

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz.<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-5114-7932

dr inż. Mariusz Kosin<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-2683-7784

# Analiza numeryczna osuszania przegrody zewnętrznej na podstawie danych eksperymentalnych

## *Numerical analysis of the drying of the outer partition based on experimental data*

DOI: 10.15199/33.2023.07.01

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań oraz analizy numerycznej zagadnień związanych z wilgotnością przegrody budowlanej wykonanej w technologii lekkiego szkieletu stalowego. Rezultatem badań było sporządzenie izoterm sorpcji oraz nasiąkliwości materiałów tworzących przegrodę. Na ich podstawie przeprowadzono symulację osuszania naturalnego przegrody przy założeniu, że materiały ją tworzące są nasączone wodą. Analiza numeryczna pozwoliła oszacować ubytek wody w przegrodzie zewnętrznej w zależności od początkowego stanu jej zawilgocenia w przyjętych okresach obliczeniowych.

**Słowa kluczowe:** wilgotność; osuszanie; lekkie konstrukcje stalowe; obliczenia numeryczne.

**Abstract.** The article covers the results of research and numerical analysis of issues related to the humidity of a building partition made in the technology of a light steel skeleton. The result of the research was the preparation of the sorption isotherm and water absorption of the materials forming the barrier. On their basis, a simulation of the natural drying of the partition was carried out, assuming that the materials forming it are soaked with water. Numerical analysis, depending on the initial moisture level of the external partition, allowed to estimate the loss of water in the partition in the adopted calculation periods.

**Keywords:** humidity; drying; light steel structures; numerical calculations.

Wprowadzone unijne regulacje, mające na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej, zobowiązują inwestorów do wznoszenia domów o niskim stopniu zużycia energii. Tego rodzaju budynki wznoszone są m.in. w technologii lekkiego szkieletu stalowego. Atutem tej technologii jest m.in. możliwość uzyskania dobrej izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych przy niewielkiej ich grubości w porównaniu z budynkami wznoszonymi tradycyjnie. Natomiast do wad niewątpliwie należy wrażliwość na zawilgocenie przegród, czego skutkiem może być pogorszenie izolacyjności cieplnej. W przypadku podtopienia tego typu konstrukcji materiały, z których jest wykonana, mogą nie nadawać się do dalszej eksploatacji. W konsekwencji wykonywanych robót naprawczych może dojść do utraty stateczności budynku, co zostało przedstawione w pracy [1].

<sup>1)</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: mariusz.kosin@pcz.pl

Pomimo wzrastającego zainteresowania technologią lekkiego szkieletu stalowego, nadal brakuje wyników badań dotyczących zagadnień związanych z ich zachowaniem się w sytuacjach wyjątkowych, np. popowodziowych. Wówczas, niezależnie od przyjętej technologii budowy, stawiane są pytania: jaki czas jest potrzebny do osuszenia przegrody i czy po wyschnięciu odzyska ona swoje parametry użytkowe? W artykule podjęto problem związany z określeniem czasu wysychania zawilgoconych przegród. Przedmiotem i celem badań numeryczno-doświadczalnych były materiały tworzące zewnętrzną przegrodę wykonaną w technologii lekkiego szkieletu stalowego oraz określenie czasu potrzebnego do osuszenia nawodnionej przegrody. W pierwszej części wykonano badania doświadczalne związane z wyznaczeniem krzywych sorpcji materiałów tworzących przegrodę. Dodatkowo do danych doświadczalnych dobrano równania matematyczne izoterm sorpcji najlepiej je opisujące [2, 3]. Druga część badań obejmowała symulację numeryczną osuszania modeli przegro-

dy zewnętrznej przyjętych do analizy. Do jej przeprowadzenia wykorzystano dane z badań eksperymentalnych.

