ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Katarzyna GĄSIOREK*
Politechnika Śląska

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPŁYWU WODY W KAPILARNO – POROWATYCH MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

Streszczenie. W pracy przedstawione zostały wyniki własnych badań laboratoryjnych współczynnika przepływu wody, zrealizowanych na dwóch przykładowych materiałach budowlanych, zaliczających się do materiałów o strukturze kapilarno – porowatej. Doświadczenia przeprowadzono techniką grawimetryczną w warunkach izotermicznych. Uzyskane wyniki porównane zostały z danymi literaturowymi, co pozwoliło stwierdzić przydatność zastosowanej metody do badań, w miejscach gdzie skomplikowane byłoby zastosowanie kosztownej aparatury laboratoryjnej.

DETERMINE OF COEFFICIENT OF WATER FLOW IN CAPILLARY-POROUS BUILDING MATERIALS

Summary. In the presented paper were experimental determined coefficients of water flow in capillary – porous building materials. Experiment investigated by the gravimetrical method in isothermal conditions establishing one-dimensional flux. Received results were compared with scientific literature data, what allow certify their correctness.

1. Wprowadzenie

Jedną z głównych przyczyn powodujących obniżenie wartości użytkowych oraz trwałości przegród budowlanych jest zawilgocenie materiałów, z których przegrody te zostały wykonane. Wilgoć zawarta w materiale prowadzi do jego chemicznej i biologicznej korozji, zmniejsza opór cieplny, powoduje narastanie uszkodzeń mechanicznych, co w konsekwencji może stworzyć spore zagrożenie, a nawet straty gospodarcze.

Dzięki znajomości odpowiednich parametrów materiałowych możliwe jest zaprojektowanie najodpowiedniejszej przegrody, stosownie do warunków, w których będzie ona pełniła założoną funkcję. Jednym z takich parametrów jest współczynnik przepływu wody.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Adam Zybura, prof. Politechniki Śląskiej

2. Model matematyczny

Transport wilgoci w materiałach budowlanych modeluje się zwykle wykorzystując bilans masy wody, przy założeniu że jest ona cieczą nieściśliwą. W takim przypadku za punkt wyjścia przyjmuje się równanie ciągłości wilgoci w fazie ciekłej:

$$\rho_l \frac{\partial W_l}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) + R_{vl} \tag{1}$$

gdzie:

ρ_l – gęstość objętościowa wody, [kg/m^3],
W_l – koncentracja objętościowa wody, [m^3/m^3],
t – czas, [s],
v_l – prędkość przepływu wody, [m/s],
R_{vl} – szybkość przemiany fazowej pary wodnej w wodę, [kg/(s·m^3)].

Prędkość strumienia wody w izotropowym materiale kapilarno – porowatym można modelować następującym równaniem konstytutywnym:

$$\mathbf{v}_l = k_{eff} \nabla p_c \tag{2}$$

gdzie:

k_{eff} – efektywny współczynnik przepuszczalności wody przez materiał, [kg/(m·s·Pa)],
p_c – ciśnienie kapilarne, [Pa].

Napięcie powierzchniowe wody zależy od temperatury bezwzględnej materiału, a krzywizna menisku od zawartej w nim wody. Zatem w warunkach izotermicznych:

$$\nabla p_c = \left.\frac{\partial p_c}{\partial W_l}\right|_T \nabla W_l \tag{3}$$

gdzie:

T – temperatura, [K].

Definiując współczynnik podlegający wyznaczaniu eksperymentalnemu jako:

$$D_l = -k_{eff} \left.\frac{\partial p_c}{\partial W_l}\right|_T \tag{4}$$

gdzie:

D_l – współczynnik przepływu wody, [m^2/s]

oraz korzystając z równania (3), a także uwzględniając właściwości materiału kapilarno – porowatego i zakładając ponadto, że temperatura materiału jest stała, zapisujemy (2) po dodatkowym przemnożeniu przez gęstość objętościową wody, w postaci:

$$\mathbf{j}_l = -\rho_l D_l \nabla W_l \tag{5}$$

gdzie:

j_l – gęstość strumienia masy wody, [kg/(s·m^2)].

