

**Ryszard Drożdżak\*, Kazimierz Twardowski\*\***

## **BADANIA WODOPRZEPUSZCZALNOŚCI GRUNTÓW SPOISTYCH NA PODSTAWIE METODY KACZYŃSKIEGO\*\*\***

### **1. WSTĘP**

Właściwości filtracyjne gruntów mają podstawowe znaczenie przy inżyniersko-geologicznej i hydrogeologicznej ocenie terenu [7, 9]. W zagadnieniach inżyniersko-geologicznych wielokrotnie są one brane pod uwagę przy współpracy układu obiekt inżynierski–podłoże budowlane. Szczególnie wykorzystuje się je przy ocenie warunków filtracji:

- w rejonach osi i przyczółków budowli piętrzących,
- warstw uszczelniających zbiorników wodnych, a także składowisk odpadów,
- odwodnień kopalń odkrywkowych, obiektów budowlanych, także stateczności zboczy.

W celu wykonania planowanych w Katedrze Inżynierii Naftowej Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH badań laboratoryjnych dotyczących wpływu chemizmu wody na wodoprzepuszczalność gruntów powstała konieczność wyboru odpowiedniej metody pomiarowej w odniesieniu do gruntów spoistych. Uwzględniając istotne ograniczenia finansowo-techniczne, zdecydowano się na wybór prostej i taniej metody pomiaru współczynnika filtracji z wykorzystaniem przyrządu Kaczyńskiego [4, 6].

### **2. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO WG METODY KACZYŃSKIEGO**

Przyrząd Kaczyńskiego, schemat którego przedstawiono na rysunku 1, został zaprojektowany przez R. Kaczyńskiego [6]. Stosowany był do badania współczynnika filtracji gruntów słaboprzepuszczalnych i półprzepuszczalnych [6, 7].

---

\* Doktorant Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

\*\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\*\* Praca wykonana w ramach badań własnych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH

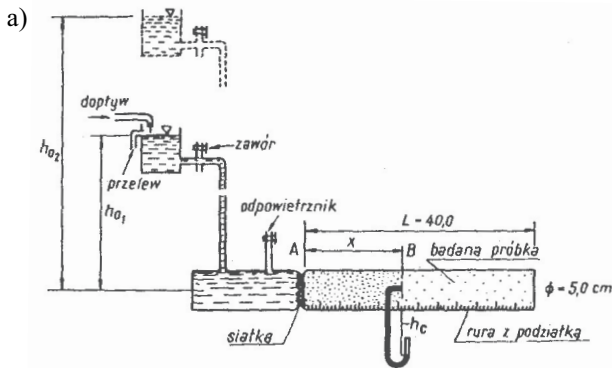
Replikę przyrządu wykonano, stosując materiały oferowane przez firmę Masters z Gdyni, która jest przedstawicielem firmy GEORG FISCHER zajmującej się produkcją armatury z tworzyw sztucznych oraz aparaturą kontrolno-pomiarową.

W wyniku tych działań zostało zbudowane stanowisko pomiarowe z gotowych elementów dostępnych w katalogu firmy GEORG FISCHER. Elementy urządzenia starano się wykonać, dbając o zachowanie wymiarów pierwowzoru, szczególnie w odniesieniu, do średnicy i długości rury pomiarowej [6]. Do wiadomości czytelnika podano tylko ogólną metodykę działania przyrządu, gdyż jego szczegółowy opis zamieszczono w pracy [4]. Obliczenie współczynnika filtracji  $K$  w cm/s wymaga zastosowania wzoru w postaci:

$$K = \frac{0,00834n \cdot (m_2 - m_1)}{(h_{o2} - h_{o1})} \quad (1)$$

gdzie:

- $K$  – współczynnik filtracji,
- $n$  – porowatość,
- $m_2, m_1$  – nachylenia prostych wyznaczonych doświadczalnie,
- $h_{o2}, h_{o1}$  – ciśnienia przy dwóch różnych położeniach zbiornika.



