

dr inż. Mariusz Kosiński^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2683-7784

dr inż. Jacek Halbiniak¹⁾

ORCID: 0000-0002-2299-5913

Analysis of thermal and moisture properties of materials and drying of frame partitions after short-term dampness

Analiza właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów oraz osuszania przegród szkieletowych po krótkotrwałym zawilgoceniu

DOI: 10.15199/33.2025.10.23

Abstract. The use of frame structures requires the design of partitions with appropriate thermal and moisture properties. The results of material tests (sorption, water absorption, thermal conductivity coefficient) and simulation of partition drying are presented. Laboratory data confirm the high susceptibility of some of the analyzed materials to moisture absorption. Numerical analysis has shown that the partitions do not regain moisture balance even after a dozen or so months.

Keywords: thermal and hygroscopic properties; frame walls; drying; numerical simulation.

Streszczenie. Zastosowanie konstrukcji szkieletowych wymaga projektowania przegród o odpowiednich właściwościach cieplno-wilgotnościowych. Przedstawiono wyniki badań materiałów (sorpcyjność, nasiąkliwość, współczynnik przewodzenia ciepła) oraz symulację osuszania przegród. Dane laboratoryjne potwierdzają dużą podatność niektórych analizowanych materiałów na pochłanianie wilgoci. Analiza numeryczna wykazała, że przegrody nie odzyskują równowagi wilgotnościowej nawet po kilkunastu miesiącach.

Słowa kluczowe: właściwości cieplno-wilgotnościowe; ściany szkieletowe; osuszanie; symulacja numeryczna.

Regulations concerning the design and use of buildings necessitate the implementation of solutions aimed at reducing energy consumption. Consequently, in residential construction, the importance of energy-efficient and low-emission technologies is increasing. Although masonry technology continues to dominate in Poland, skeletal (frame) construction is becoming an increasingly attractive alternative, as it meets energy-saving requirements and allows for rapid erection of buildings [1, 2].

Skeletal structures are based on wooden or steel frames and can be prefabricated or assembled directly on-site [3, 4]. Various configurations of insulating materials are used in these envelopes, which requires analysis of their behavior under variable thermal and moisture conditions [5, 6]. Particularly important is the phenomenon of moisture accumulation, which affects both the heat transfer coefficient and the durability of the partition, as well as the quality of the indoor environment in terms of hygiene and sanitary standards.

In the context of increasing occurrences of extreme weather phenomena – such as heavy rainfall and local flooding – it becomes crucial to assess whether drying or replacing moisture-damaged frame partitions exposed to such events is the more effective solution [7, 8]. Figure 1 illustrates the impact of flooding on buildings constructed using frame technology, with particular attention to causes, effects, and necessary remedial actions. It shows how factors such as floods, intense rainfall, or plumbing failures

Przepisy dotyczące projektowania i użytkowania budynków wymuszają stosowanie rozwiązań charakteryzujących się ograniczeniem zużycia energii. W związku z tym w budownictwie mieszkaniowym zwiększa się znaczenie technologii efektywnych energetycznie i niskoemisyjnych. Choć w Polsce dominuje technologia murowa, alternatywą staje się budownictwo szkieletowe, które spełnia wymagania energooszczędności i pozwala na szybkie wznoszenie obiektów [1, 2].

Konstrukcje szkieletowe bazują na szkielecie z drewna lub stali i mogą być prefabrykowane lub montowane bezpośrednio na placu budowy [3, 4]. W przegrodach tych stosuje się różnorodne układy materiałów izolacyjnych, co wymaga analizy ich zachowania w zmiennych warunkach cieplno-wilgotnościowych [5, 6]. Szczególnie istotne jest zjawisko zawilgocenia, które wpływa zarówno na współczynnik przenikania ciepła, jak i na trwałość przegrody oraz jakość środowiska wewnętrznego budynku pod względem higieniczno-sanitarnym.

W świetle nasilających się zjawisk ekstremalnych, takich jak intensywne opady i lokalne podtopienia, kluczowa staje się ocena, czy skuteczniejsze jest osuszanie, czy też wymiana zawilgoczonych przegród szkieletowych narażonych na tego typu zdarzenia [7, 8]. Na rysunku 1 przedstawiono wpływ podtopień na budynki wykonane w technologii szkieletowej, ze szczególnym uwzględnieniem przyczyn, skutków oraz koniecznych działań naprawczych. Pokazano, jak takie czynniki jak powódź, intensywne opady deszczu czy awarie instalacji mogą prowadzić do zawilgocenia przegród, rozwoju pleśni,

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Correspondence address: mariusz.kosin@pcz.pl