### Technologia lekkiego szkieletu stalowego

Do budowy domów w technologii lekkiego szkieletu stalowego w Polsce stosuje się zimnogięte profile spełniające warunki podane w PN-EN 1993-1-3 [4]. Technologia ta bazuje na profilach C i ich pochodnych. Konstrukcja przegród zewnętrznych pokryta jest płytami drewnopochodnymi, a w przypadku przegród wewnętrznych preferowane są płyty gipsowo-kartonowe lub płyty gipsowo-włókniste. Elementy konstrukcyjne budynku, wykonane z profili cienkościennych, tworzą panele strukturalne ścian, podłóg i dachów [5, 6], łączone za pomocą wkrętów i mechanicznych kotew, tworząc szkielet bryły budynku. W zależności od warunków gruntowo-wodnych, stalowa konstrukcja szkieletowa mocowana jest do betonowych ław lub płyty betonowej, na której należy wykonać izolację przeciwwilgociową. Lekkie konstrukcje sta-

lowe bazują na module 60 cm, co oznacza, że w takiej odległości są umieszczone względem siebie poszczególne elementy szkieletu ściany [7]. Utworzony szkielet konstrukcji obudowany zostaje płytami drewnopochodnymi mocowanymi w kierunku wzdłużnym równoległym do słupków. W ten sposób powstaje konstrukcja warstwowa, w której prowadzone są instalacje. Wolna przestrzeń między profilami wypełniana jest materiałem izolacyjnym. Wykończenie powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej nie stwarza żadnych ograniczeń.

### Badania doświadczalne

Materiałem poddanym badaniom był mineralny tynk cienkowarstwowy, wełna mineralna „twarda”, płyta OSB, wełna mineralna „miękka” oraz płyta gipsowo-kartonowa (g-k). Próbkę do badań sorpcyjności przygotowano wg zaleceń normy PN-EN ISO 12571:2013-12 [8]. Sorpcja i nasiąkliwość każdego zbadanego materiału określona została na podstawie wartości średniej otrzymanej z trzech próbek. Podstawowe dane materiałowe badanych próbek zestawiono w tabeli 1. Informacje dotyczące współczynnika przewodzenia ciepła pochodzą z deklaracji producenta.

Badanie sorpcji wykonano w komorze klimatycznej zgodnie z normą PN-EN ISO 12571:2002 *Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych* [8]. Próbkę przed badaniem w komorze klimatycznej

**Tabela 1. Dane próbek poddanych badaniu sorpcji i nasiąkliwości**

Table 1. Data of samples subjected to sorption and water absorption tests

Material	Wymiary badanych próbek [cm]	Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m•K)]
Tynk mineralny cienkowarstwowy	10 x 10 x 0,05	1660	0,8
Wełna mineralna „twarda”	20 x 20 x 14	94	0,035
Płyta OSB	20 x 20 x 12	585	0,13
Wełna mineralna „miękka”	20 x 20 x 5	31	0,035
Płyta gipsowo-kartonowa	20 x 20 x 1,25	642	0,25

nej suszone były do stałej masy wg normy PN-EN ISO 12570 [9] w suszarce firmy Binder (fotografia a). Natomiast w komorze klimatycznej ToRoPol K008 (fotografia b) określono ilość wilgoci, którą pochłaniał materiał w temperaturze 20°C przy pięciu poziomach wilgotności względnej powietrza (RH = 65, 70, 80, 90 i 97%). Użyta komora klimatyczna pozwalała przeprowadzić badania od początkowej wilgotności względnej powietrza równej 65%.



Urządzenia wykorzystane w badaniach sorpcji: a) komora temperaturowa Binder; b) komora klimatyczna ToRoPol Binder  
 Devices used in sorption tests: a) Binder temperature chamber; b) ToRoPol Binder climatic chamber

**Badanie sorpcji** polegało na okresowym ważeniu próbek do momentu osiągnięcia stanu równowagi wilgotnościowej przy wszystkich zakładanych poziomach wilgotności względnej. Zawartość wilgoci  $w_s$  po osiągnięciu stanu równowagi na każdym z pięciu poziomów wilgotności określono w odniesie-

niu do objętości suchego materiału wg wzoru:

$$w_s = u \cdot \rho_o \quad (1)$$

gdzie:

$u$  – wilgotność masowa;

$\rho_o$  – gęstość próbki w stanie suchym [kg/m<sup>3</sup>].

Wilgotność masowa  $u$  określona została z równania:

$$u = (m - m_o) / m_o \quad (2)$$

gdzie:

$m$  – masa próbki w stanie równowagi sorpcyjnej [kg];

$m_o$  – masa próbki wysuszonej [kg].

