

Małgorzata Kowalik

PRZEPŁYW CIEPŁA I RUCH WILGOCI W PRZEGRODZIE BUDOWLANEJ

Wstęp

Większość materiałów stosowanych w budownictwie charakteryzuje się porowatą strukturą, a w związku z tym zawsze zawierają one pewną ilość wilgoci. Zawilgocenie materiałów budowlanych może powstać w trakcie procesu budowlanego wskutek oddziaływania opadów atmosferycznych lub kondensacji pary wodnej na wewnętrznej powierzchni przegród budowlanych lub ich wnętrzu oraz w efekcie podciągania kapilarnego z gruntu. Zawilgocenie materiału znacząco wpływa na przewodność cieplną przegród budowlanych. Materiał wilgotny ma zwiększoną przewodność cieplną w stosunku do materiału suchego, co powoduje duże straty ciepła, a w konsekwencji może prowadzić do obniżenia ich izolacyjności cieplnej i przekroczenia warunków normowych. Konsekwencją tego jest obniżenie własności użytkowych przegród budowlanych. Zawilgocone materiały ulegają biologicznej i chemicznej korozji, bardzo znacznie zmniejsza się ich trwałość, co w dłuższej perspektywie może prowadzić do ich zniszczenia. Przykładem może być gnienie materiałów pochodzenia organicznego w stanie wilgotnym. Z uwagi na niejednoznaczną zależność procesu zamarzania wody zawartej w porach materiału porowatego od jego temperatury zakłada się często, że woda w mało zawilgoconej przegrodzie budowlanej nie zamarza w przeciętnie niskich temperaturach okresu zimowego. Literatura na temat przepływu ciepła i ruchu wilgoci jest bogata (patrz [1-26]).

Cechą charakterystyczną ruchu wilgoci w przegrodach budowlanych z materiałów porowatych jest przemieszczanie się wilgoci w postaci wody pod wpływem działania sił kapilarnych, siły grawitacji i ciśnienia zewnętrznego, a wilgoci w postaci pary wodnej - na skutek dyfuzji pary. Ruchowi wilgoci w materiale towarzyszą przemiany fazowe (parowanie i zamarzanie wody, kondensacja pary wodnej, topienie i sublimacja lodu). Udział tych wszystkich zjawisk w procesie migracji wilgoci w materiałach budowlanych zależy od struktury tych materiałów i wykonanych z nich przegród, stopnia ich zawilgocenia, temperatury oraz warunków otoczenia. Duże znaczenie ma również liczba i układ warstw materiału tworzących przegrodę oraz właściwości fizyczne tych materiałów. Ruch wilgoci odbywa się poprzez przy-

legające warstwy materiałów różniące się stanem zawilgocenia i znajdujące się w różnych temperaturach. Ze względu na złożoną strukturę materiałów porowatych ruch wilgoci w nich jest procesem bardzo skomplikowanym i zależnym od stopnia zawilgocenia.

Równoległe do ruchu wilgoci następuje przepływ ciepła. W zawilgoconym materiale przepływ ciepła spowodowany jest występującą w nim różnicą temperatur i migrującą w jego porach wilgocią. Uwzględnienie tych zjawisk jest bardzo istotne przy przeprowadzaniu pomiarów efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła wilgotnego materiału.

W przegrodach budowlanych pełnych największą rolę odgrywa przewodzenie ciepła, a na powierzchniach przegród znaczenie ma wymiana ciepła przez promieniowanie i konwekcję. W rzeczywistości przepływ ciepła następuje przede wszystkim przez przewodzenie, przy uwzględnieniu rodzaju materiału i stopnia zawilgocenia ścian. Najlepszymi izolatorami ciepła są materiały porowate. Jednak w przypadku gdy skutek np. błędów technologicznych woda wnika do porów tych materiałów wypiera powietrze, wówczas następuje spadek termoizolacyjności materiału. Dyfuzja pary wodnej w przegrodach szczególnie zimą powoduje wzrost nasycenia parą wodną. Przegrody budowlane nie mają możliwości odparowania nadmiaru wilgoci, co powoduje systematyczne pogorszenie właściwości izolacyjnych przegród. Konsekwencją tego jest pojawienie się pleśni, niszczenie murów, korozja stali zbrojeniowej.

