

Bożena ORLIK-KOŹDOŃ<sup>1</sup>  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI PARY WODNEJ W MATERIALE IZOLACYJNYM O STRUKTURZE POROWATEJ

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wyniki własnych badań laboratoryjnych w zakresie wyznaczania współczynnika dyfuzji pary wodnej dla styropianu. Celem badania było określenie zmiany jego paroprzepuszczalności w wyniku wykonanych modyfikacji struktury.

## ASSESSMENT OF THE WATER VAPOUR DIFFUSION FACTOR IN INSULATING POROUS STRUCTURE MATERIAL

**Summary.** The study shows the results of my own laboratory research, the aim of which was to establish the water vapour diffusion factor in polystyrene. Moreover, the research was done with a view to stating the changes of its steam permeability resulting from structural modifications (which were made earlier).

### 1. Wprowadzenie

Kondensacja pary wodnej w przegrodach budowlanych jest zjawiskiem często spotykanym, szczególnie przy dużych różnicach temperatur i dużych wilgotnościach względnych otoczenia [1]. Jest ona uważana za jedną z głównych przyczyn wzrostu wilgotności przegród. W przypadku zastosowania styropianu jako materiału ociepleniowego zachodzi obawa wykroplenia pary wodnej wewnątrz przegrody, czego powodem może być duży opór dyfuzyjny zastosowanego materiału izolacyjnego.

Z tego względu w materiale pełnym-bazowym (typowe płyty styropianowe) wykonano perforacje, mające na celu poprawę paroprzepuszczalności materiału, gdzie miarą tej zmiany była wartość współczynnika dyfuzji pary wodnej.

<sup>1</sup> Opiekuna naukowy: Dr hab. inż. Jan Ślusarek, prof. w Politechnice Śląskiej

## 2. Model matematyczny

Transport pary wodnej w materiałach budowlanych modeluje się z wykorzystaniem bilansu masy danej fazy [5]:

$$\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \nabla(\rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha) = R^\alpha \quad \alpha=0,1,2,3,4 \quad (1)$$

gdzie:

$\rho^\alpha$  – gęstość objętościowa danego składnika [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$R^\alpha$  – źródło masy [ $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ ],

$\mathbf{v}^\alpha$  – prędkość przepływu pary wodnej [ $\text{m}/\text{s}$ ],

Strumień masy fazy gazowej przepływający przez powierzchnię jednostkową w jednostce czasu

$$\mathbf{j}^\alpha = \rho^\alpha \mathbf{u}^\alpha \quad (2)$$

$\mathbf{u}^\alpha$  – prędkość dyfuzyjna.

Gęstość objętościową każdego składnika można wyrazić za pomocą koncentracji  $C^\alpha$

$$C^\alpha = \frac{\rho^\alpha}{\rho} \quad (3)$$

Korzystając z parcjalnego bilansu fazy gazowej

$$\rho \frac{dC^\alpha}{dt} = -\Delta \cdot \mathbf{j}^\alpha \quad (4)$$

Strumień masy dyfundującej pary wodnej opisuje zależność [2]:

$$\mathbf{j}^\alpha = -\frac{\rho}{\varepsilon} D^\alpha \nabla C^\alpha \quad (5)$$

gdzie:

$D^\alpha$  – współczynnik dyfuzji pary wodnej [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$\varepsilon$  – porowatość materiału [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ].

