

Ćwiczenie 5

SZACOWANIE WSPÓŁCZYNNIKA PAROPRZEPUSZCZALNOŚCI MATERIAŁÓW POROWATYCH

5.1. Podstawy teoretyczne

Prawie wszystkie materiały stosowane w budownictwie, zarówno pochodzenia naturalnego jak i sztucznego, charakteryzują się złożoną strukturą kapilarno-porowatą, która nie stanowi regularnej kompozycji geometrycznej i ulega znacznemu zróżnicowaniu w zależności od rodzaju materiału. Fakt występowania porów otwartych w materiałach budowlanych ma duże znaczenie praktyczne, gdyż jest on bezpośrednią przyczyną tendencji do zawilgacania się tychże materiałów. Wilgoć w materiałach budowlanych może występować w postaci:

- pary wodnej wypełniającej objętość porów,
- wilgoci powierzchniowej występującej na ściankach kapilar i związanej z materiałem siłami powierzchniowymi,
- wody kapilarnej wypełniającej objętość kapilar.

Mechanizmy ruchu wilgoci w materiałach budowlanych zależą między innymi od formy występowania wilgoci w tymże materiale. W zakresie wilgotności sorpcyjnej, kiedy wilgoć związana jest z materiałem jako monomolekularna lub polimolekularna warstwa adsorbentu, przepływ wilgoci w materiale odbywa się w zasadzie jako dyfuzja pary wodnej, przy czym proces ten można opisać równaniem Ficka

$$\mathbf{j} = -\rho_p D \nabla C, \quad (5.1)$$

gdzie: \mathbf{j} – gęstość strumienia pary wodnej, [kg/(m²s)],

ρ_p – gęstość powietrza, [kg/m³],

D – współczynnik dyfuzji pary wodnej, [m²/s],

C – koncentracja masowa pary wodnej, [kg/kg],

∇ – operator gradientu.

Natomiast rozkład koncentracji pary wodnej w ośrodku otrzymać można z rozwiązania równania

$$\rho_p \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla(\mathbf{j}) \quad \Rightarrow \quad \rho_p \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(\rho_p D \nabla C), \quad (5.2)$$

gdzie: ε – porowatość, [m³/m³],

t – czas, [s],

które uzyskuje się po pewnych przekształceniach z bilansu masy pary wodnej w ośrodku. W przypadku ustalonym otrzymamy zależność

$$\nabla(\mathbf{j}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{j}(\mathbf{x}) = \text{const.}, \quad (5.3)$$

z której wynika, że strumień dyfundującej w ciele pary wodnej jest stały.

Równanie (5.2) nie jest równaniem domkniętym i należy do niego dołączyć warunek początkowy określający rozkład koncentracji pary wodnej w ciele w chwili początkowej $t = 0$

$$C(\mathbf{x}, t = 0) = C^*(\mathbf{x}), \quad (5.4)$$

oraz warunki brzegowe opisujące wymianę masy z otoczeniem. Najprostszy z nich to warunek brzegowy I rodzaju, kiedy dany jest rozkład koncentracji pary wodnej na brzegu ciała

$$C(\mathbf{x}, t) = \tilde{C}(\hat{\mathbf{x}}, t) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta, \quad (5.5)$$

gdzie β oznacza brzeg obszaru. Kolejny warunek brzegowy (II rodzaju) dotyczy przypadku gdy dany jest strumień pary wodnej na brzegu ciała

$$\mathbf{j}(\mathbf{x}, t) = \tilde{\mathbf{j}}(\hat{\mathbf{x}}, t) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta. \quad (5.6)$$

Jeżeli wymiana masy pomiędzy ciałem a otoczeniem odbywa się przez konwekcję to ma się do czynienia z warunkiem brzegowym III rodzaju, który opisany jest zależnością

$$\mathbf{j}(\hat{\mathbf{x}}, t) \cdot \mathbf{n}(\hat{\mathbf{x}}) = \beta(C_o - C) \quad \text{gdy} \quad \hat{\mathbf{x}} \in \beta, \quad (5.7)$$

gdzie: \mathbf{n} – wektor normalny do brzegu ciała,

C_o – koncentracja pary wodnej w otoczeniu, [kg/kg],

β – współczynnik przejmowania wilgoci przez konwekcję, [kg/(m² s)].

Ponieważ współczynnik β ma zazwyczaj bardzo dużą wartość to w praktyce ma się do czynienia z warunkiem brzegowym I rodzaju opisanym zależnością (5.5).