Gęstość próbki  $\rho_o$  w stanie suchym określono za pomocą wzoru:

$$\rho_o = m_o / V \quad (3)$$

gdzie:

$m_o$  – masa próbki wysuszonej [kg],

$V$  – objętość wysuszonej próbki [m<sup>3</sup>].

W tabeli 2 zestawiono parametry analizowanych próbek wysuszonych do stałej masy oraz ich masę w stanie równowagi sorpcyjnej.

Drugi blok eksperymentalny dotyczył określenia **nasiąkliwości** przy pełnym zanurzeniu próbek [10] przez pomiar zmiany ich masy po całkowitym zanurzeniu w wodzie przez 28 dni i pozostawionych przez 10 min na stole w celu odsączenia. W tabeli 3 przedstawione zostały wyniki masy próbek poddanych badaniu nasiąkliwości, którą wyznaczono, korzystając ze wzoru:

$$w_n = (m_{28} - m_o) / V \quad (4)$$

gdzie:

$w_n$  – nasiąkliwość [kg/m<sup>3</sup>];

$m_{28}$  – masa badanej próbki po całkowitym zanurzeniu przez 28 dni [kg];

$m_o$  – masa suchej próbki [kg];

$V$  – początkowa objętość próbki [m<sup>3</sup>].

### Analiza wyników badań doświadczalnych

Uzyskane wyniki z badań sorpcji i nasiąkliwości (tabela 4) posłużyły jako dane do przeprowadzenia analizy numerycznej. Wartość 100% odpowiada wilgotności osiągniętej przez próbki w badaniu nasiąkliwości. Dodatkowo krzywe izoterm sorpcji zaproksymowano przy użyciu równań opisanych w literaturze [2, 3]. Analizując przedstawione w pracach modele oraz biorąc pod uwagę ich korelację z wynikami badań eksperymentalnych, najlepszą korelację zapewniły funkcje D’Arcy-Watta, Chena Y. i Chena Z., Jovanoviča. Stałe w modelach matema-

**Tabela 2. Dane materiałowe uzyskane z obliczeń i pomiarów w komorze klimatycznej**  
 Table 2. Material data obtained from calculations and measurements in the climatic chamber

Material	Tynk	Welna „twarda”	Płyta OSB	Welna „miękka”	Płyta g-k	
Objętość suchej próbki V [m <sup>3</sup> ]	0,00005	0,0056	0,00048	0,002	0,0005	
Gęstość w stanie suchym ρ <sub>o</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	1661,80	93,88	585,04	30,55	642,42	
Masa suchej próbki m <sub>o</sub> [kg]	0,08309	0,52575	0,28082	0,06109	0,32121	
Masa próbki w stanie równowagi sorpcyjnej m [kg] w przypadku zakładanych poziomów wilgotności względnej	65%	0,08339	0,53023	0,32642	0,06279	0,32443
	70%	0,08347	0,53085	0,32978	0,06291	0,32476
	80%	0,08366	0,53152	0,33410	0,06311	0,32533
	90%	0,08447	0,53281	0,34034	0,06369	0,32991
	97%	0,08803	2,13302	0,36386	0,06575	0,36221

**Tabela 3. Masa materiałów suchych i po wykonaniu badania nasiąkliwości**  
 Table 3. Weight of dry materials and after water absorption test

Material	Tynk	Welna „twarda”	Płyta OSB	Welna „miękka”	Płyta g-k
Masa suchej próbki m <sub>o</sub> [kg]	0,08309	0,52575	0,28082	0,06109	0,32121
Masa mokrej próbki m <sub>28</sub> [kg]	0,09133	4,51312	0,72818	1,30289	0,60321
Procentowy przyrost masy próbki [%]	9,92	758,41	159,31	2032,73	87,79

**Tabela 4. Dane uzyskane w wyniku badań sorpcji i nasiąkliwości**  
 Table 4. Data obtained as a result of sorption and water absorption tests

Material	Tynk	Welna „twarda”	Płyta OSB	Welna „miękka”	Płyta g-k	
Zawartość wilgoci w materiale [kg/m <sup>3</sup> ] w przypadku zakładanych poziomów wilgotności względnej i nasiąkliwości	65%	6	0,8	95	0,85	6,43
	70%	7,5	0,91	102	0,91	7,1
	80%	11,3	1,03	111	1,01	8,23
	90%	27,6	1,26	124	1,3	17,4
	97%	98,7	287	173	2,33	82
	100% <sup>1)</sup>	164,7	712	932	621	564

<sup>1)</sup> Wilgotność osiągnięta przez próbki w badaniu nasiąkliwości

tycznych wyznaczono za pomocą programu do analizy danych SciDAVis. Wymienione równania z wartościami współczynnika korelacji R przedstawiono w tabeli 5.