Ta uproszczona postać wektora gęstości strumienia wody oraz przyjęcie, że w materiale nie występują żadne przemiany fazowe ($R_{vl} = 0$), a przepływ jest jednowymiarowy, pozwala przedstawić równanie (1) jako:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_l \frac{\partial W_l}{\partial x} \right) \tag{6}$$

gdzie:

x – grubość próbki materiału, [mm].

Wprowadzając transformatę Boltzmanna $b=x/t^{0,5}$, można sprowadzić równanie różniczkowe cząstkowe (6) do równania różniczkowego zwyczajnego:

$$-\frac{b}{2}\frac{dW_l}{db} = \frac{d}{db}\left(D_l \frac{dW_l}{db} \right) \tag{7}$$

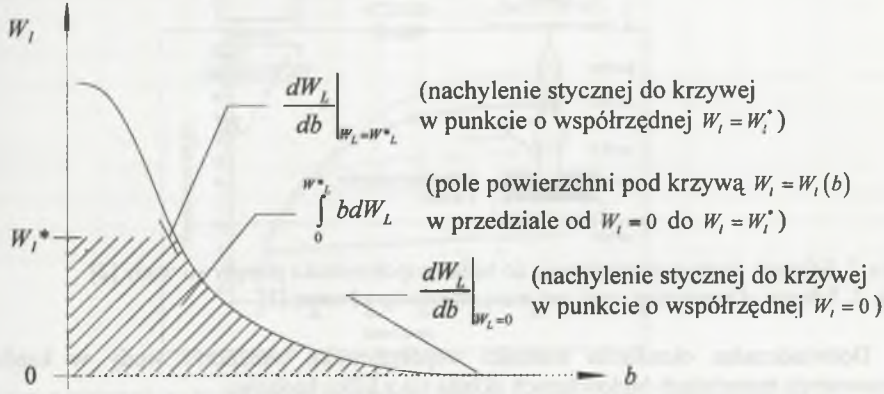
gdzie:

b – transformata Boltzmanna, [m/√s].

Następnie równanie to należy scałkować w przedziale od $W_l = 0$ do $W_l = W_l^*$:

$$-\frac{1}{2}\int_0^{W^*_l} b\frac{dW_l}{db}db = \int_0^{W^*_l} \frac{d}{db}\left(D_l \frac{dW_l}{db} \right)db \tag{8}$$

gdzie W^*_l jest pewną, ustaloną zawartością wody w materiale. Wykonując odpowiednie działania matematyczne, uzyskuje się trzy wyrażenia, które można zinterpretować geometrycznie, co przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Interpretacja geometryczna równania (8) ([2])
Fig. 1. Geometrical interpretation of equation (8) ([2])

Wykorzystując uzyskane zależności, po dalszych przekształceniach otrzymujemy końcowe wyrażenie, które określa postać współczynnika przepływu wody w materiale kapilarno – porowatym uzależnionego od ilości wody w nim zawartej [2]:

$$D_l\left(W_l^*\right) = -\frac{1}{2}\frac{1}{\left.\frac{dW_l}{db}\right|_{W_l^*}}\int_0^{W_l^*} b\,dW_l \tag{9}$$

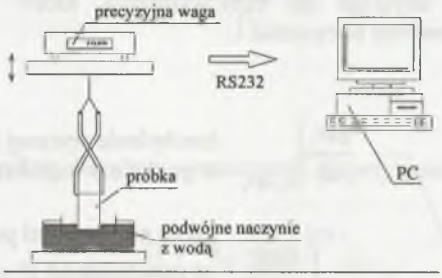
Jednocześnie forma takiego zapisu stanowi dogodną bazę do wyznaczania poszukiwanej wartości na drodze eksperymentalnej.