**Rys. 1.** Przyrząd Kaczyńskiego do oznaczania współczynnika filtracji gruntów spoistych [4, 6]:  
a) schemat przyrządu; b) widok przyrządu na stanowisku badawczym

### 3. CHARAKTERYSTYKA ZAŁOŻEŃ TEORETYCZNYCH DOTYCZĄCYCH BADAŃ WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI METODĄ KACZYŃSKIEGO

Założenia teoretyczne odnoszące się do badania wodoprzepuszczalności gruntów spoistych mają ścisły związek z tematem pracy doktorskiej: *Wpływ chemizmu filtrującej wody na mierzoną wartość przepuszczalności gruntów*, która jest obecnie realizowana na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie.

Dobór metody badawczej, wyselekcjonowany grunt spoisty o małej przepuszczalności oraz chemizm roboczych roztworów są powiązane z założeniami teoretycznymi, związanymi z wpływem zjawisk fizykochemicznych określonych wodnych roztworów soli (szczególnie podwójnej warstwy elektrycznej PWE) o zróżnicowanych stężeniach oraz wartościowościach jonów na zmianę właściwości filtracyjnych gruntów spoistych.

Znajomość teorii podwójnej warstwy elektrycznej ma zasadnicze znaczenie dla zrozumienia istoty zjawisk fizykochemicznych zachodzących na granicy rozdziału faz stałej i ciekłej, czyli na granicy kontaktu szkieletu gruntowego z roztworem wodnym soli wypełniającym pory gruntu.

Jakościowo-ilościowa charakterystyka podwójnej warstwy elektrycznej w sposób istotny wpływa na kształtowanie się fizycznych i mechanicznych właściwości gruntów spoistych takich jak: granice konsystencji, pęcznienie, rozmakanie, porowatość, opór gruntu na ścinanie, ściśliwość oraz wodoprzepuszczalność [5, 13]. Niezmiernie ważnym zjawiskiem opisującym PWE jest elektrokinetyczny potencjał dzeta  $\zeta$ , który może być traktowany jako spadek potencjału elektrycznego w warstwie dyfuzyjnej PWE [2, 5]. Odgrywa on zasadniczą rolę w zjawiskach elektrokinetycznych takich, jak elektroforeza, elektroosmoza, potencjał przepływu i potencjał sedymentacji [11].

Na podstawie wartości potencjału elektrokinetycznego można wnioskować o następujących cechach badanego gruntu [5, 14]: ładunek elektryczny powierzchni cząstek, kształt i wymiary porów, skład kationów wymiennych, stężenie elektrolitu.

#### 3.1. Założenia dotyczące badań wpływu podwójnej warstwy elektrycznej na prędkość filtracji w gruntach spoistych

Według założeń teoretycznych definiuje się grubość podwójnej warstwy elektrycznej jako funkcję wartościowości przeciwjonów  $z_j$ , stężenia elektrolitu, stałej dielektrycznej i temperatury. W warunkach temperatury pokojowej i molarnego stężenia elektrolitu ( $c$ ) można te zależności opisać następującym równaniem [2]:

$$l = \frac{1}{3 \cdot 10^7 z_j \sqrt{c}} \quad (2)$$

gdzie  $l$  – grubość warstwy podwójnej.

Z równania (2) oraz praw rządzących podwójną warstwą elektryczną wynika, że:

W miarę wzrostu stężenia roztworu następuje kompresja warstwy podwójnej, w wyniku czego wzrastają siły przyciągania – maleją opory filtracji, a co za tym idzie powinien wzrastać współczynnik filtracji.

Przy niskim stężeniu roztworu tworzy się warstwa podwójna o większej grubości, co powoduje wzrost sił odpychania – wzrastają opory filtracji, co powinno skutkować spadkiem wartości współczynnika filtracji.