Aby ująć analitycznie ruch wilgoci w materiałach porowatych i przegrodach budowlanych, należy bazować na wynikach eksperymentu, a wszystkie rozwiązania teoretyczne muszą mieć ścisły związek z rzeczywistym przebiegiem analizowanych zjawisk. Z tego właśnie powodu w prezentowanym artykule, w zwięzły sposób zostały przedstawione podstawowe zjawiska fizyczne związane z ruchem wilgoci w materiałach budowlanych oraz sposoby przepływu ciepła w zawilgoconym materiale porowatym.

Niniejszy artykuł jest pracą przeglądową.

Równania przepływu ciepła i ruchu wilgoci w przegrodzie budowlanej

Zjawiska przepływu ciepła i ruchu wilgoci w materiale porowatym są opisane przez następujące równania:

Równanie zachowania masy

Równanie zachowania masy może być zapisane jako:

$$\rho_t = -\nabla \cdot (\rho_i v_i) + R_i \quad (1)$$

gdzie ρ_i jest gęstością składnika i , v_i jest prędkością przepływu składnika i , a R_i jest prędkością produkcji składnika i , a \cdot oznacza symbol mnożenia skalarnego. Ponieważ zakładamy brak ruchu cieczy $v_c = 0$, gdzie indeks c oznacza ciecz. Natomiast $R = -R_v = -R_m$, ponieważ prędkość parowania cieczy jest taka sama jak prędkość produkcji pary, gdzie indeksy oznaczają odpowiednio v - para, m - mieszanina para-powietrze. Ponieważ powietrze nie zmienia fazy, prędkość produkcji mieszaniny jest równa prędkości produkcji pary, a więc powyższe równanie upraszcza się do

$$\rho_c \dot{\rho}_c = -R_m \quad (2)$$

Równanie ciągłości dla powietrza (indeks a) przybiera formę

$$\rho_a \dot{\rho}_a = -\nabla \cdot (\rho_a v_a) \quad (3)$$

a dla pary

$$\rho_v \dot{\rho}_v = -\nabla \cdot (\rho_v v_v) + R_v \quad (4)$$

Zasada zachowania masy dla fazy gazowej daje:

$$\rho_m \dot{\rho}_m = -\nabla \cdot (\rho_m v_m) + R_m \quad (5)$$

Wykorzystując prawo Ficka, można przedstawić strumienie w formie równań (6) i (7)

$$j_a = \rho_a (v_a - v_m) = -\rho_m D \nabla \cdot \rho_{\beta a} \quad (6)$$

gdzie $\rho_{\beta i} = \rho_i / \rho_m$ jest stosunkiem gęstości składnika i do gęstości mieszaniny para-powietrze, a D jest współczynnikiem dyfuzji dla prawa Ficka dla mieszaniny para-powietrze

$$j_v = \rho_v (v_v - v_m) = -\rho_m D \nabla \cdot \rho_{\beta v} \quad (7)$$

Ostatecznie otrzymamy następujący układ równań:

$$\rho_{m\beta a} + \rho_m v_m \nabla \cdot \rho_{\beta a} = \nabla \cdot (\rho_m D \nabla \rho_{\beta a}) - \rho_{\beta a} R_m \quad (8)$$

oraz

$$\rho_{m\beta v} + \rho_m v_m \nabla \cdot \rho_{\beta v} = \nabla \cdot (\rho_m D \nabla \rho_{\beta v}) - \rho_{\beta v} R_m \quad (9)$$

Równanie energii wewnętrznej

Wewnętrzna energia e i entalpie h_m , h_a , h_v mogą być przedstawione w funkcji temperatury T :

$$\begin{aligned}
\rho e &= \rho_s e_s + \rho_c e_c + \rho_a e_a + \rho_v e_v \\
&= \rho_s h_s + \rho_c h_c + \rho_m \left(h_m - \frac{p}{\rho_m^*} \right) \\
&= \rho_s h_s + \rho_c h_c + \rho_m h_m - p \left(\varepsilon \frac{\rho_c}{\rho_c^*} \right) \\
&= \rho_s h_s + \rho_c h_c + \rho_m h_m - \rho_m R_m T
\end{aligned} \tag{10}$$

Po zróżniczkowaniu powyższego równania otrzymamy:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) = (\rho_s c_{ps} + \rho_c c_{pc}) \frac{\partial T}{\partial t} - h_c R_m + \rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + h_m \frac{\partial \rho_m}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m R_m T) \tag{11}$$

Ostatecznie równanie przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla(\rho_m v_m h_m) = \\
&(\rho_s c_{ps} + \rho_c c_{pc}) \frac{\partial T}{\partial t} + R_m (h_m - h_l) + \rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + \rho_m v_m \frac{\partial h_m}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m R_m T)
\end{aligned} \tag{12}$$

Prawo Darcy'ego

Prawo Darcy'ego opisuje zależność między prędkością filtracji cieczy przepływającej w ośrodku porowatym a występującym gradientem ciśnienia. Jego wektorowe sformułowanie odnosi się do jedno-, dwu- i trójwymiarowych przepływów w ośrodkach porowatych.