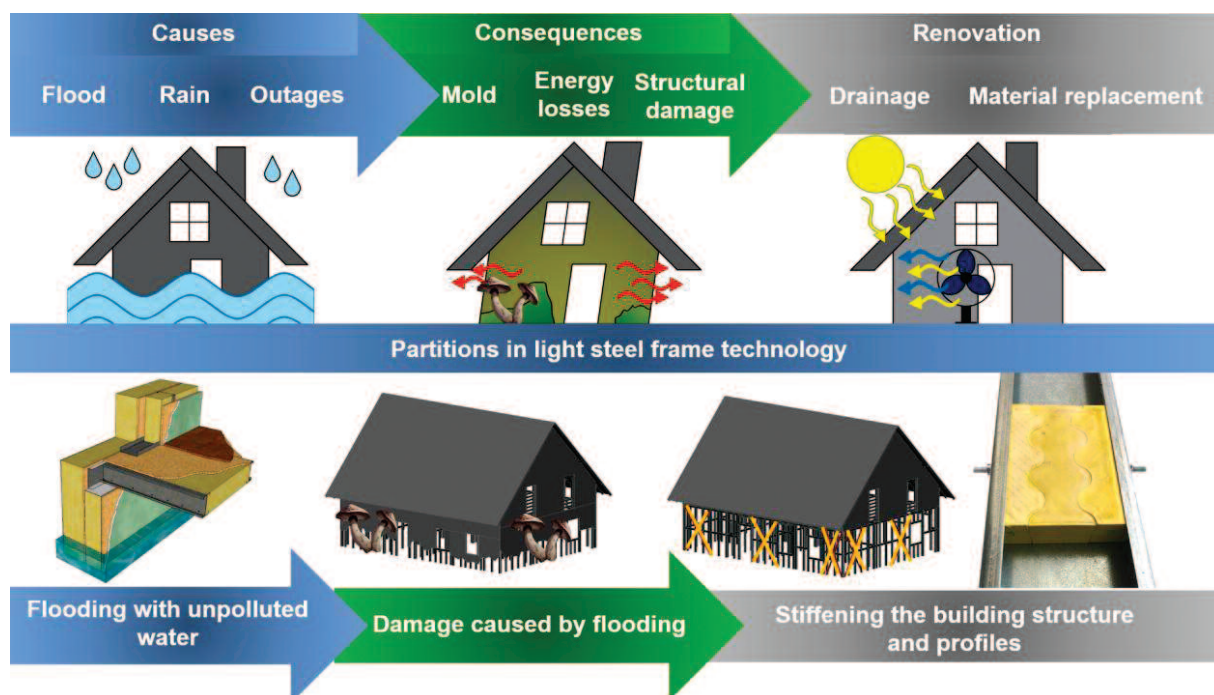


Fig. 1. The impact of flooding on light steel frame buildings – causes, effects and remedial actions

Rys. 1. Wpływ podtopień na budynki w technologii lekkiego szkieletu stalowego – przyczyny, skutki i działania naprawcze

can lead to moisture ingress, mold growth, energy losses, and structural damage. Effective remedial measures include drying, replacing damaged layers, and reinforcing the building envelope or load-bearing profiles (in the case of lightweight steel frames) to restore their original functionality and strength.

Research Method

The influence of short-term flooding on the degree of moisture content and the drying capability of frame walls was evaluated. Both experimental and simulation methods were employed. In the experimental part, four building materials commonly used in frame wall assemblies were examined: cement mortar, rigid and soft mineral wool, and oriented strand board (OSB). For each sample, sorption capacity, water absorption during immersion, and variations in thermal conductivity depending on moisture content were determined.

The obtained material data were then used to construct three variants of external wall models, which were subsequently subjected to computer simulations. The models differed in the configuration of layers and the presence of an air cavity. Calculations were carried out for three scenarios: standard operating conditions, natural drying after flooding, and drying under conditions favorable to evaporation. The analysis focused on the behavior of frame partitions under increased humidity conditions.

Material and Tests

The range of materials subjected to hygrothermal testing included those forming the structure of a vertical external partition. Four materials were tested: cement mortar as the external protective layer (plaster), external thermal insulation

strat energetycznych oraz uszkodzeń strukturalnych. Skuteczne działania naprawcze obejmują osuszanie, wymianę zniszczonych warstw, a także usztywnienie bryły budynku czy profili nośnych w przypadku lekkiego szkieletu stalowego w celu przywrócenia ich pierwotnej funkcji i wytrzymałości.

Metoda badań

Oceniono wpływ krótkotrwałego zalania na stopień zawilgocenia oraz zdolność do osuszania ścian szkieletowych. Wykorzystano zarówno metody eksperymentalne, jak i symulacyjne. W części doświadczalnej przebadano cztery materiały budowlane stosowane w przegrodach szkieletowych: zaprawę cementową; wełnę mineralną twardą i miękką oraz płytę OSB. W przypadku każdej próbki określono sorpcyjność, nasiąkliwość przy zanurzeniu oraz zmienność przewodności cieplnej w zależności od zawartości wilgoci.

Uzyskane dane materiałowe posłużyły do budowy trzech wariantów ścian zewnętrznych, które następnie poddano symulacjom komputerowym. Modele różniły się konfiguracją warstw i obecnością pustki powietrznej. Przeprowadzono obliczenia dotyczące trzech scenariuszy: standardowych warunków eksploatacyjnych; naturalnego osuszania po zalaniu oraz osuszania w warunkach sprzyjających odparowaniu. Analiza dotyczyła zachowania przegród szkieletowych w warunkach zwiększonej wilgotności.

Materiał i badania

Zakres materiałów poddanych testom cieplno-wilgotnościowym obejmował materiały stanowiące strukturę pionowej przegrody zewnętrznej. Badaniom poddano cztery materiały: zaprawę cementową jako zewnętrzną warstwę osłonową (tynk), ze-

made of rigid mineral wool, oriented strand board (OSB), and internal thermal insulation made of soft mineral wool. The samples were taken from an experimental partition used as the basis for strength tests conducted at the Department of Civil Engineering of the Faculty of Civil Engineering, Częstochowa University of Technology. The dimensions of samples for hygrothermal testing were adopted in accordance with PN-EN ISO 12571:2002 [9]. The size of cement mortar samples was 100×100 mm, while other materials measured 200×200 mm. Laboratory tests determined sorption capacity and thermal conductivity.

The thickness of the samples corresponded to the thickness of the materials used in the partition. Other data required for numerical calculations were taken from PN-EN ISO 10456:2007 [10] or from manufacturers' technical data sheets (Table 1).

Table 1. Material data of the analyzed vertical external partition

Tabela 1. Dane materiałowe analizowanej pionowej przegrody zewnętrznej

Material/Material	Thickness [m]/ Grubość [m]	Bulk density [kg/m ³]/ Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Specific heat ¹⁾ [J/(kg·K)]/Ciepło właściwe ¹⁾ [J/(kg·K)]	Water vapor diffusion resistance factor ¹⁾ μ [-]/Współczynnik oporu dyfuzyjnego ¹⁾ μ [-]	Porosity ¹⁾ [-]/ Porowatość ¹⁾ [-]
Cement mortar/Zaprawa cementowa	0,005	1661,8	1000	10	0,36
Rigid mineral wool/Wetna mineralna twarda	0,12	93,88	1030	1	0,95
OSB board/Płyta OSB	0,012	585,04	1700	50	0,93
Wind barrier membrane/Wiatroizolacja	0,00045	980	1800	11	0,01
Soft mineral wool/Wetna mineralna miękka	0,09	30,55	1030	1	0,95
Vapor barrier/Paroizolacja	0,00002	1130	1600	300000	0,01

¹⁾ material data obtained from PN-EN ISO 10456:2007 and WUFI software/dane materiałowe z normy PN-EN ISO 10456:2007, dane z programu WUFI

Laboratory tests determined sorption isotherms and the moisture content reached by materials immersed in water for a specified period. Sorption tests were performed under selected hygrothermal conditions. Three samples of each material were placed in each humidity condition. Sorption and water absorption were determined based on the average values obtained from the three samples.

