = 30\% M_{PZ}}{SW \text{ III F(PZ)}} = \frac{5}{4}$ $SW \text{ III F(PZ)} = 30\% M_{PZ} \cdot \frac{4}{5} = 24\% M_{PZ}$	<b>III F(PZ) powyżej 0,75 mm</b> $SW \text{ III F(PZ)} = 24\% M_{PZ}$ $SO \text{ III F(PZ)} = (55\% - 24\%) M_{PZ} = 31\% M_{PZ}$
6 krok	$SW \text{ (PZ)}:$ $SW \text{ I F(PZ)} + SW \text{ II F(PZ)} + SW \text{ III F(PZ)} = 60\% M_{PZ}$	<b>SW (PZ) = 60% M<sub>PZ</sub></b> $SO \text{ (PZ)} = SO \text{ I F(PZ)} + SO \text{ III F(PZ)} = 40\% M_{PZ}$

Objaśnienia:

I F(PZ), II F(PZ), III F(PZ) – pierwsza, druga, trzecia frakcja piasku zamawianego  
SW, SO – stopień wykorzystania, stopień odrzucenia



Rys. 5. Ocena przydatności piasku zamawianego (PZ) jako złoża filtracyjnego (ZF). Modyfikacja struktury granulometrycznej PZ określona wymaganiami ZF.

Fig. 5. Evaluation of commercial sand material (PZ) in comparison to filtration material with optimal granulometry. Modification of commercial sand granulometry according to filtration material requirements.

#### 4. Wniosek końcowy

Wzrost wymagań stawianych wodzie do spożycia wynikający z ostatnich Rozporządzeń Ministra Zdrowia prowadzi do intensyfikacji technologii uzdatniania wody na polskich wodociągach. Dotyczy to w szczególności filtrów pospiesznych, w których intensyfikację efektów można osiągnąć poprzez bardziej staranny dobór parametrów procesowych w tym rodzaju i granulometrii złożeń filtracyjnych oraz parametrów ich płukania. W niniejszej pracy przedstawiono metodę weryfikacji uziarnienia złoża filtracyjnego opartą na podobieństwie granulometrycznym. Właściwy dobór i weryfikacja parametrów uziarnienia złożeń filtracyjnych umożliwia osiągnięcie założonych celów procesu filtracji.

## **Bibliografia**

- [1] A. L. Kowal, M. M. Sozański, Podstawy doświadczalne systemów oczyszczania wód, Wyd. Pol. Wr., Wrocław 1977.
- [2] Z. Heidrich i inni, Urządzenia do uzdatniania wody, Arkady, Warszawa 1987.
- [3] A.W.W.A., Water Treatment Plant Design, Mc Graw – Hill Publishing Company, New York 1990.