3. Technika pomiaru

Doświadczenie przeprowadzono techniką grawimetryczną [1] w warunkach izotermicznych, a poddawane analizie próbki poszczególnych materiałów przechowywane były w taki sposób, aby ich stan można było scharakteryzować jako powietrzno suchy.

Zestaw pomiarowy wykorzystywany do wyznaczania współczynnika transportu kapilarnego wody składa się z komputera PC, precyzyjnej wagi (o dokładności 0,002 g) oraz naczynia utrzymującego stały poziom wody. Schemat zestawu pomiarowego przedstawia rysunek 2.

Analizowana próbka materiału, której powierzchnia boczna została uprzednio zaizolowana, została podwieszona do wagi elektronicznej za pomocą samozaciskowego uchwytu w taki sposób, aby jej kontakt z powierzchnią wody zapewniał jednowymiarowy przepływ. Stanowisko doświadczalne poprzez połączenie z komputerem umożliwia ciągły pomiar i zapis masy próbki w dowolnie ustalonych odstępach czasu. Dzięki temu może ono służyć do badania przepływu kapilarnego w materiale w czasie rzeczywistym.



Rys. 2. Schemat zestawu pomiarowego do badań współczynnika przepływu wody [2]
Fig. 2. Scheme of measuring set to test mass diffusivity of water [2]

Doświadczalne określenie wartości współczynnika transportu wody w kapilarno – porowatych materiałach budowlanych składa się z kilku kroków:

1. przygotowania trzech serii próbek o grubościach od 10 mm do 50 mm (wycinanych zazwyczaj z beleczki 40/40/160 mm),
2. zaizolowania powierzchni bocznej próbek, umożliwiającego przyjęcie postulatu o przepływie jednowymiarowym,

3. przeprowadzenia badania eksperymentalnego, powtarzanego trzykrotnie dla każdej serii, mającego na celu określenie ilości zaadsorbowanej wody w poszczególnych próbkach przy założeniu, że 1 g wody ma objętość 1 cm^3,
4. określenia względnej zawartości wilgoci w funkcji zmiennej **Boltzmanna**, odnośnie do tzw. objętości reprezentatywnej V_{local}, na podstawie wzoru:

$$W_l(x,t) = \frac{V_l(x+10,t) - V_l(x,t)}{V_{local}} \tag{10}$$

gdzie:

V_l – objętość wody, [mm^3],

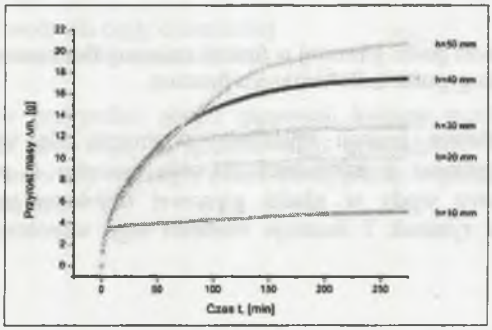
5. uśrednienia czterech, otrzymanych w poprzednim punkcie, wykresów względnej zawartości wilgoci w funkcji zmiennej **Boltzmanna**,
6. opisania uzyskanych wartości średnich odpowiednią funkcją, charakteryzującą się przebiegiem zilustrowanym na rysunku 1,
7. wyznaczenia wartości współczynnika przepływu wody zgodnie z równaniem (9).

4. Wyniki badań doświadczalnych

Eksperymentowi poddane zostały dwa kapilarno – porowate materiały, stosowane powszechnie w budownictwie: gładź gipsowa o gęstości objętościowej 1400 [kg/m^3] oraz cegła ceramiczna pełna o gęstości objętościowej 1750 [kg/m^3].