Sorption capacity was determined using the static method, which involves measuring the mass of absorbed water until the sample reaches equilibrium moisture content at each assumed level of relative humidity. The tests were carried out in a climatic chamber at a constant temperature of 20°C and relative humidity levels of 65, 70, 80, 90, and 97%. Sorption properties were determined according to PN-EN ISO 12571:2013 [9]. Sorption measurements consisted of recording the sample mass until equilibrium was achieved at a given humidity level. Mass changes were registered using an electronic balance with an accuracy of 1 mg under room conditions (20°C, RH = 55%) at specified time intervals. The time to achieve sorption equilibrium for each material is presented in Table 2. Before testing, samples were dried to a constant mass at 105°C [9] (Table 3).

After determining sorption capacity, the samples were subjected to immersion sorption tests to determine water absorption over specific time intervals (Table 4). In accordance with standard [11], before weighing, the samples were drained by gravity for 10 minutes after each immersion cycle. Average results were used to calculate sorption moisture and water absorption (Tables 4 and 5).

wewnętrzną izolację termiczną z twardej wełny mineralnej, płytę OSB i wewnętrzną izolację termiczną z miękkiej wełny mineralnej. Próbkę zostały pobrane z eksperymentalnej przegrody stanowiącej bazę do badań wytrzymałościowych, prowadzonych w Katedrze Budownictwa Lądowego Wydziału Budownictwa Politechniki Częstochowskiej. Wymiary próbek do badań cieplno-wilgotnościowych przyjęto wg PN-EN ISO 12571:2002 [9]. Wielkość próbek zaprawy cementowej wynosiła 100×100 mm, a pozostałych materiałów 200×200 mm. W badaniach laboratoryjnych wyznaczono sorpcyjność i współczynnik przewodzenia ciepła.

Grubość próbek była zgodna z grubością materiału wbudowanego w przegrodzie. Pozostałe dane konieczne do wykonania obliczeń numerycznych zostały przyjęte z PN-EN ISO 10456:2007 [10] lub kart katalogowych producentów materiałów (tabela 1).

W wyniku badań laboratoryjnych wyznaczono izotermy sorpcji oraz zawartość wilgoci osiągniętej przez materiał zanurzony w wodzie przez określony czas. Testy sorpcji zrealizowano w wybranych warunkach cieplno-wilgotnościowych. W danych warunkach wilgotnościowych umieszczono po trzy próbki każdego materiału. Ich sorpcja i nasiąkliwość została określona na podstawie wartości średniej otrzymanej z trzech próbek.

Sorpcyjność określono metodą statyczną, polegającą na oznaczaniu ilości zaabsorbowanej masy absorbentu przez pomiar masy próbek do chwili osiągnięcia stanu równowagi wilgotnościowej przy wszystkich zakładanych poziomach wilgotności względnej. Badania wykonano w komorze klimatycznej w stałej temperaturze 20°C i wilgotności względnej równej 65, 70, 80, 90, 97%. Właściwości sorpcyjne zostały określone wg zaleceń PN-EN ISO 12571:2013 [9]. Wykonane pomiary sorpcji polegały na odczytywaniu masy próbki do momentu osiągnięcia stanu równowagi przy określonej wilgotności względnej. Zmianę masy próbek rejestrowano na wadze elektronicznej o dokładności 1 mg w warunkach pokojowych (20°C, RH = 55%) w określonych odstępach czasu. Czas osiągnięcia równowagi sorpcyjnej badanych materiałów przedstawiono w tabeli 2. Przed umieszczeniem w komorze klimatycznej próbki wysuszone do stałej masy w temperaturze 105°C [9] (tabela 3).

Po wyznaczeniu sorpcyjności, próbki poddano testom nasiąkliwości przez całkowite zanurzenie w wodzie na określony czas (tabela 4). Zgodnie z normą [11], przed ważeniem, badany materiał poddawano po każdym cyklu zanurzeniowym grawitacyjnemu odsączaniu przez 10 min. Z uśrednionych wyników obliczono zawilgocenie sorpcyjne i nasiąkliwość (tabele 4 i 5).

Table 2. Time to reach sorption equilibrium of the tested materials
Tabela 2. Czas osiągnięcia równowagi sorpcyjnej badanych materiałów

Material/Material	Relative humidity RH [%] and time [days] required to achieve sorption equilibrium of the tested materials [%]/Czas [dni] potrzebny do osiągnięcia równowagi sorpcyjnej badanych materiałów o wilgotności względnej RH [%]				
	65	70	80	90	97
Cement mortar/ Zaprawa cementowa	10	14	17	21	29
Rigid mineral wool/ Wełna mineralna twarda	23	25	18	14	20
OSB board/Płyta OSB	9	13	17	24	33
Soft mineral wool/ Wełna mineralna miękka	19	21	19	16	12

Table 4. Average water absorption after a specified immersion time
Tabela 4. Średnia nasiąkliwość po określonym czasie zanurzenia

Material/Material	Water absorption w_n [kg/m ³] after a specified immersion time [hours]/Nasiąkliwość w_n [kg/m ³] po określonym czasie zanurzenia [h]								
	1	2	24	48	72	96	120	144	168
Cement mortar/ Zaprawa cementowa	71	79,6	80	84,6	92,8	107,4	119,4	138,6	146,8
Rigid mineral wool/ Wełna mineralna twarda	433,3	512,3	620,9	649,4	660,4	669,8	678,9	687,1	692,2
OSB board/Płyta OSB	603,7	693,7	801,9	843,6	873,3	884,6	893,7	903,1	907,5
Soft mineral wool/ Wełna mineralna miękka	476,9	521,4	545,8	564,2	571,2	578,4	586,4	594,2	602,3

The analysis showed that OSB boards and mineral wool (especially the soft type) quickly absorb moisture and exhibit high water uptake, making them susceptible to permanent dampness. Although cement mortar is more resistant, it also significantly increases its water content under high humidity. In the context of frame wall construction, this means that under conditions of elevated humidity or flooding (e.g., during local inundation), the structure can become wet very rapidly. Materials such as OSB boards may become unstable and degrade, while saturated mineral wool loses its thermal insulation properties.