Otrzymujemy ostateczną postać równania parcjalnego bilansu fazy gazowej

$$\frac{dC^\alpha}{dt} = \nabla \left( \frac{1}{\varepsilon} \cdot D^\alpha \nabla C^\alpha \right) \quad (6)$$

W niniejszych rozważaniach zagadnienie przepływu pary wodnej sprowadzono do zadania jednowymiarowego. Równanie (6) po uśrednieniu po grubości  $x \in \langle 0, h \rangle$  w przedziale czasu  $x \in \langle t, t + \Delta t \rangle$  przyjmuje postać:

$$\int_0^{t+\Delta t} \int_0^h \frac{x}{h} \left( \frac{dC^a}{dt} \right) dx dt = \int_0^{t+\Delta t} \int_0^h \frac{x}{h} \nabla \left( \frac{1}{\varepsilon} D^a C^a \right) dx dt \quad (7)$$

Wykorzystując uzyskane zależności i po dalszym ich przekształceniu [3],[4],[6], otrzymujemy końcowe wyrażenie, określające współczynnik dyfuzji pary wodnej w badanym materiale. Jednocześnie taka forma zapisu umożliwi wyznaczenie wartości poszukiwanej wielkości na drodze badań laboratoryjnych:

$$\bar{D} = \frac{R \cdot T_b \cdot h}{P_{sat}} [\varphi(h) - \varphi(0)] \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t \cdot A} \quad (8)$$

gdzie:

$T_b$  – temperatura bezwzględna [K],

$P_{sat}$  – ciśnienie pary wodnej nasyconej [Pa],

$R$  – stała gazowa pary wodnej [J/kgK],

$h$  – grubość próbki [m],

$\Delta\varphi$  – średnia różnica wilgotności względnej po obu stronach próbki [%].

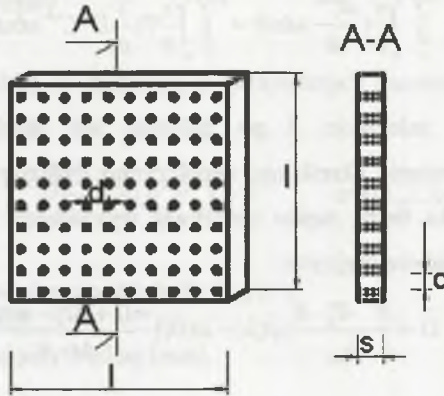
### 3. Przygotowanie próbek

Badanie współczynnika dyfuzji pary wodnej było prowadzone dla materiału nazwanego na potrzeby badania: materiałem pełnym i materiałem perforowanym. Materiał bazowy – pełny stanowił polistyren ekspandowany [8] o gęstości pozornej odpowiednio: 15, 20, 30 kg/m<sup>3</sup> i grubości badanych płyt 5 cm. W materiale bazowym wykonane zostały perforacje równoległe do kierunku przepływu strumienia wilgoci. Kombinacje perforacji i geometrię próbek przedstawia tab.1, rys.1.

Tabela 1

Oznaczenie badanych próbek

Oznaczenie próbek	$\phi=1\text{mm}$ $d=2\text{cm}$ $s=5\text{cm}$ $l=50\text{cm}$	$\phi=3\text{mm}$ $d=2\text{cm}$ $s=5\text{cm}$ $l=50\text{cm}$	$\phi=5\text{mm}$ $d=2\text{cm}$ $s=5\text{cm}$ $l=50\text{cm}$
15EPS-70-040	A <sub>151</sub> , A <sub>152</sub> , A <sub>153</sub>	B <sub>151</sub> , B <sub>152</sub> , B <sub>153</sub>	C <sub>151</sub> , C <sub>152</sub> , C <sub>153</sub>
20EPS-100-038	A <sub>201</sub> , A <sub>202</sub> , A <sub>203</sub>	B <sub>201</sub> , B <sub>202</sub> , B <sub>203</sub>	C <sub>201</sub> , C <sub>202</sub> , C <sub>203</sub>
30EPS-200-036	A <sub>301</sub> , A <sub>302</sub> , A <sub>303</sub>	B <sub>301</sub> , B <sub>302</sub> , B <sub>303</sub>	C <sub>301</sub> , C <sub>302</sub> , C <sub>303</sub>