Wartości uzyskanej wilgotności sorpcyjnej (RH = 65, 70, 80, 90 i 97%) w temperaturze 20°C pozwoliły na wykreślenie izoterm sorpcji badanych ma-

teriałów. Wyniki eksperymentalne oraz uzyskane na podstawie przyjętych modeli Jovanoviča, Chena Y. i Chena Z., D’Arcy – Watta zestawiono z wynikami izoterm sorpcji dostępnymi w bazie danych programu WUFI Pro (rysunek 1). Wartości izoterm uzyskanych na podstawie badań i modelu matematycznego wykazały korelację z izotermami do-

**Tabela 5. Wyniki aproksymacji sorpcji analizowanych materiałów**  
 Table 5. Results of sorption approximation of the analyzed materials

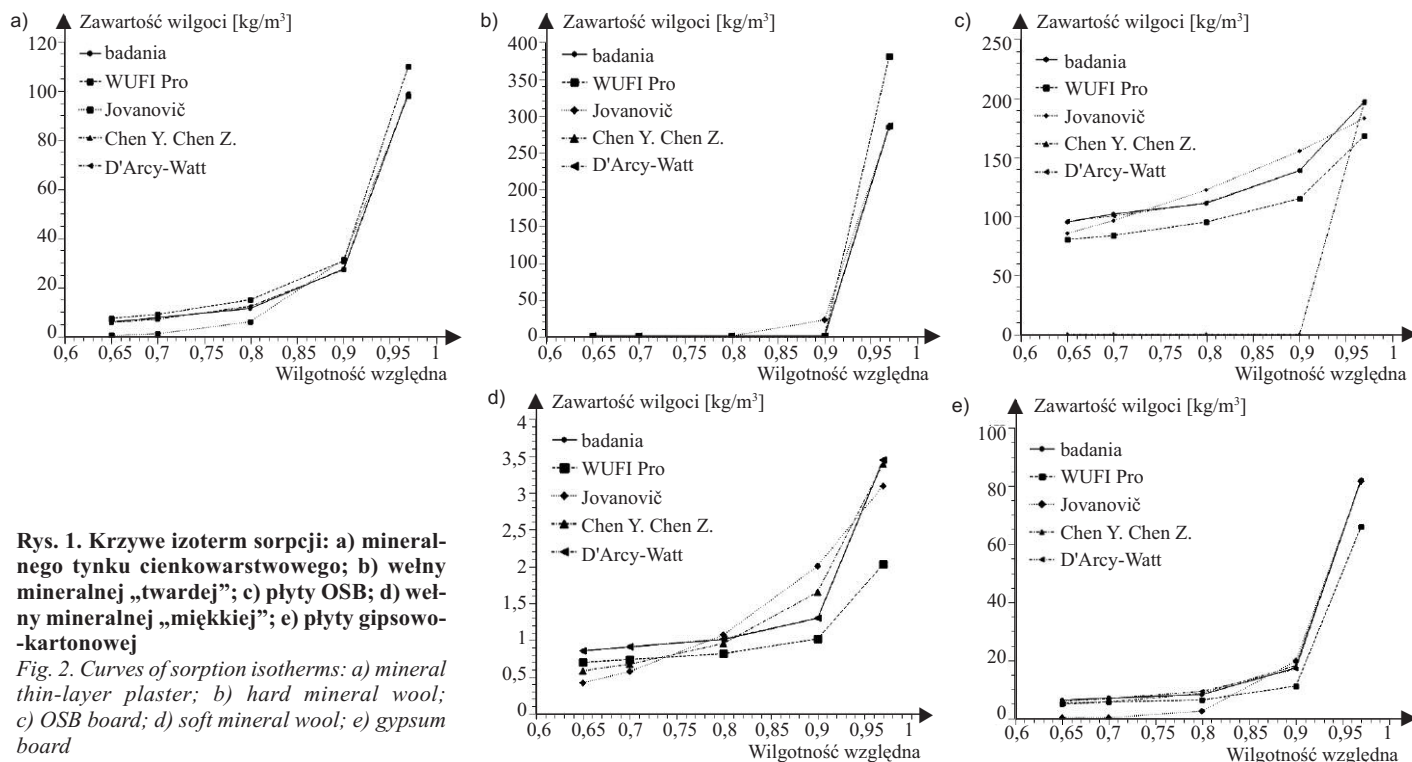
Równania	Współczynniki	Tynk	Welna mineralna „twarda”	Płyta OSB	Welna mineralna „miękka”	Płyta g-k
Jovanoviča $a = a_m [1 - \exp(-a''h)] \exp(b''h)$	a <sub>m</sub>	0,028489	4,065473e-06	18,155263	0,007345	0,003603
	a''	0,001413	9,784240e-06	33,607601	30,499860	0,000197
	b''	15,190932	35,295298	2,383648	6,230443	19,163226
	R	<b>0,989549</b>	<b>0,994531</b>	<b>0,992246</b>	<b>0,916920</b>	<b>0,982836</b>
Chena Y. i Chena Z. $u_t = \frac{a\varphi}{(1 + b\varphi)(1 - c\varphi)}$	a	3,126038	0,000928	0,000103	2 011,086785	9 955,088024
	b	0,035448	-1,030934	-5,008427	9 248,082288	6 004,960142
	c	1,000311	1,534948	1,030927	0,964774	1,010080
	R	<b>0,999899</b>	<b>0,999955</b>	<b>0,431784</b>	<b>0,983963</b>	<b>0,999233</b>
D’Arcy – Watt $a = \frac{K_1 K_2 \frac{p}{p_s} + C \frac{p}{p_s}}{1 - K_1 \frac{p}{p_s}} + \frac{k_1 k_2 \frac{p}{p_s}}{1 - k_1 \frac{p}{p_s}}$	K <sub>1</sub>	1,000311	1,030882	0,788699	0,969964	1,016585
	K <sub>2</sub>	1,904515	0,006275	-451,488418	3,229572	0,535119
	C	0,097579	1,220305	275,500000	1,584139	5,595475
	k <sub>1</sub>	1,000286	1,030882	0,833665	0,965014	1,015266
	k <sub>2</sub>	1,114723	0,006291	331,232651	-3,379059	0,596252
	R	<b>0,999899</b>	<b>0,999999</b>	<b>0,999959</b>	<b>0,999997</b>	<b>0,999731</b>