Gładź gipsowa

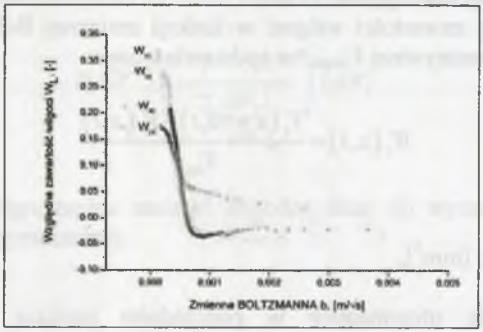
Końcowy efekt pomiarów laboratoryjnych analizowanych próbek gładzi gipsowej stanowią wykresy przyrostów masy w funkcji czasu dla kolejnych grubości wycinków, co zostało zaprezentowane na rysunku 3.



Rys. 3. Krzywe adsorpcji wody dla gładzi gipsowej
Fig. 3. Curves of water adsorption for gypsum

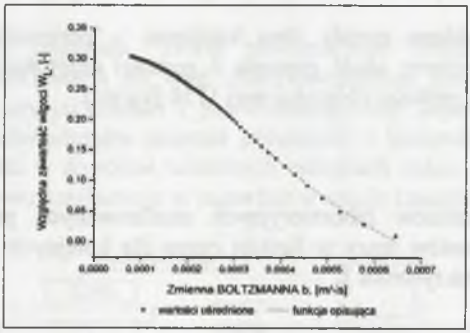
Po wyznaczeniu względnej zawartości wilgoci dla poszczególnych próbek materiału, na podstawie wzoru (10), uzyskuje się kolejne wykresy, w których odcięte stanowią

poszczególne wartości funkcji zmiennej **Boltzmanna** dla odpowiednich grubości wycinków i czasu pomiaru, co obrazuje rysunek 4.



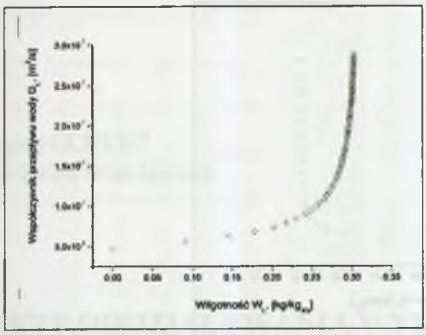
Rys. 4. Zawartość wilgoci w gładzi gipsowej dla poszczególnych wycinków w funkcji zmiennej **Boltzmanna**
Fig. 4. Contents of water in gypsum for particular slices in **Boltzmann's** function

Z uśrednienia powyższych wykresów otrzymuje się zbiór wartości (przedstawionych na kolejnym rysunku za pomocą punktów), które należy opisać odpowiednią krzywą o charakterze przedstawionym na rysunku 1. Funkcja opisująca uzyskane wartości średnie została naszkicowana na poniższym wykresie jako linia ciągła.

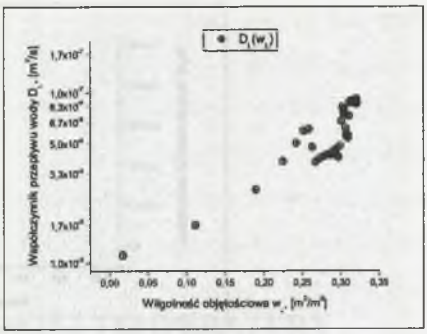


Rys. 5. Zawartość wilgoci dla gładzi gipsowej w funkcji zmiennej **Boltzmanna**
Fig. 5. Contents of water in gypsum in **Boltzmann's** function

Następnie na podstawie funkcji opisującej wyznacza się wartości współczynnika przepływu wody, korzystając z zależności (9). Na rysunku 6 przedstawiono wartości współczynnika przepływu wody w gładzi gipsowej uzyskane na podstawie własnych doświadczeń, natomiast rysunek 7 ilustruje wartości tego współczynnika uzyskane przez Marynowicza w [2].