Biorąc pod uwagę zależność między koncentracją, a ciśnieniem cząstkowym pary wodnej w postaci

$$C = \frac{p}{\rho_p R_v T}, \quad (5.8)$$

gdzie: p – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, [Pa],

R_v – stała gazowa pary wodnej, [J/(kg K)],

T – temperatura bezwzględna, [K],

oraz przyjmując założenie, że zmiany temperatury są pomijalnie małe w porównaniu do zmian ciśnienia pary wodnej można wzór (5.1) przekształcić do postaci

$$\mathbf{j} = -\frac{D}{R_v T} \nabla p = -\delta \nabla p \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{D}{R_v T},$$

(5.9)

gdzie δ jest współczynnikiem przepuszczalności pary wodnej przez materiał porowaty w [kg/(m s Pa)]. Współczynnik paroprzepuszczalności δ wyraża ilość pary w kg, która przenika w warunkach ustalonych w czasie jednostki czasu przez próbkę materiału o powierzchni 1m^2 i grubości 1m, przy różnicy ciśnień cząstkowych po obydwóch stronach próbki wynoszącej 1Pa. Wartość tego współczynnika zależy od temperatury, zawartości wilgoci i struktury materiału.

5.2. Przebieg badania

W celu eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika δ należy próbkę badanego materiału umieścić nad naczyniem zawierającym wodę (wilgotność powietrza w naczyniu wynosi około 95 %). Cienka próbka materiału stanowi jakby przykrywkę naczynia, a jej brzegi powinny być zaizolowane. Naczynie umieszcza się na wadze w komorze klimatycznej o stałej temperaturze i wilgotności względnej powietrza (rys. 5.1). Na skutek różnicy stężeń pary wodnej nad i pod próbką zaczyna zachodzić przepływ pary wodnej z naczynia do komory, na skutek czego zmienia się masa naczynia. Zmiany masy naczynia pomiarowego w czasie należy rejestrować zapisując wskazania wagi oraz zegara zainstalowanego w komorze. Będą one stanowiły podstawę do obliczenia współczynnika paroprzepuszczalności. Przykładowy wykres zmian masy naczynia pomiarowego w czasie pokazano na rysunku 5.2, krzyżykami oznaczone są odczytane w poszczególnych chwilach czasowych wskazania wagi natomiast krzywa aproksymacyjna oznaczona jest linią przerywaną. Za okres ustalony przepływu przyjmuje się czas kiedy spadki masy w czasie stają się funkcją liniową.

W przypadku jednowymiarowym, odpowiadającym warunkom realizowanego dalej pomiaru, prawo Ficka (5.9) i bilans masy (5.2) przyjmą postać

$$j = -\delta \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5.10)$$

$$\rho_p \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_p D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{\varepsilon}{R_v T} \frac{\partial p}{\partial t} = \delta \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (5.11)$$

gdzie przyjęto, że zmiany temperatury T są pomijalnie małe w porównaniu ze zmianami ciśnienia cząstkowego pary wodnej oraz że współczynnik paroprzepuszczalności jest wielkością stałą ($\delta = const.$). Natomiast w przypadku ustalonym, który to przypadek jest realizowany w trakcie opisywanej tu metody „wet cup”, równania (5.10) i (5.11) redukują się do postaci

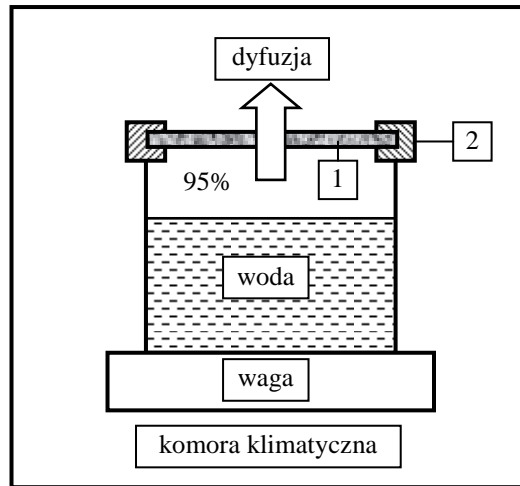
$$j = -\delta \frac{\partial p}{\partial x} = -\delta \frac{p_1 - p_2}{d}, \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (j) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0, \quad (5.13)$$