stępnymi w bazie programu WUFI Pro. Oceny dopasowania równań do rezultatów badań i danych uzyskanych z programu dokonano za pomocą współczynnika korelacji. Z rozważanych równań izoterm sorpcji dobrą zgodność, w przypadku wszystkich analizowanych materiałów, zapewnia równanie D’Arcy – Watt. Modele Jovanoviča, Chena Y. i Chena Z. odzwierciedlają również charakter krzywych sorpcji otrzymany z badań doświadczalnych. Wyjątek stanowi funkcja Chena Y. i Chena Z. w przypadku płyty OSB.

### Analiza numeryczna

Zadaniem analizy numerycznej było zamodelowanie procesu wysychania ściany popowodziowej za pomocą programu WUFI Pro [11, 12]. Program ten jest narzędziem do sprzężonej symulacji ciepłno-wilgotnościowej i bazuje na modelu Kunzela, który uwzględnia wpływ klimatu na zachodzące procesy w przegrodach zewnętrznych [13]. W celu porównania ze ścianą nasiąkniętą wodą rozpatrzone przypadki materiałów tworzących przegrodę o zawartości wody odpowiadającej 65% wilgotności względnej. W symulacji wykorzystano informacje o zawartości wody w materiale z przeprowadzonych badań eksperymentalnych (tabela 6). Ze względu na brak zdolności sorpcyjnych folii paroprzepuszczalnej i paroizolacyjnej pominięto je w tabeli 6.