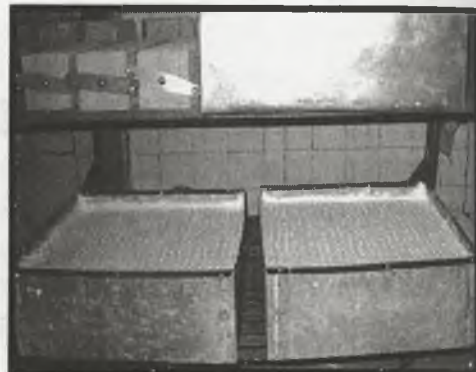


Rys.1. Geometria badanych próbek  
Fig.1. The geometry of the examined samples

Perforacje w płytach wykonano za pomocą rozgrzanych prętów, dzięki czemu uzyskano gładkie powierzchnie otworów o przekroju kołowym i średnicy odpowiednio: 1, 3 i 5 mm.

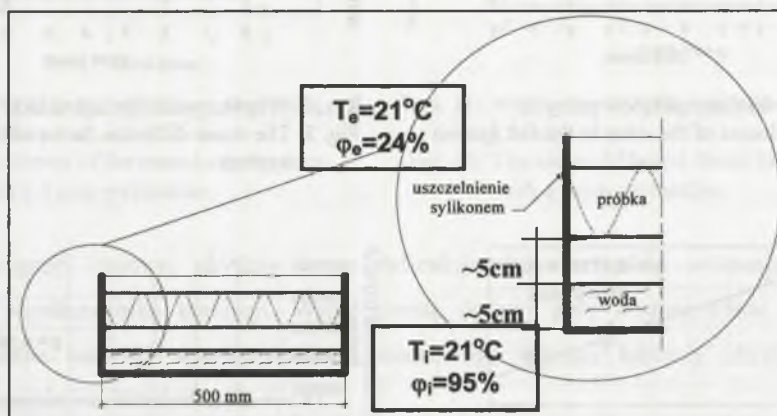
#### 4. Pomiary paroprzepuszczalności badanych układów

Każdy układ był reprezentowany przez trzy próbki, które były badane w tych samych warunkach, w tym samym czasie. Wartości współczynnika dyfuzji pary wodnej wyznaczono na podstawie pomiarów ubytków masy wody z zestawu pomiarowego (rys. 2).



Rys. 2. Zestaw pomiarowy wraz z próbkami  
Fig. 2. The measure set with the samples

Zestawy pomiarowe znajdowały się w komorze klimatycznej, gwarantującej stałe warunki badania, tj. wilgotność, temperaturę oraz prędkość przepływu powietrza. Pomiaru prowadzono w temperaturze  $21^{\circ}\text{C}$  i średniej różnicy wilgotności względnej po obu stronach próbki  $\Delta\varphi=71\%$  [7].



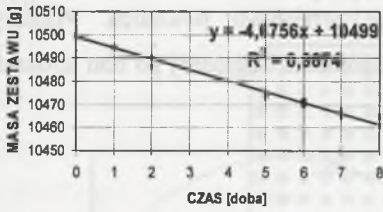
Rys. 3. Zestaw pomiarowy wraz z badaną próbką [7]

Fig. 3. The measure set with an examined sample

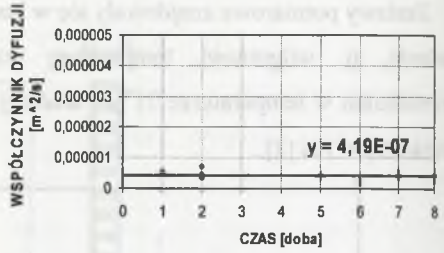
Przed przystąpieniem do badań próbki były przechowywane w warunkach przyszłego badania przez okres 10 dni. Pomiaru ubytków masy zestawu wykonano przy użyciu elektronicznej wagi z dokładnością  $\pm 1\text{g}$  (rys. 2).