Subsequently, thermal conductivity coefficients (λ) [12, 13, 14] were measured using a plate apparatus with a temperature difference of 20°C (+20°C on the heating plate and 0°C on the cooling plate). For this purpose, materials previously subjected to moisture testing were used. Measurements were conducted in two stages: the first for samples dried to constant mass, and the second for samples moistened by immersion for 2 and 24 hours. For moist samples, aluminum foil was applied to limit moisture migration. The results of thermal conductivity tests are presented in Table 6.

Table 6. Thermal conductivity coefficients

Tabela 6. Współczynniki przewodzenia ciepła

Material/ Material	Thermal conductivity coefficient λ [W/(m·K)]/Współczynniki przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]		
	dry sample/ próbka sucha	2h immersion/ 2 h nasiąkliwości	24 h immersion/ 24 h nasiąkliwości
Cement mortar/ Zaprawa cementowa	1,206	1,339	1,385
Rigid mineral wool/ Wełna mineralna twarda	0,043	0,219	0,297
OSB board/Płyta OSB	0,152	0,379	0,428
Soft mineral wool/ Wełna mineralna miękka	0,049	0,235	0,264

Table 3. Mass of dried samples and in sorption equilibrium
Tabela 3. Masa próbek wysuszonych i w stanie równowagi sorpcyjnej

Material/Material	Dry sample mass [kg]/ Masa próbki suchej [kg]	Samples mass [kg] at sorption equilibrium/Masa próbki [kg] w stanie równowagi sorpcyjnej				
		65%	70%	80%	90%	97%
Cement mortar/ Zaprawa cementowa	0,083	0,083	0,083	0,084	0,084	0,088
Rigid mineral wool/ Wełna mineralna twarda	0,525	0,530	0,531	0,532	0,533	0,573
OSB board/Płyta OSB	0,281	0,326	0,330	0,334	0,340	0,364
Soft mineral wool/ Wełna mineralna miękka	0,061	0,063	0,063	0,063	0,064	0,066

Table 5. Average stabilized sorption moisture content

Tabela 5. Średnia ustabilizowana zawartość wilgoci sorpcyjnej

Material/Material	Sorption moisture content in s [kg/m ³] for a given relative humidity RH [%]/Zawartość wilgoci sorpcyjnej w_s [kg/m ³] w przypadku określonej wilgotności względnej RH [%]				
	65%	70%	80%	90%	97%
Cement mortar/ Zaprawa cementowa	6	7,6	11,4	27,6	98,8
Rigid mineral wool/ Wełna mineralna twarda	0,8	0,91	1,03	1,26	8,44
OSB board/Płyta OSB	95	102	111	124	173
Soft mineral wool/ Wełna mineralna miękka	0,85	0,91	1,01	1,3	2,33

Analiza wykazała, że płyta OSB i wełna mineralna (szczególnie miękka) szybko chłona wilgoć i osiągają dużą nasiąkliwość, co czyni je podatnymi na trwałe zawilgocenie. Zaprawa cementowa, choć bardziej odporna, również znacznie zwiększa zawartość wody przy dużej wilgotności. W kontekście ścian szkieletowej oznacza to, że w warunkach zwiększonej wilgotności lub zalania (np. podczas podtopień), konstrukcja może bardzo szybko ulec zawilgoceniu. Materiały takie jak płyty OSB mogą stawać się niestabilne i ulegać degradacji, a nasiąknięta wełna mineralna straci swoje właściwości izolacyjne.

W dalszej kolejności wykonano pomiary współczynników przewodzenia ciepła λ [12, 13, 14] aparatem płytowym, przy różnicy temperatury 20°C (+20°C na płycie grzejnej, 0°C na płycie chłodzącej). Do tego celu wykorzystano materiał poddany testom wilgotnościowym. Pomiary zrealizowano w dwóch etapach. Pierwszy dotyczył próbek wysuszonych do stałej masy, a drugi próbek zawilgoczonych w wyniku określenia nasiąkliwości po zanurzeniu przez 2 i 24 h. W przypadku próbek wilgotnych, mając na uwadze ograniczenie przemieszczania się wilgoci, zaizolowano je folią aluminiową. Wyniki badań przewodności cieplnej przedstawiono w tabeli 6.

The greatest increase in thermal conductivity was observed for mineral wool, both rigid and soft, whose λ value increased several times after 24 hours of soaking. OSB boards also showed high susceptibility to moisture. The least sensitive was cement mortar, whose λ coefficient increased only slightly. These results confirm that protecting materials from moisture is crucial to maintaining their thermal insulation properties.