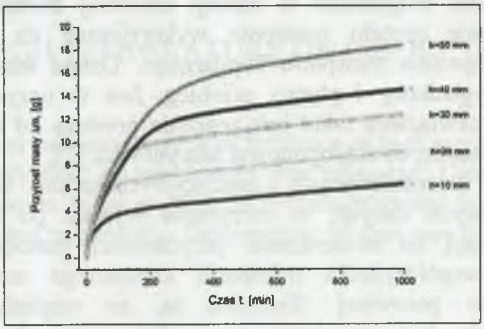
Rys. 6. Współczynnik przepływu wody w gładzi gipsowej
Fig. 6. Mass diffusivity of water in gypsum



Rys. 7. Współczynnik przepływu wody w gładzi gipsowej wg [2]
Fig. 7. Mass diffusivity of water in gypsum according to [2]

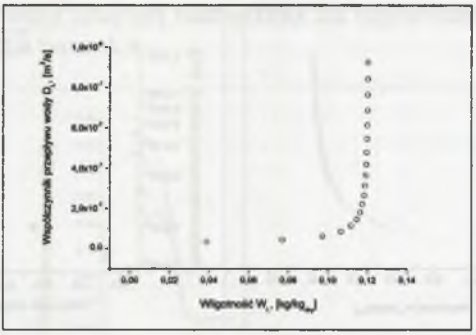
Cegła ceramiczna pełna

Wyniki uzyskane z doświadczeń eksperymentalnych dla próbek z cegły ceramicznej stanowią podstawę do stworzenia wykresu przyrostów mas w funkcji czasu dla kolejnych grubości wycinków, co obrazuje kolejny rysunek.



Rys. 8. Krzywe adsorpcji wody dla cegły ceramicznej
Fig. 8. Curves of water adsorption for ceramic brick

Analogicznie jak w przypadku gładzi gipsowej, kolejne przekształcenia uzyskanych doświadczalnie danych pozwalają w konsekwencji przedstawić wartość poszukiwanego współczynnika przepływu wody dla cegły ceramicznej pełnej w postaci graficznej, co zostało zaprezentowane na rysunku 9.



Rys. 9. Współczynnik przepływu wody w cegle ceramicznej
Fig. 9. Mass diffusivity of water in ceramic

5. Podsumowanie

Porównując wykresy przedstawione na rysunkach 6 i 7, można zauważyć znaczną różnicę ich charakterów, którą determinuje rozmaitość technik opracowania wyników oraz uśrednianie uzyskiwanych w poszczególnych etapach wartości obliczeniowych. W niniejszej pracy otrzymane wartości wilgotności w funkcji zmiennej **Boltzmanna** zostały opisane funkcją, której równanie zostało następnie wykorzystane do wyznaczenia wartości poszukiwanego współczynnika transportu kapilarnego. Dzięki temu przedstawiony przez autorkę wykres ma wygładzony i płynny przebieg. Jest to oczywiście skutek pewnego uśrednienia, jednakże rozwiązanie takie jest znacznie prostsze od konieczności obliczania średniej pochodnej w punkcie, co zaproponował Marynowicz [2].

Choć istnieje wiele zaawansowanych i precyzyjnych technik badawczych oraz metod opracowywania uzyskanych danych, to otrzymane wyniki, po konfrontacji z danymi literaturowymi, pozwalają na stwierdzenie przydatności metody grawimetrycznej do szacowania wartości współczynnika transportu kapilarnego materiałów budowlanych o strukturze kapilarno – porowatej. Technika ta, ze względu na swoją prostotę i ekonomiczność, może być przydatna tam, gdzie niemożliwe jest wykorzystanie kosztownego sprzętu laboratoryjnego.

LITERATURA

1. Goual M.S., De Barquin F., Benmalek M. L., Bali A., Queneudec M.: Estimation of the capillary transport coefficient of Clayey Aerated Concrete using a gravimetric technique, Cement and Concrete Research, Vol. 30, Pergamon 2000.
2. Marynowicz A.: Analiza zawilgocenia materiałów i przegród budowlanych, praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Wyrwał