Warunki klimatu zewnętrznego, a więc temperaturę, wilgotność powietrza, nasłonecznienie i opady atmosferyczne ustalono dla miasta Krakowa. Parametry mikroklimatu wewnętrznego przyjęto dla 3 klasy wilgotności wewnętrznej i temperatury 20°C [14]. Założono, że ściana jest zwrócona na południe. Symulacja obejmowała trzy okresy obliczeniowe rozpoczynające się od pierwszego sierpnia i trwające miesiąc, rok i 2 lata. Do symulacji przyjęto dwie przegrody opisane odpowiednio jako model 1 i model 2 (rysunek 2). Model 1 zakładał analizę przegrody ze wszystkimi materiałami, natomiast model 2 po usunięciu tynku zewnętrznego oraz ocieplenia zewnętrznego w postaci wełny mineralnej „twardej”.



Rys. 1. Krzywe izoterm sorpcji: a) mineralnego tynku cienkowarstwowego; b) wełny mineralnej „twardej”; c) płyty OSB; d) wełny mineralnej „miękkiej”; e) płyty gipsowo-kartonowej

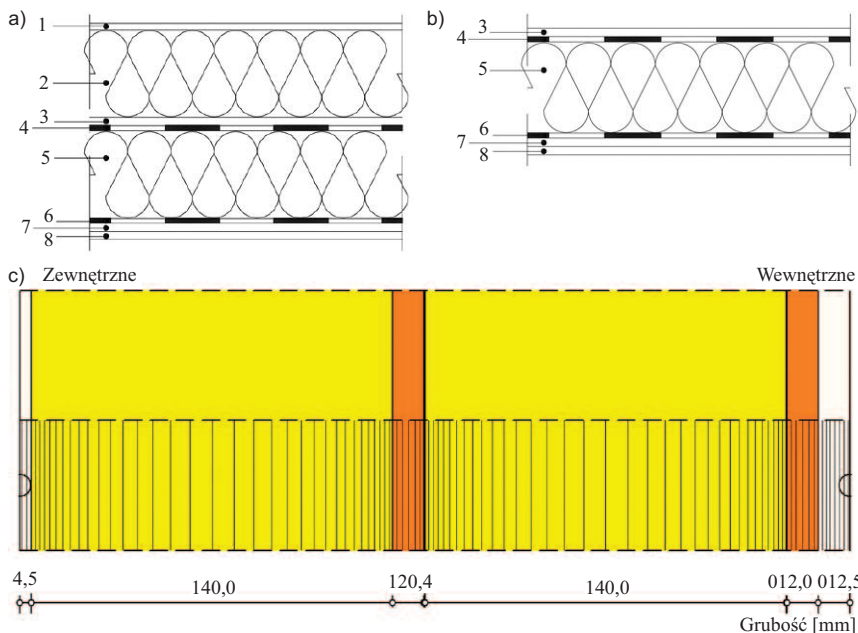
Fig. 2. Curves of sorption isotherms: a) mineral thin-layer plaster; b) hard mineral wool; c) OSB board; d) soft mineral wool; e) gypsum board

Tabela 6. Początkowa zawartość wody w materiałach przegrody zewnętrznej

Table 6. Initial water content in envelope materials

Material		Tynk	Wełna „twarda”	Płyta OSB	Wełna „mięka”	Płyta g-k
Zawartość wilgoci w materiale [kg/m³]	0%	0	0	0	0	0
w przypadku zakładanych poziomów wilgotności względnej i nasiąkliwości	65%	6	0,8	95	0,85	6,43
	100% <sup>1)</sup>	164,7	712	932	621	564