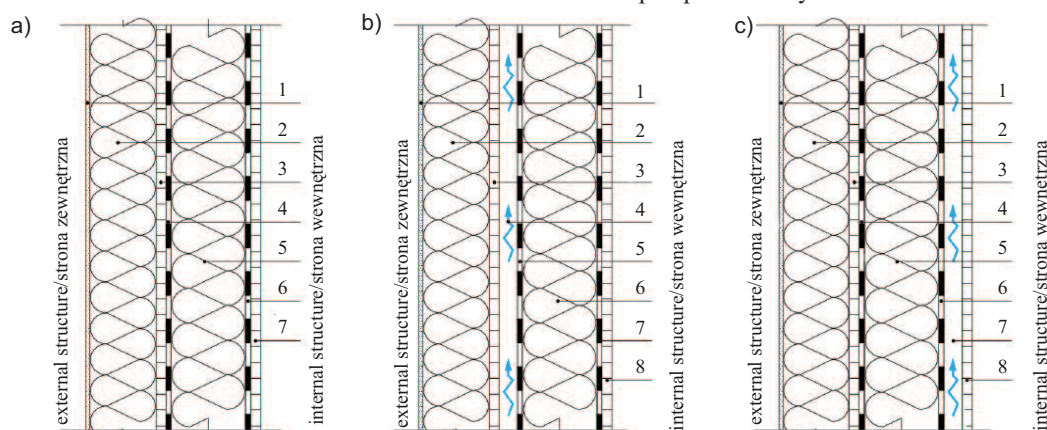
Hygrothermal Simulation of the External Wall

For the calculations, three models of external walls were adopted (Figure 2) that meet the current Polish hygrothermal performance requirements [15]. Depending on the wall variant, different layer configurations were applied. Wall models 2 and 3 included an air cavity, which was absent in wall model 1. Material data regarding the hygrothermal parameters of individual layers were incorporated based on the experimental results obtained earlier.

Największy wzrost współczynnika przewodzenia ciepła odnotowano w przypadku wełny mineralnej, zarówno twardej, jak i miękkiej. Jej przewodność zwiększyła się kilkakrotnie po 24 h nasiąkania. Płyta OSB wykazała również dużą podatność na wilgoć. Najmniej wrażliwa okazała się zaprawa cementowa, której współczynnik λ zwiększył się nieznacznie. Wyniki te potwierdzają, że ochrona materiałów przed wilgocią jest kluczowa w celu utrzymania ich właściwości termoizolacyjnych.

Symulacja ciepło-wilgotnościowa przegrody zewnętrznej

Do obliczeń przyjęto trzy modele ścian zewnętrznych (rysunek 2) spełniające obecne wymagania ciepło-wilgotnościowe obowiązujące w Polsce [15]. W zależności od wariantu ściany zastosowano różne układy warstw. Modele ścian 2, 3 zostały wykonane z pustką powietrzną, której nie miała ściana 1. Dane materiałowe dotyczące parametrów ciepło-wilgotnościowych poszczególnych warstw uwzględniono na podstawie przeprowadzonych badań.



where: 1 – cement plaster – 0.5 cm (Fig. 2 a, b, c); 2 – hard mineral wool 12 cm (Fig. 2 a, b, c); 3 – OSB board 1.2 cm (Fig. 2 a, b, c); 4 – wind insulation 0.0045 cm (Fig. 2 a, c) air gap 5 cm (Fig. 2 b); 5 – soft mineral wool 9 cm (Fig. 2 a, c) wind insulation 0.0045 cm (Fig. 2 b); 6 – vapour barrier 0.0002 cm (Fig. 2 a, c) / soft mineral wool 9 cm (Fig. 2 b); 7 – OSB board 1.2 cm (Fig. 2 a) vapour barrier – 0.0002 cm (Fig. 2 b) air gap – 5 cm (Fig. 2 c); 8 – OSB board 1.2 cm (Fig. 2 b, c) / gdzie: 1 – tynk cementowy 0,5 cm (rysunek 2a, b, c); 2 – twarda wełna mineralna 12 cm (rysunek 2a, b, c); 3 – płyta OSB 1,2 cm (rysunek 2a, b, c); 4 – wiatroizolacja 0,0045 cm (rysunek 2a, c) pustka powietrzna 5 cm (rysunek 2b); 5 – miękka wełna mineralna 9 cm (rysunek 2a, c) wiatroizolacja 0,0045 cm (rysunek 2b); 6 – paroizolacja 0,0002 cm (rysunek 2a, c) miękka wełna mineralna 9 cm (rysunek 2b); 7 – płyta OSB 1,2 cm (rysunek 2a) paroizolacja 0,0002 cm (rysunek 2b) pustka powietrzna 5 cm (rysunek 2c); 8 – płyta OSB 1,2 cm (rysunek 2b,c)

Fig. 2. Structures of external partitions subjected to thermal and moisture analysis: a) wall 1; b) wall 2; c) wall 3

Rys. 2. Konstrukcje przegród zewnętrznych poddanych analizie ciepło-wilgotnościowej: a) ściana 1; b) ściana 2; c) ściana 3

The adopted wall models were subjected to three computational cases corresponding to analysis periods of 1, 2, and 12 months, respectively. Case 1 served as the reference point for the other analyzed variants. It included material data corresponding to a moisture content level of 80%. The simulation assumed boundary conditions corresponding to a temperature of 20°C and the third class of indoor humidity, in accordance with PN-EN ISO 13788 [16]. Cases 2 and 3 aimed to assess the drying ability of the wall over the entire analysis period. In these variants, the initial moisture state of the materials corresponded to conditions exceeding the sorption saturation point. This condition simulated the presence of residual post-flood water that had penetrated the wall structure as a result of one hour of immersion. In Case 2, natural drying was assumed at a temperature of 20°C and the third class of indoor humidity,

Przyjęte modele ścian zostały poddane trzem przypadkom obliczeniowym, odpowiadającym okresom analizy wynoszącym odpowiednio 1, 2 oraz 12 miesięcy. Przypadek 1 stanowił punkt odniesienia do pozostałych rozpatrywanych wariantów. Uwzględniono w nim dane materiałowe odpowiadające wilgotności na poziomie 80%. Zakładano symulację, której warunki brzegowe odpowiadały temperaturze 20°C oraz trzeciej klasie wilgotności wewnętrznej, zgodnie z PN-EN ISO 13788 [16]. Przypadki 2 i 3 miały na celu ocenę zdolności przegrody do osuszania się w całym okresie analizy. W tych wariantach uwzględniono początkowy stan zawilgocenia materiałów, odpowiadający warunkom przekraczającym punkt nasycenia sorpcyjnego. Taki stan miał symulować obecność resztkowej wody popowodziowej, która przedostała się do struktury przegrody na skutek jej zanurzenia w wodzie przez godzinę. W przypadku 2 założono naturalne osuszanie, przy temperaturze 20°C i trzeciej klasie

as specified in PN-EN ISO 13788 [16]. In Case 3, constant air humidity at 10% and temperature at 20 °C were assumed.