Dodatkowo grubość podwójnej warstwy elektrycznej zależna jest także od wartościowości jonów, co oznacza, że dla tych samych stężeń grubość warstwy podwójnej jest istotnie większa w przypadku roztworów jednowartościowych niż roztworów dwuwartościowych; wynika z tego, iż wartość współczynnika filtracji w przypadku roztworu jednowartościowego przy identycznej koncentracji będzie mniejsza w porównaniu z roztworem dwuwartościowym.

Ważną rolę odgrywa również pH środowiska; gdy pH wzrasta, rośnie ładunek ujemny powierzchni cząstek, co powoduje dyspersję, gdy natomiast pH maleje, następuje stopniowa redukcja ładunku powierzchni cząstki i grunt ma tendencję do flokulacji.

#### **4. BADANIA WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI TESTOWEGO MODELU GRUNTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM PRZYRZĄDU KACZYŃSKIEGO**

##### **4.1. Dobór modelu gruntowego wykorzystanego w badaniach**

Do pomiarów współczynnika filtracji w badaniach testowych z wykorzystaniem przyrządu Kaczyńskiego po licznych badaniach próbnych zdecydowano się wykorzystać materiał gruntowy produkowany przez Zakłady Kruszywa w Nieznanowicach, pochodzący z końcowej linii produkcyjnej i stanowiący materiał odpadowy służący do zamulania nieczynnych wyrobisk. Starano się wybierać materiał o jak najmniejszej zawartości frakcji piaskowej; po wstępnej analizie granulometrycznej słabo przepuszczalny grunt modelowy wg normy gleboznawczej PN-98/R-04033 scharakteryzowano jako pył.

Pod względem geologicznym złożę, z którego pochodzi analizowany grunt, leży w obrębie zapadliska przedkarpackiego. Stanowią je utwory czwartorzędowe budujące nadzalewowy taras akumulacyjny rzeki Raby; w podłożu zalegają trzeciorzędowe ciemnopieliate iły miocenijskie.

##### **4.2. Dobór roztworów soli użytych do badań**

Do badań zmian współczynnika filtracji pod wpływem zróżnicowania chemizmu filtrującej wody użyte zostały najczęściej występujące w wodach podziemnych sole chlorkowe oraz siarczanowe (w późniejszym etapie badań uwzględnione będą także sole trójwartościowe żelaza lub glinu).

Do badań eksperymentalnych zostały wykorzystane roztwory chlorku sodu NaCl, potocznie zwanego „solą kuchenną”, oraz chlorku wapnia CaCl<sub>2</sub>.

Pomiary przeprowadzono dla trzech stężeń roztworów: 1 mol/l, 0,1 mol/l oraz 0,01 mol/l. Taki dobór stężeń w przybliżeniu odzwierciedla zmienność wód podziemnych ze względu na ich mineralizację: od słodkich aż po wody słone przy stężeniach bliskich 1 mol/l [9].

Do badań współczynnika filtracji przyrządem Kaczyńskiego została wykorzystana również woda destylowana scharakteryzowana pod względem czystości wg normy ISO 3696-1987 (PN-91/C-06510) jako woda laboratoryjna o jakości 3, czyli o pH w granicach 5–7,5; maksymalne przewodnictwo elektryczne do 5 μS dla temperatury 25°C (w odniesieniu do normy amerykańskiej ASTM można ją zaliczyć do typu IV).

### 4.3. Wyniki badań

Wstępne badania współczynnika filtracji dla wody destylowanej zostały wykonane dla 25 próbek w celu wiarygodnej oceny wartości średniej oraz przedziału ufności, a także weryfikacji otrzymanych wyników pod względem występowania ewentualnych błędów grubych.

Badano także wyniki pod względem typu ich rozkładu; wynika to stąd, iż statystyczne metody weryfikacji błędów grubych zakładają, że mamy do czynienia z rozkładem normalnym lub logarytmiczno-normalnym.