Wektor prędkości filtracji cieczy w ośrodku porowatym \mathbf{v} jest wprost proporcjonalny do wziętego ze znakiem ujemnym gradientu ciśnienia ∇p i odwrotnie proporcjonalny do lepkości przepływającej cieczy μ , a współczynnik proporcjonalności, zwany przepuszczalnością K , jest parametrem stałym, charakterystycznym dla danego ośrodka porowatego:

$$\mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} \nabla p \tag{13}$$

Znak ujemny w powyższym równaniu pochodzi stąd, że wektor prędkości filtracji płynu skierowany jest przeciwnie do wektora gradientu ciśnienia, więc prędkość mieszaniny para-powietrze może być przedstawiona jako

$$\mathbf{v}_m = -k_D \nabla p \tag{14}$$

gdzie k_D jest współczynnikiem Darcy'ego.

Wartość współczynnika Darcy'ego dla betonu mieści się pomiędzy 10^{-12} a 10^{-6} m³s/kg. Dla średniej i dobrej jakości betonów jest to bliżej dolnej granicy.

Wartość k_D dla betonu z dostępnych danych można obliczyć, wykorzystując wartość eksperymentalną $K = 2,54 \cdot 10^{-9}$ m/s uzyskaną przez Lea [13] dla typowego betonu. To daje $k_D = 1,69 \cdot 10^{-10}$ m³/s/kg, co zgodnie z oczekiwaniem jest bliżej 10^{-12} . Porównanie tej wartości z $k_D = 5,25 \cdot 10^{-6}$ m³/s/kg dla cegły ogniodpornej, która jest bardziej przepuszczalna niż beton, może służyć jako dodatkowe sprawdzenie. Górna granica, tj. 10^{-6} , jest podawana dla cementu bitumicznego słabej jakości, wtedy $k_D = 9,38 \cdot 10^{-8}$ m³/s/kg [24].

Zależności termodynamiczne

Przy założeniu, że para i powietrze są idealnymi gazami, zachodzą następujące zależności:

- *Równanie gazu idealnego dla pary*

$$p_v \bar{V}_v = \rho_v R_v T \quad (15)$$

gdzie $\bar{V}_i = \rho_i / \rho_{oi}$ przedstawia objętość zajmowaną przez składnik i przez jednostkową objętość, i

- *Równanie idealnego gazu dla powietrza*

$$p_a \bar{V}_a = \rho_a R_a T \quad (16)$$

Równanie Clausiusa-Clapeyrona

Równanie Clausiusa-Clapeyrona przy założeniu, że para jest gazem idealnym o objętości dużo większej od ciekłej wody, może być zapisane jako:

$$\frac{dp_{\text{sat}}}{dt} = \frac{h_{fg} p_{\text{sat}}}{RT^2} \quad (17)$$

gdzie h_{fg} jest ciepłem parowania wody.

Dla niskich i średnich ciśnień można przyjąć, że ciepło parowania wody jest liniową funkcją temperatury:

$$h_{fg} = A - BT \quad (18)$$

Całkując równanie (17) po wstawieniu h_{fg} z (18), otrzymujemy:

$$p_{\text{sat}} = CT^{\frac{-B}{R_v}} e^{\frac{-4}{R_v T}} \quad (19)$$

Stałe A i B są określone z tablic.

Równanie stanu

Używając oznaczeń $\rho_{\beta i}$ i \bar{V}_i , równanie stanu jest przedstawione jako:

$$p_v(\varphi - \bar{V}_c) = \rho_m \rho_{\beta v} R_v T = (1 - \rho_{\beta a}) \rho_m R_v T \quad (20)$$

i

$$p_a(\varphi - \bar{V}_c) = \rho_m \rho_{\beta a} R_a T \quad (21)$$

gdzie $\bar{V}_v = \bar{V}_a = (\varphi - \bar{V}_c)$, a φ jest porowatością.

Łącząc powyższe równania, otrzymamy:

$$p(\varphi - \bar{V}_c) = \rho_m R_m T \quad (22)$$

gdzie:

$$R_m = \rho_{\beta v} R_v + \rho_{\beta a} R_a \quad (23)$$

Zakończenie

Przedstawiony powyżej system równań nieliniowych rządzących procesem przepływu ciepła i ruchem wilgoci opisuje zależności wynikające z rozważań termodynamicznych.