The simulations were carried out using WUFI Pro 5 software, which applies a model described by nonlinear partial differential equations representing unsteady coupled heat and moisture transport in building materials [17]. The moisture content of the individual layers was determined by accounting for: diffusive water vapor flow, sorption moisture accumulation, and capillary transport. External boundary conditions affecting the hygrothermal state of the partitions included air temperature and relative humidity, solar radiation, and rain wetting, based on climatic data contained in the program's database for the analyzed location. The influence of the internal climate was taken into account by selecting standard parameter values or by defining air temperature and relative humidity directly, with the option of specifying either constant or sinusoidal variations.

Calculation Results

The analysis conducted for three structural variants of external walls – differentiated by the presence of an air cavity and the arrangement of layers – made it possible to evaluate their moisture behavior under three distinct computational scenarios. Cases 2 and 3 were of particular importance in assessing operational durability, as their initial condition was assumed to be extreme, corresponding to one hour of exposure of the partition to direct contact with water, exceeding the sorption saturation limit of the materials. This assumption was intended to simulate a realistic emergency scenario such as flooding or intense rainfall.

In Case 1 (Table 7), representing standard operating conditions (20°C and relative humidity corresponding to the third class according to PN-EN ISO 13788 [16]), an increase

wilgotności wewnętrznej, zgodnie z normą PN-EN ISO 13788 [16]. Natomiast przypadek 3 uwzględniał stałą wilgotność na poziomie 10% oraz temperaturę 20°C.

Przeprowadzone symulacje wykonano przy użyciu oprogramowania WUFI Pro5, które wykorzystuje model opisany nieliniowymi cząstkowymi równaniami różniczkowymi, dotyczącymi niestacjonarnego sprzężonego transportu ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych [17]. Zawilgocenie poszczególnych warstw przegród określa się, uwzględniając: dyfuzyjny przepływ pary wodnej; akumulację sorpcyjną wilgoci oraz ruch kapilarny. Warunki zewnętrzne wpływające na stan cieplno-wilgotnościowy przegród to temperatura i wilgotność względna powietrza; wpływ promieniowania słonecznego i zawilgocenie deszczem, przy czym uwzględnia się dane klimatyczne zawarte w bazie danych programu dotyczące analizowanej lokalizacji. Wpływ klimatu wewnętrznego uwzględnia się przez wybór parametrów normowych bądź zadeklarowaną temperaturę i wilgotność względną powietrza, z możliwością wprowadzenia ich w stałej i sinusoidalnej zmienności.

Wyniki obliczeń

Przeprowadzona analiza dotycząca trzech wariantów konstrukcyjnych ścian zewnętrznych (zróżnicowanych pod względem obecności pustki powietrznej i układu warstw) umożliwiła ocenę ich zachowania wilgotnościowego w trzech różnych przypadkach obliczeniowych. Szczególne znaczenie w przypadku oceny trwałości eksploatacyjnej miały przypadki 2 i 3, w których stan początkowy przyjęto jako skrajny – odpowiadający godzinnej ekspozycji przegrody na kontakt z wodą, co przekraczało granicę nasycenia sorpcyjnego materiałów. Takie założenie miało na celu odwzorowanie rzeczywistego scenariusza awaryjnego, jakim jest zalanie budynku np. podczas powodzi lub intensywnych opadów.

W przypadku 1 (tabela 7), czyli przy standardowych warunkach eksploatacyjnych (20°C, wilgotność względna odpowiada-

Table 7. Moisture content of individual materials – case 1

Tabela 7. Zawartość wilgoci w poszczególnych materiałach – przypadek 1

Material/Moisture content at the beginning and end of the simulation [kg/m³]/Material/Zawartość wilgoci na początku i końcu symulacji [kg/m³]		Wall 1/Ściana 1			Wall 2/Ściana 2			Wall 3/Ściana 3			
		calculation period [months]/okres obliczeniowy [miesiące]									
		1	2	12	1	2	12	1	2	12	
Cement plaster/Tynk cementowy	beginning/początek		11,3			11,3			11,3		
	end/koniec	14,76	17,9	17,89	14,43	17,87	32,79	14,52	17,89	32,73	
	[%]	30,62	58,41	58,32	27,70	58,14	190,18	28,50	58,32	189,65	
Hard mineral wool/Włna mineralna twarda	beginning/początek		1,03			1,03			1,03		
	end/koniec	0,78	0,78	0,78	0,79	0,79	1,05	0,8	0,79	1,05	
	[%]	-24,27	-24,27	-24,27	-23,30	-23,30	1,94	-22,33	-23,30	1,94	
OSB exterior/OSB zewnętrzne	beginning/początek		111			111			111		
	end/koniec	88,16	80,24	79,88	89,37	81,85	102,35	86,63	76,33	102,03	
	[%]	-20,58	-27,71	-28,04	-19,49	-26,26	-7,79	-21,95	-31,23	-8,08	
Soft mineral wool/Włna mineralna miękka	beginning/początek		1,01			1,01			1,01		
	end/koniec	0,63	0,56	0,56	0,62	0,56	0,82	0,68	0,58	0,83	
	[%]	-37,62	-44,55	-44,55	-38,61	-44,55	-18,81	-32,67	-42,57	-17,82	
OSB interior/OSB wewnętrzne	beginning/początek		111			111			111		
	end/koniec	88,31	86,84	86,81	88,19	86,74	96,4	88,39	86,99	96,45	
	[%]	-20,44	-21,77	-21,79	-20,55	-21,86	-13,15	-20,37	-21,63	-13,11	
Total [kg/m³]	beginning/początek		235,34			235,34			235,34		
	end/koniec	192,6	186,3	185,9	193,4	187,8	233,41	191	182,6	233,09	
	[%]	-18,14	-20,83	-21,00	-17,82	-20,20	-0,82	-18,83	-22,42	-0,96	

in moisture content was observed only in the plaster layer. In the remaining materials, a decrease in moisture was recorded.