Wszystkie badane próbki gruntu modelowego wykazują współczynnik filtracji poniżej  $5,000E-08$  m/s, czyli wg klasyfikacji różnych autorów [7, 9] należą one do skał półprzepuszczalnych. Ocena punktowa wartości średniej współczynnika filtracji wynosi  $3,064E-08$  m/s. Natomiast ocena przedziałowa wartości średniej dla 95% przedziału ufności wynosi od  $2,682E-08$  do  $3,445E-08$  m/s.

W odniesieniu do liczebności próby statystycznej w przypadku badań z wykorzystaniem wodnych roztworów soli wynosi ona 8 powtórzeń (przypadek wnioskowania statystycznego wg próby małej).

Otrzymane wyniki zweryfikowano, podobnie jak w przypadku wody demineralizowanej, pod względem występowania błędów grubych. Obliczono również wartości średnie i oszacowano przedziały ufności dla średnich (wcześniej zbadano także wyniki pod względem typu ich rozkładu statystycznego).

Uzyskane wyniki badań współczynnika filtracji w przypadku roztworów NaCl i CaCl<sub>2</sub> zamieszczono w tabelach 1 i 2, natomiast ich porównanie przedstawiono na rysunku 2.

**Tabela 1**

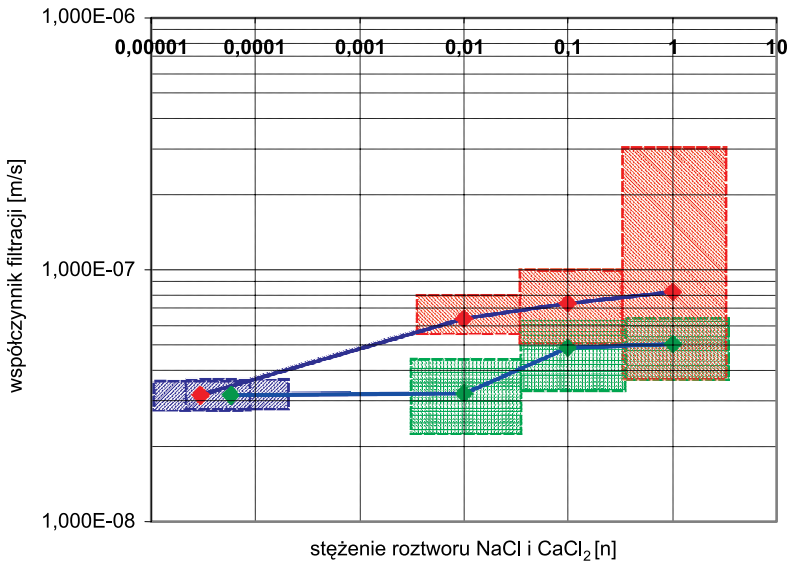
Zestawienie porównawcze wyników badań przyrządem Kaczyńskiego testowego modelu gruntowego dla różnych stężeń soli NaCl



| Metoda Kaczyńskiego<br>Współczynnik filtracji K [m/s]<br>NaCl | Stężenie<br>[0,01 mol/l] | Stężenie<br>[0,1 mol/l] | Stężenie<br>[1 mol/l] |
|---|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Próbka 1  | –                        | –                       | –                     |
| Próbka 2  | –                        | 7,686E-08               | –                     |
| Próbka 3  | 3,196E-08                | 3,006E-08               | 5,228E-08             |
| Próbka 4  | 4,736E-08                | 4,724E-08               | 3,633E-08             |
| Próbka 5  | 4,010E-08                | 4,151E-08               | 4,961E-08             |
| Próbka 6  | 3,063E-08                | 5,125E-08               | 6,365E-08             |
| Próbka 7  | 2,658E-08                | 4,953E-08               | 5,698E-08             |
| Próbka 8  | 1,854E-08                | 4,842E-08               | 4,856E-08             |
| Średnia   | 3,253E-08                | 4,927E-08               | 5,124E-08             |
| Odchylenie standardowe  | 1,012E-08                | 1,414E-08               | 9,167E-09             |
| Górna granica przedziału ufności                              | 4,403E-08                | 6,485E-08               | 6,214E-08             |
| Dolna granica przedziału ufności                              | 2,103E-08                | 3,368E-08               | 4,033E-08             |