## 5. Wyniki badań

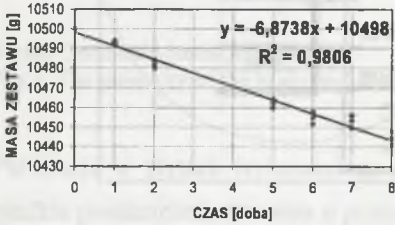
Na podstawie ubytków masy zestawów pomiarowych została określona paroprzepuszczalność jako funkcja liniowa dyfundującej pary wodnej w czasie badania, oraz współczynnik dyfuzji pary wodnej w oparciu o zależność (8). W referacie prezentowane są wyniki dla polistyrenu ekspandowanego o gęstości  $20\text{ kg/m}^3$  (dla tej gęstości wyznaczono współczynnik dyfuzji z uwzględnieniem wszystkich kombinacji perforacji. Dla pozostałej części układów badania nadal są prowadzone).



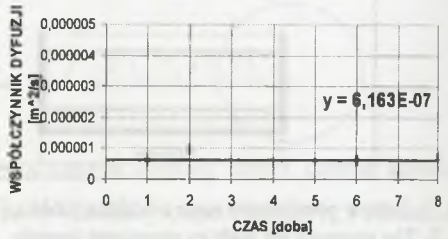
Rys. 4. Ubytki masy układów pełnych  
Fig. 4. The losses of the mass in the full system



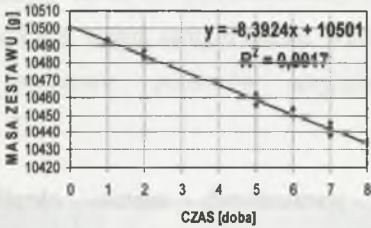
Rys. 5. Współczynnik dyfuzji układu pełnego  
Fig. 5. The steam diffusion factor of the full system



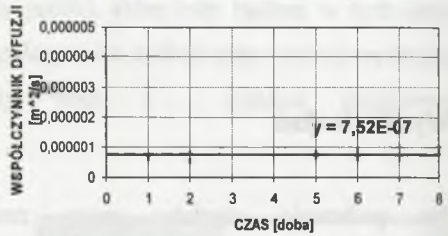
Rys. 6. Ubytki masy układów z perforacją  $\phi$  1 mm  
Fig. 6. The losses of the mass in the system with  $\phi$  1mm perforatio



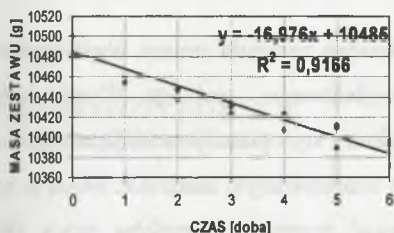
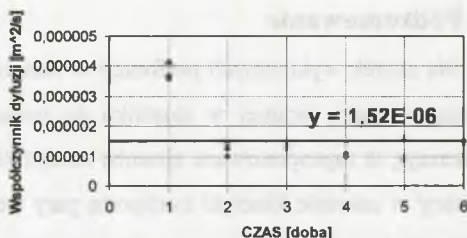
Rys. 7. Współczynnik dyfuzji układu z perforacją  $\phi$  1mm  
Fig. 7. The steam diffusion factor in the system with  $\phi$ 1mm



Rys. 8. Ubytki masy układów z perforacją  $\phi$  3 mm  
Fig. 8. The losses of the mass in the system with  $\phi$  3 mm perforation



Rys. 9. Współczynnik dyfuzji układu z perforacją  $\phi$  3 mm  
Fig. 9. The steam diffusion factor in the system with  $\phi$  3 mm perforation

Rys. 10. Ubytki masy układów z perforacją  $\phi$  5mmFig. 10. The losses of the mass in the system with  $\phi$  5 mm perforationRys. 11. Współczynnik dyfuzji układu z perforacją  $\phi$  5mmFig. 11. The steam diffusion factor in the system with  $\phi$  5mm perforation

Analiza regresji liniowej ubytków masy dyfundującej pary wodnej wykazała wysokie wartości współczynnika korelacji. Współczynnik dyfuzji pary wodnej został określony na podstawie wartości współczynnika kierunkowego regresji liniowej ubytków masy dla poszczególnych układów (rys. 4–11).