In Case 2 (Table 8), despite maintaining indoor conditions consistent with the standard (20°C and third humidity class) – i.e., simulating natural, non-accelerated drying – the results clearly show that even after 12 months, the moisture content in building materials did not return to equilibrium levels. Although a noticeable reduction in moisture content occurred – in some cases exceeding 70% – the final values in layers such as OSB, mineral wool, and cement plaster remained significantly higher than in the reference state. This indicates that even short-term (one-hour) immersion of a wall in water causes deep moisture penetration, the complete removal of which under natural drying conditions is very slow and uncertain. Furthermore, prolonged elevated moisture content in materials can lead to significant deterioration of their operational properties, such as thermal insulation capacity, biological resistance (development of fungi and mold), and structural integrity. This applies particularly to hygroscopic materials such as mineral wool and OSB boards.

In Case 3 (Table 9), although the assumed conditions strongly favored drying (low relative humidity of 10%), a full return to equilibrium moisture content was still not achieved. The greatest decreases in moisture content were recorded, exceeding 80% in some layers; however, the final values still remained clearly higher than those observed in Case 1. In practice, this means that even under highly favorable climatic conditions, complete self-drying of partitions within a one-year period cannot be expected. In walls containing an air cavity (Variants 2 and 3), local zones may occur where moisture persists for extended periods, and limited air exchange further reduces the rate of diffusion. For this reason, it is recommended

jąca trzeciej klasie zgodnie z PN-EN ISO 13788 [16]), odnotowano zwiększenie zmiany zawartości wilgoci jedynie w warstwie tynku. W pozostałych materiałach stwierdzono spadek wilgoci.

W analizie przypadku 2 (tabela 8), mimo że warunki wewnętrzne pozostały zgodne z normą (20°C i trzecia klasa wilgotności), a więc symulowano naturalne, nieprzyspieszone osuszanie, wyniki wyraźnie pokazują, że nawet po upływie 12 miesięcy zawartość wilgoci w materiałach budowlanych nie wróciła do poziomów równowagowych. Pomimo zauważalnego zmniejszenia zawartości wilgoci – sięgającego w niektórych przypadkach ponad 70% – końcowe wartości w warstwach takich jak OSB, wełna mineralna czy tynk cementowy nadal utrzymywały się na poziomie znacznie wyższym niż w stanie referencyjnym. Oznacza to, że nawet krótkotrwale (godzinne) zanurzenie ściany w wodzie powoduje głęboką penetrację wilgoci, której całkowite usunięcie w warunkach naturalnych jest bardzo powolne i niepewne. Co więcej, utrzymująca się zwiększona wilgotność materiałów przez długi czas może prowadzić do istotnego pogorszenia ich właściwości eksploatacyjnych, takich jak izolacyjność termiczna, odporność biologiczna (rozwój grzybów i pleśni) czy spójność strukturalna. Dotyczy to szczególnie materiałów higroskopijnych, takich jak wełna mineralna i płyty OSB.

Przypadek 3 (tabela 9), pomimo tego, że zakładał warunki silnie sprzyjające osuszaniu (małą wilgotność względną na poziomie 10%), również nie przyniósł pełnego powrotu do stanu równowagi. Odnotowano największe spadki zawartości wilgoci, sięgające ponad 80% w niektórych warstwach, ale końcowe jej wartości nadal były wyraźnie większe niż w przypadku 1. W praktyce oznacza to, że nawet w bardzo korzystnych warunkach klimatycznych nie można liczyć na całkowite samoczynne osuszenie przegród w skali roku. Szczególnie w ścianach zawierających pustkę powietrzną (warianty 2 i 3) mogą pojawiać się lokalne strefy, w których wilgoć utrzymuje się długo, a niewielka wymiana powietrza dodatkowo ogranicza tempo dyfu-

Table 8. Moisture content of individual materials – case 2

Tabela 8. Zawartość wilgoci w poszczególnych materiałach – przypadek 2

Material/Moisture content at the beginning and end of the simulation [kg/m³]/Material/Zawartość wilgoci na początku i końcu symulacji [kg/m³]		Wall 1/Ściana 1			Wall 2/Ściana 2			Wall 3/Ściana 3		
		calculation period [months]/okres obliczeniowy [miesiące]								
		1	2	12	1	2	12	1	2	12
Cement plaster/Tynk cementowy	beginning/początek	71			71			71		
	end/koniec	103	98,84	34	104	102,4	35,23	103,5	99,55	36,43
	[%]	45,04	39,21	-52,11	46,54	44,25	-50,38	45,82	40,21	-48,69
Hard mineral wool/Wełna mineralna twarda	beginning/początek	433			433			433		
	end/koniec	250,1	149,6	2,7	269,7	198,2	1,35	252,5	154,5	3,48
	[%]	-42,24	-65,45	-99,38	-37,72	-54,24	-99,69	-41,69	-64,31	-99,20
OSB exterior/OSB zewnętrzne	beginning/początek	603			603			603		
	end/koniec	537,8	448,2	241,3	668,9	592	183,74	538,8	450	249,23
	[%]	-10,82	-25,67	-59,99	10,93	-1,82	-69,53	-10,65	-25,37	-58,67
Soft mineral wool/Wełna mineralna miękka	beginning/początek	476			476			476		
	end/koniec	461,1	441,4	227,5	442,3	404,5	177,46	461,9	444	236,54
	[%]	-3,13	-7,27	-52,21	-7,07	-15,03	-62,72	-2,95	-6,72	-50,31
OSB interior/OSB wewnętrzne	beginning/początek	603			603			603		
	end/koniec	161,9	99,92	100,6	163,2	99,71	100,06	107,3	107,8	100,22
	[%]	-73,16	-83,43	-83,32	-72,94	-83,46	-83,41	-82,21	-82,13	-83,38
Total [kg/m³]	beginning/początek	2186			2186			2186		
	end/koniec	1514	1238	606,1	1648	1397	497,84	1464	1256	625,9
	[%]	-30,75	-43,37	-72,28	-24,61	-36,10	-77,23	-33,03	-42,55	-71,37