<sup>1)</sup> Wilgotność osiągnięta przez próbki w badaniu nasiąkliwości



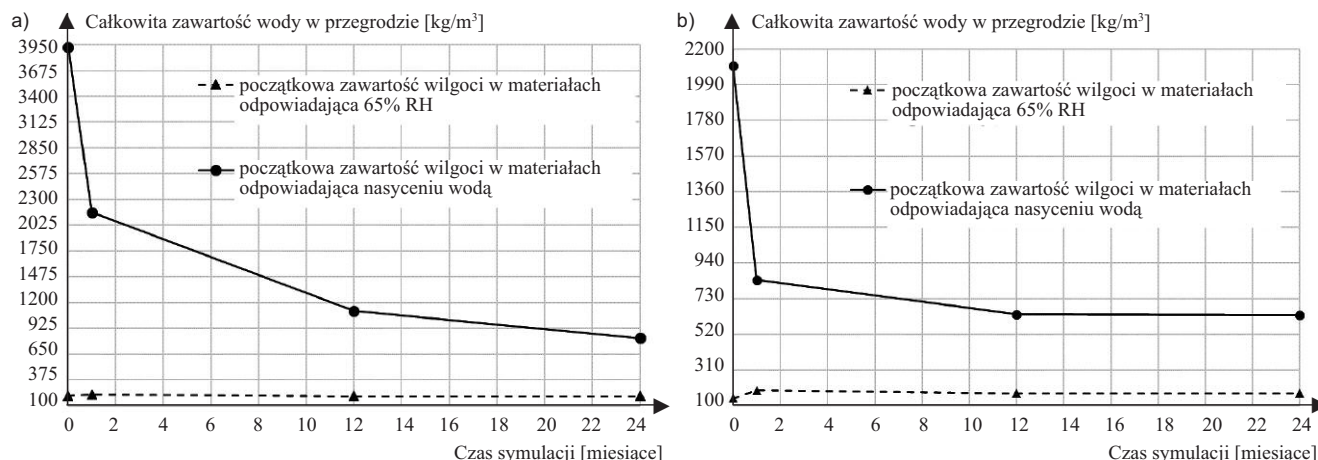
Rys. 2. Konstrukcja przegrody zewnętrznej poddanej analizie osuszania w programie WUFI: a) model przegrody z wszystkimi jej materiałami – model 1; b) model przegrody bez tynku i ocieplenia zewnętrznego – model 2; c) widok modelu 1 w programie WUFI

Fig. 2. The structure of the partition subjected to drying analysis in the WUFI program: a) model of the partition with all its materials – model 1; b) model of the partition without plaster and external insulation – model 2; c) view of model 1 in the WUFI program

### Wyniki analizy numerycznej

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej, przy różnych warunkach brzegowych, oszacowano zawartość wody i czas osiągnięcia równowagi wilgotnościowej w rozpatrywanych przegrodach (model 1 i model 2). Wyniki zaprezentowano w postaci wykresów zmiany ilości wody w przyjętych okresach obliczeniowych (rysunek 3) oraz całkowitej zawartości wilgoci w przegrodzie (tabela 7). Z analizy rysunku 3 wynika, że w przypadku nasycenia przegrody wodą nastąpił w pierwszym miesiącu symulacji jej spadek o ok. 44% w przypadku modelu I i 66% modelu II. Po dwuletnim okresie obliczeniowym przegroda z wszystkimi materiałami (model I) nie wykazuje dochodzenia do poziomu wilgotności ustabilizowanej w odróżnieniu od modelu II (tabela 7).

W przypadku zakładanego poziomu wilgotności względnej wynoszącej 65% i ustalonych warunków materiały w obu analizowanych modelach osiągnęły stan równowagi po pierwszym roku. Przy pełnym nasyceniu materiałów wodą nawet pozbycie się części materiału z przegrody (model II) i dwuletni okres osuszania nie prowadzą do osiągnięcia równowagi wilgotnościowej (tabela 7). Przeprowadzona



Rys. 3. Zmiana zawartości wody w przyjętych okresach obliczeniowych: a) model I; b) model II

Fig. 3. Change in water content in the adopted calculation periods: a) model I; b) model II

Tabela 7. Wyjściowa zawartość wody w materiałach przegrody zewnętrznej

Table 7. The initial water content of the partition materials

Całkowita zawartość wilgoci w przegrodzie [kg/m <sup>3</sup> ]		
Poziomy odczytu	Model I	Model II
Początek symulacji 65%	204,08	190,85
1 miesiąc	217,85	188,92
1 rok	199,84 <sup>1)</sup>	172,92 <sup>1)</sup>
2 lata		
Początek symulacji 100% <sup>2)</sup>	3925,7	2485
1 miesiąc	2163,01	839,86
1 rok	1108,95	660,08
2 lata	820,72	636,67

<sup>1)</sup> równowaga wilgotnościowa; <sup>2)</sup> przegroda nasycona wodą  
analiza wykazała, że okres wysychania ściany zależy od przyjętego poziomu jej zawilgocenia.