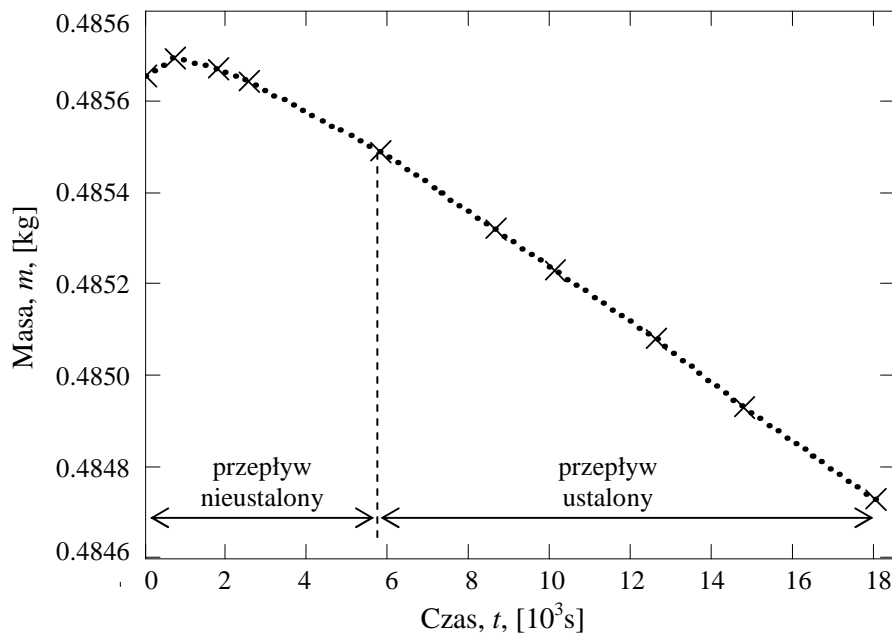
gdzie: p_1, p_2 - ciśnienie cząstkowe pary wodnej po obu stronach próbki, [Pa],

d - grubość próbki, [m].

Z równania (5.13) wynika, że rozkład ciśnienia cząstkowego pary wodnej w badanej próbce materiału jest liniowy.



Rys. 5.1. Schemat zestawu pomiarowego: 1 – próbka, 2 – uszczelnienie.



Rys. 5.2. Przykładowy wykres zmian masy układu pomiarowego w czasie.

5.3. Opracowanie wyników i oszacowanie błędu pomiaru

Po ustaleniu się dyfuzji zmiany masy naczynia stają się liniową funkcją czasu i współczynnik paroprzepuszczalności oblicza się w tym przypadku, ze wzoru

$$\delta = \frac{j_p d}{(p_1 - p_2) A}, \quad (5.14)$$

gdzie: p_1, p_2 - ciśnienie cząstkowe pary wodnej po obu stronach próbki, [Pa],

A - powierzchnia próbki, [m^2],

j_p - przepływ pary wodnej wywołany różnicą jej ciśnień, [kg/s],

d - grubość próbki, [m].

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej w danej temperaturze można obliczyć ze wzoru

$$p = \varphi p_s, \quad (5.15)$$

gdzie: φ - wilgotność względna powietrza, [-],

$p_s(T)$ - ciśnienie pary wodnej nasyconej, [Pa],

natomiast strumień pary wodnej przepływający przez próbkę dany jest zależnością

$$j_p = \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad \Delta m = m(t_{n-1}) - m(t_n), \quad \Delta t = t_n - t_{n-1}, \quad (5.16)$$

gdzie: Δm - zmiana masy zestawu pomiarowego w danym kroku czasowym, [kg],

Δt - przyrost czasu, [s].

Wartość współczynnika δ należy obliczyć dla danej próbki jako średnią arytmetyczną ze wszystkich odczytów kiedy to zmiany masy są stałe w czasie.

Błąd pomiaru można oszacować z zależności

$$\delta\delta = \left(\frac{d}{\Delta p A} \delta j_p + \frac{j_p}{\Delta p A} \delta d + \frac{j_p d}{(\Delta p)^2 A} \delta \Delta p + \frac{j_p d}{\Delta p A^2} \delta A \right), \quad (5.17)$$

gdzie: δj_p - błąd pomiaru strumienia pary wodnej,

δd - błąd przy wyznaczaniu grubości próbki,

δA - błąd przy określaniu pola przekroju próbki,

$\delta \Delta p$ - błąd przy określaniu różnicy ciśnienia pary wodnej po obu stronach próbki równy podwojonemu błędowi określania wartości ciśnienia.

5.4. Zakres opracowania

Opracowanie powinno zawierać:

- opis eksperymentu wraz z podaniem warunków pomiaru (temperatury i wilgotności powietrza w komorze) oraz rodzaju badanego materiału (wymiarów próbki, gęstości, stosunku wodno-gipsowego lub wodno-cementowego itp),
- omówienie wzoru opisującego współczynnik paroprzepuszczalności δ ,
- tabelę pomiarów zawierającą pary (t, m) czyli czas i odpowiadającą mu masę zestawu pomiarowego,
- wykres spadków masy układu pomiarowego w układzie współrzędnych (t, m) ,
- obliczenia strumieni j_p w poszczególnych krokach czasowych i określenie czasu kiedy przepływ staje się ustalony,
- obliczenia współczynnika paroprzepuszczalności δ w poszczególnych krokach czasowych dla przepływu stacjonarnego,
- obliczenia uśrednionej wartości δ i oszacowanie błędu pomiaru.