**Tabela 2**

Zestawienie porównawcze wyników badań przyrządem Kaczyńskiego testowego modelu gruntowego dla różnych stężeń soli  $\text{CaCl}_2$

| Metoda Kaczyńskiego<br>Współczynnik filtracji K [m/s]<br>$\text{CaCl}_2$ | Stężenie<br>[0,01 mol/l] | Stężenie<br>[0,1 mol/l] | Stężenie<br>[1 mol/l] |
|--|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Próbka 1   | –                        | 1,221E-07               | 1,020E-07             |
| Próbka 2   | –                        | –                       | –                     |
| Próbka 3   | 6,640E-08                | 4,882E-08               | 2,512E-08             |
| Próbka 4   | 7,635E-08                | 7,953E-08               | 1,661E-07             |
| Próbka 5   | 6,885E-08                | 8,931E-08               | 4,985E-08             |
| Próbka 6   | 6,237E-08                | 5,782E-08               | 5,922E-08             |
| Próbka 7   | 5,817E-08                | 6,249E-08               | 8,635E-08             |
| Próbka 8   | 5,232E-08                | 6,098E-08               | 8,926E-08             |
| Średnia  | 6,408E-08                | 7,444E-08               | 8,256E-08             |
| Odchylenie standardowe   | 9,492E-09                | 2,711E-08               | 5,216E-08             |
| Górna granica przedziału ufności   | 7,366E-08                | 9,884E-08               | 1,295E-07             |
| Dolna granica przedziału ufności   | 5,449E-08                | 5,003E-08               | 3,561E-08             |



-  – oszacowane przedziały ufności dla średniej, roztwory NaCl o różnych stężeniach
-  – oszacowane przedziały ufności dla średniej, roztwory  $\text{CaCl}_2$  o różnych stężeniach

**Rys. 2.** Wykres porównawczy wartości współczynnika filtracji w zależności od zmian stężenia roztworów NaCl oraz  $\text{CaCl}_2$

## 5. PODSUMOWANIE

Metoda opisana i zastosowana przez R. Kaczyńskiego [6] może być wykorzystana w badaniach gruntów, szczególnie gruntów spoiстых, gdzie istotny wpływ na filtrację wody mają zjawiska molekularno-powierzchniowe. Metodę wybrano ze względu na nieskomplikowany charakter samego pomiaru; dodatkowo przyrząd oraz sama procedura pomiarowa są stosunkowo tanie.

Przeprowadzone pomiary współczynnika filtracji przyrządem Kaczyńskiego wykazują, że istnieje duża porównywalność uzyskiwanych wyników z innymi metodami badawczymi, co przemawia za dalszym prowadzeniem badań z wykorzystaniem tego przyrządu.

Przedstawione wyniki pomiarów współczynnika filtracji pokazują, że wybrany grunt modelowy jest adekwatny do oczekiwań. Wyniki badań w przypadku przedstawionego modelu ( $K = 3,064E-08$  m/s) spełniają założenia modelowe dotyczące wartości współczynnika filtracji  $K < 10E-07$  m/s.