Literatura

- [1] Bazant Z.P., Constitutive equation for concrete and shrinkage based on thermo-dynamics of multi-phase systems, *Materials Constructions* 1970, 3, 13.
- [2] Bazant Z.P., Najjar L.J., Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, *Materials Constructions* 1972, 5(25), 3-20.
- [3] Biot M.A., General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material, *J. Appl. Phys.* 1956, 78, 91.
- [4] Biot M.A., General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.* 1941, 12, 155.
- [5] Biot M.A., Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, *J. Appl. Phys.* 1955, 26, 182.
- [6] Bowen R.M., Incompressible porous media models by use of the theory of mixtures, *Int. J. Engng Sci.* 1980, 18, 1129.
- [7] Buckingham R., Studies in the movement of soil moisture, U.S. Dept. Agr. Bur. Soils Bull. 1907, 38, 29-61.
- [8] Budownictwo ogólne - fizyka budowli, t. 2, Arkady, Warszawa 2005.
- [9] Cleary M.P., Fundamental solutions for a fluid-saturated porous solid, *Int. J. Solids Structures* 1977, 13, 785.

- [10] Cleary M.P., Moving singularities in elasto-diffusive solids with applications to fracture propagation, *Int. J. Solids Structures* 1978, 14, 81.
- [11] Crochet M.J., Naghdi P. M., On constitutive equations for flow of fluid through an elastic solid, *Int. J. Engng. Sci.* 1966, 4, 383.
- [12] Gurr C.G., Marshaii T.J., Hutton J. T., Movement of water in soil due to a temperature gradient, *Soil Sci.* 1952, 74, 335-345.
- [13] Lea F.M., *The Chemistry of Cement and Concrete*, St. Martin's Press. Inc., New York 1956, 349-350.
- [14] Pihlajavaara S.E., *Introductory bibliography for research on drying of concrete*, The State Institute for Technical Research, Helsinki 1964.
- [15] Pokorska I., Modelling of isotropic and kinematic hardening in porous materials, *ZN Politechniki Częstochowskiej* 2004 nr 158, Seria Budownictwo 10, 143-156.
- [16] Pokorska I., Parametry cieplno-wilgotnościowe przegrody budowlanej, *ZN Politechniki Częstochowskiej* 2004 nr 158, Seria Budownictwo 10, 157-163.
- [17] Pokorska I., Własności cieplne betonu, *ZN Politechniki Częstochowskiej* 2004 nr 159, Seria Budownictwo 11, 95-101.
- [18] Pokorska I., Algorytm rozwiązania sprzężonych równań przepływu ciepła i wilgoci w materiałach porowatych metodą różnic skończonych, *ZN Politechniki Częstochowskiej* 2005 nr 160, Seria Budownictwo 12, 127-131.
- [19] Pokorska I., Stochastic methods in heat and mass transfer problems, *ZN Politechniki Częstochowskiej* 2005, Seria Budownictwo 12, 133-137.
- [20] Pokorska I., Stochastyczne równania przepływu ciepła, *ZN Politechniki Częstochowskiej* 2005 nr 160, Seria Budownictwo 12, 139-141.
- [21] Rice J.R., Cleary M.P., Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents, *Rev. Geophys. Space Phys.* 1976, 14, 227.
- [22] Schiffman R.L., A thermoelastic theory of consolidation, *Envir. Geophys. Heat Transfer* 1971, 4, 78.
- [23] Sherwood V.K., Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids, *Trans. Am. Inst. Mech. Eng.* 1931, 27, 190-202.
- [24] Scheidegger A.E., *The Physics of Flow through Porous Media*, The Macmillan Company, New York 1960, 87-192.
- [25] Whitaker S., A theory of drying in porous media, *Adv. Heat Transfer* 1977, 12, 34.
- [26] Wyrwał J., *Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych*, *Studia i Monografie* z. 31, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Opole 1989.

Streszczenie

Dokonano analizy przepływu ciepła i ruchu wilgoci w porowatej strukturze. Opisano podstawy teoretyczne problemu. Przedstawiono system równań rządzących procesem przepływu ciepła i ruchem wilgoci. Praca ma charakter przeglądu.

Abstract

Heat and mass transfer in porous structure is investigated. The theoretical formulation of the problem is described. A system of partial differential equations is discussed. The paper has a review character.