Na podstawie wyników badań wyznaczono także takie wielkości, jak: opór dyfuzyjny  $Z_p$ , współczynnik oporu dyfuzyjnego  $\mu$  oraz współczynnik paroprzepuszczalności materiału  $\delta_p$ . Wielkości te opisują w sposób ilościowy transport pary wodnej w materiale i znajdują szersze zastosowanie w praktyce i wśród producentów materiałów budowlanych.

Tabela 2

Wartości oporu dyfuzyjnego  $Z_p$ , współczynnika oporu dyfuzyjnego  $\mu$  oraz współczynnik paroprzepuszczalności materiału  $\delta_p$  [9]

Rodzaj styropianu	$Z_p$ [m <sup>2</sup> hPa/g]	$\mu$ [bezwymiarowy]	$\delta_p$ [g/mhPa]	D [m <sup>2</sup> /s]
20EPS/pełny	2323	32,9	$21,5 \times 10^{-6}$	$4,19 \times 10^{-7}$
20EPS/1mm	1522	21,6	$32,8 \times 10^{-6}$	$6,16 \times 10^{-7}$
20EPS/3mm	1261	17,9	$39,6 \times 10^{-6}$	$7,52 \times 10^{-7}$
20EPS/5mm	566	8,03	$88,3 \times 10^{-6}$	$1,52 \times 10^{-6}$

## 6. Podsumowanie

Na skutek wykonanych perforacji w materiale bazowym nastąpiła zmiana współczynnika transportu pary wodnej w stosunku do materiału wyjściowego – pełnego. Wyniki badań wskazują, iż zaproponowane sposoby modyfikacji struktury styropianu powodują oczekiwane zmiany w zakresie kinetyki transportu pary wodnej w analizowanym materiale. Może to być wykorzystane w praktyce, bowiem można oczekiwać poprawy warunków pracy całej przegrody. Przedstawione wyniki badań stanowią część wstępną pracy naukowej, której dalszym etapem będzie:

1. wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej materiału pełnego i perforowanego - określenie zależności pomiędzy zmianą makrostruktury próbek a wartością wybranych parametrów ciepłno-wilgotnościowych,
2. weryfikacja uzyskanych wyników na obiekcie rzeczywistym, gdzie w laboratorium utylizacji energii słonecznej zbudowana zostanie przegroda izolowana badanym materiałem. Dokonany zostanie pomiar strumienia ciepła i wilgoci w warunkach rzeczywistej pracy materiału.

## LITERATURA

1. Wyrwał J.: Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych. Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Studia i Monografie z.31, Opole 1989.
2. Wyrwał J., Świrski J.: Problemy zawilgocenia przegród budowlanych. PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Studia z zakresu inżynierii nr 44, Warszawa 1998.
3. Wyrwał J.: Termodynamiczne podstawy fizyki budowni. Opole 2004.
4. Kubik J.: Przepływ wilgoci w materiałach budowlanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej. Opole 2000.
5. Szargut J.: Termodynamika. PWN, Warszawa 1985.
6. Muzyczuk T.: Wpływ imperfekcji strukturalnych na trwałość bezspoinowego systemu styropianowych ociepleń. Rozprawa doktorska, Gliwice 2005.
7. DIN EN 12088: Bestimmung der Wasseraufnahme durch Diffusion.
8. PN-B 20130:Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Płyty styropianowe PS-E.
9. EN ISO 13788: Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe komponentów budowlanych i elementów budynków-Określenie temperatury powierzchni wewnętrznej w celu uniknięcia krytycznej temperatury powierzchni i kondensacji międzywarstwowej.