## Podsumowanie i wnioski

Analiza numeryczno-doświadczalna dotyczyła przydatności materiałów przegrody zewnętrznej z chwilą jej zawilgocenia spowodowanego oddziaływaniem wód popowodziowych. Dane z części eksperymentalnej obejmujące sporządzenie izoterm sorpcji i nasiąkliwości analizowanych materiałów posłużyły m.in. do wykonania analizy numerycznej. Dodatkowo do badań sorpcji dobrano funkcje aproksymujące. Natomiast symulacja numeryczna, w zależności od początkowego stanu zawilgocenia przegrody zewnętrznej, pozwalała oszacować ubytek wody w przyjętych okresach obliczeniowych.

Z prezentowanych równań izoterm sorpcji dobrą zgodność z wynikami badań wszystkich analizowanych materiałów zapewnił model D'Arcy – Watt. W przy-

padku analizy numerycznej oba rozpatrywane modele wykazują znaczny ubytek wody w pierwszym miesiącu. Niemniej jednak wykonane symulacje jednoznacznie wskazują na konieczność demontażu materiałów zalanych wodą i zastąpienia ich nowymi. W związku z tym, że rozpatrywano przegrodę w technologii lekkiego szkieletu stalowego, należy mieć na uwadze, że z chwilą usunięcia poszycia usztywniającego (płyty OSB) może nastąpić utrata stateczności budynku, co zostało zaprezentowane w pracy [1], w której przedstawione wyniki były częścią szerszego projektu dotyczącego wykorzystania technologii druku 3D w konstrukcjach z lekkiego szkieletu stalowego. Problem przywrócenia stanu użytkowego budynku w technologii lekkiego szkieletu stalowego, z chwilą zawilgocenia przegród zewnętrznych, nie obejmował w dotychczas uwzględnianych analizach tak obszernie opracowanego programu badań popartych symulacją numeryczną z uwzględnieniem stateczności bryły budynku.

## Literatura

- [1] Kosiń M, Major I, Major M, Kalinowski J. Model tests of bending and torsional deformations of thin-walled profiles stiffened with elements made in 3D printing technology, Case Studies in Construction Materials Vol. 13, Identyfikator DOI: 10.1016/j.cscm. 2020. e00401, 2020.
- [2] Garbalińska H, Siwińska A. Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła cegły silikatowej, Fizyka budowl. Katarzyna i Piotr Klemm S. C., Łódź, 2008.
- [3] Garbalińska H, Siwińska A. Zależność przewodności cieplnej zaprawy cementowej od wilgotności względnej powietrza, Fizyka budowl.

w teorii i praktyce tom III, Instytut Fizyki Budowl. Katarzyna i Piotr Klemm S. C., Łódź, 2008.

[4] PN-EN 1993-1-3:2008/NA:2010 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.

[5] Dubina D, Ungureanu V, Landolfo R. Design of cold-formed steel structures. The European Convention for Constructional Steelwork Brussels, 2012.

[6] Major M, Kosiń M. Lekkie konstrukcje stalowe w budownictwie mieszkaniowym, Materiały i technologie ekologiczne w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2016.

[7] Katalog firmy AmTech, Opis technologii Sunday System. AmTech sp. z o.o. Głogów Małopolski, 2010.

[8] PN-EN ISO 12571:2013-12. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych.

[9] PN-EN ISO 12570:2002. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze.

[10] PN-EN 12087:2013-7. Określenie nasiąkliwości wodą przy długotrwałym zanurzeniu. Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie.

[11] Gawin D, Kossecka E, Künzel H, Radoń J, Więckowska A, Witczak K, Zirkelbach D. Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie w analizach ciepłno-wilgotnościowych przegród budowlanych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2007.

[12] Kosiń M, Major M. Choice of Optimal Material Solutions for the Assessment of Heat and Humidity States of Outer Walls Using the Modern Technology of Light Steel Framing, 20th General Assembly of International Experts and Symposium Heritage for Planet Earth, Florencia, Włochy, 2018.

[13] Künzel H, Radon J, Holm A, Schmidt T, Zirkelbach D. WUFI-pro – handbuch. IBP Holzkirchen Valley, 2003.

[14] PN-EN ISO 13788:2013-05. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowej. Metody obliczania.

Przyjęto do druku: 20.06.2023 r.