W ramach eksperymentu przeprowadzono badania dotyczące dwóch wodnych roztworów soli NaCl i CaCl<sub>2</sub> przy ich trzech różnych stężeniach. Przeprowadzone badania pozwalają sformułować określone wnioski:

- potwierdza się teza, iż w przypadku soli jednowartościowych współczynnik filtracji jest mniejszy w stosunku do soli dwuwartościowych;
- wraz ze wzrostem stężenia roztworów NaCl i CaCl<sub>2</sub> wartości współczynnika filtracji rosną;
- analiza statystyczna wyników pomiarów współczynnika filtracji w przypadku wody destylowanej wykazała stosunkowo wąski przedział ufności 0,95; można stwierdzić, że średni współczynnik filtracji w przypadku wody destylowanej jest nie mniejszy niż  $2,682 \cdot 10^{-8}$  m/s i nie większy niż  $3,445 \cdot 10^{-8}$  m/s;
- obliczone przedziały ufności dla średniej wartości współczynnika filtracji w przypadku roztworów soli NaCl posiadają zróżnicowane przedziały wartości; dla stężenia 0,01n częściowo pokrywają się one z przedziałem średniej w przypadku wody destylowanej, natomiast dla stężeń 0,1n oraz 1n częściowo pokrywają się ze sobą;
- przedziały ufności dla średniej wartości współczynnika filtracji w przypadku roztworów soli CaCl<sub>2</sub> posiadają również zróżnicowane zakresy; można zaobserwować wzrost szerokości przedziału wraz ze wzrostem stężenia roztworu, przy czym szerokość przedziału dla roztworu 1n jest największa i znacznie odbiega od pozostałych;
- różnice szerokości statystycznych przedziałów ufności dla średniej współczynnika filtracji pomiędzy wodą destylowaną a roztworami wodnymi soli przede wszystkim wynikają z różnych liczebności prób (dla wody  $n = 25$ , natomiast dla roztworów soli  $n = 8$ ).

Na zróżnicowanie przedziałów ufności ma także wpływ dokładność metody, jak również trudności uzyskania jednorodnego o identycznej konsolidacji gruntu w runie pomiarowej przed pomiarem.

## LITERATURA

- [1] Birdi K.S.: *Handbook of Surface and Colloid Chemistry*. CRS Press, Boca Raton, New York 1997
- [2] Das B.M.: *Advanced Soil Mechanics*. Taylor & Francis Group, London/New York 2008
- [3] Delgado Á.V.: *Interfacial Electrokinetics and Electrophoresis*. Marcel Dekker, Inc, New York/Basel 2002
- [4] Drożdżak R.: *Przyrząd i metoda Kaczyńskiego do oznaczania współczynnika filtracji gruntów*. „Wiertnictwo Nafta Gaz” (półrocznik AGH) 2007, t. 24, z. 1
- [5] Grabowska-Olszewska B. (red. nauk.): *Metody badań gruntów spoistych*. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1980
- [6] Kaczyński R.: *Oznaczanie współczynników filtracji gruntów słabo przepuszczalnych, półprzepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych*. „Przegląd Geologiczny” 1969, nr 10
- [7] Kozerski B.: *Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych. Wytyczne określania współczynnika filtracji metodami pośrednimi i laboratoryjnymi*. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1977
- [8] Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J.: *Laboratoryjne i terenowe oznaczanie współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych*. Wyd. Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Poznań 1998
- [9] Pazdro Z.: *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1977
- [10] Plewa M., Plewa S.: *Petrofizyka*. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1992
- [11] Ryncarz T.: *Zarys fizyki górotworu*. Śląskie Wyd. Techniczne, Katowice 1993
- [12] Twardowski K., Drożdżak R.: *Uwarunkowania dotyczące laboratoryjnych metod oznaczania wodoprzepuszczalności gruntów*. „Wiertnictwo Nafta Gaz” (półrocznik AGH) 2007, t. 24, z. 1
- [13] Twardowski K., Traple J.: *Charakterystyka ilościowa porowatości ośrodków gruntowo-skalnych a zjawiska molekularno-powierzchniowe*. „Wiertnictwo Nafta Gaz” (rocznik AGH) 2006, t. 23/1
- [14] Zloževskaja R.I.: *Sviazanaja voda w glinistych gruntach*. Izd. Moskovskogo Uniwersyteta, 1969