Table 9. Moisture content of individual materials – case 3

Tabela 9. Zawartość wilgoci w poszczególnych materiałach – przypadek 3

Material/Moisture content at the beginning and end of the simulation [kg/m³]/Material/Zawartość wilgoci na początku i końcu symulacji [kg/m³]		Wall 1/Ściana 1			Wall 2/Ściana 2			Wall 3/Ściana 3		
		calculation period [months]/okres obliczeniowy [miesiące]								
		1	2	12	1	2	12	1	2	12
Cement plaster/Tynk cementowy	beginning/początek	71			71			71		
	end/koniec	103,1	98,91	36,36	104,1	102,6	35,21	103,6	99,67	36,35
	[%]	45,14	39,31	-48,79	46,59	44,45	-50,41	45,94	40,38	-48,80
Hard mineral wool/Wetna mineralna twarda	beginning/początek	433			433			433		
	end/koniec	250,7	150,3	2,55	268,8	200	1,35	253,2	155,7	3,3
	[%]	-42,10	-65,30	-99,41	-37,91	-53,81	-99,69	-41,53	-64,05	-99,24
OSB exterior/OSB zewnętrzne	beginning/początek	603			603			603		
	end/koniec	538,3	448,4	235,9	655,7	585,6	182,17	539,4	450,8	244,52
	[%]	-10,74	-25,64	-60,89	8,73	-2,88	-69,79	-10,55	-25,24	-59,45
Soft mineral wool/Wetna mineralna miękka	beginning/początek	476			476			476		
	end/koniec	461,2	440,2	217	443,2	404,4	169,79	462,2	444,5	226,75
	[%]	-3,11	-7,52	-54,41	-6,89	-15,04	-64,33	-2,91	-6,61	-52,36
OSB interior/OSB wewnętrzne	beginning/początek	603			603			603		
	end/koniec	67,01	27,66	23,62	67,12	26,41	22	70,9	72,1	23,22
	[%]	-88,89	-95,41	-96,08	-88,87	-95,62	-96,35	-88,24	-88,04	-96,15
Total [kg/m³]	beginning/początek	2186			2186			2186		
	end/koniec	1420	1165	515,4	1539	1319	410,52	1429	1223	534,14
	[%]	-35,03	-46,69	-76,42	-29,60	-39,66	-81,22	-34,62	-44,06	-75,57

that walls with air cavities be equipped with ventilation channels to enable air circulation and accelerate the drying process.

Table 10 summarizes the total moisture content in the analyzed wall partitions for individual cases and calculation periods. The data confirm previous observations: in Case 1, representing the reference state, the moisture content in the partitions remained stable. This aligns with the assumed hygrothermal equilibrium scenario, in which the partition does not experience excessive wetting or drying. The situation is different in Cases 2 and 3, where the initial condition included one hour of partial flooding – extreme but realistic circumstances in the context of a building inundation. The initial total moisture content in each wall model amounted to 2186 kg/m³, exceeding the sorption capacity of most materials used and indicating full saturation of the partition. After 12 months of simulation, even in Case 3, which assumed optimal drying conditions (10% relative humidity), the total moisture content did not decrease to

zji. Z tego powodu zaleca się, aby ściany z pustkami powietrznymi były wyposażone w kanały wentylacyjne, które umożliwiają cyrkulację powietrza i przyspieszają proces osuszania.

Tabela 10 podsumowuje całkowitą zawartość wilgoci w analizowanych przegrodach ściennych w poszczególnych przypadkach oraz okresach obliczeniowych. Dane potwierdzają wcześniejsze obserwacje: w przypadku 1, który reprezentuje stan referencyjny, zawartość wilgoci w przegrodach pozostaje stabilna. Jest to zgodne z przyjętym scenariuszem równowagi higrotermicznej, w którym przegroda nie doświadcza ani nadmiernego zawilgocenia, ani przesuszenia. Odmienne sytuacja wygląda w przypadkach 2 i 3, gdzie stan początkowy uwzględniał godzinne podtopienie – warunki ekstremalne, realistyczne w kontekście zalania budynku. Początkowa wilgotność całkowita w każdym z modeli ścian wynosiła 2186 kg/m³, co przekracza możliwości sorpcyjne większości zastosowanych materiałów i wskazuje na pełne nasycenie przegrody. Po 12 miesiącach symulacji, nawet w przypadku 3 – zakładającym optymalne warunki osuszania (wilgotność względna 10%) – wilgoć całkowita

Table 10. Total moisture content in the analyzed wall models

Tabela 10. Całkowita zawartość wilgoci w analizowanych modelach ścian

Material/Moisture content at the beginning and end of the simulation [kg/m³]/Material/Zawartość wilgoci na początku i końcu symulacji [kg/m³]		Wall 1/Ściana 1			Wall 2/Ściana 2			Wall 3/Ściana 3		
		calculation period [months]/okres obliczeniowy [miesiące]								
		1	2	12	1	2	12	1	2	12
Case 1/Przypadek 1	beginning/początek	235,34			235,34			235,34		
	end/koniec	192,6	186,3	185,9	193,4	187,8	233,4	191	182,6	233,1
	[%]	-18,14	-20,83	-21,00	-17,82	-20,20	-0,82	-18,83	-22,42	-0,96
Case 2/Przypadek 2	beginning/początek	2186			2186			2186		
	end/koniec	1514	1238	606,1	1648	1397	497,8	1464	1256	625,9
	[%]	-30,75	-43,37	-72,28	-24,61	-36,10	-77,23	-33,03	-42,55	-71,37
Case 3/Przypadek 3	beginning/początek	2186			2186			2186		
	end/koniec	1420	1166	515,4	1539	1319	410,5	1429	1223	534,1
	[%]	-35,03	-46,69	-76,42	-29,60	-39,66	-81,22	-34,62	-44,06	-75,57

a level comparable with the reference case. Final values ranged from 410 to over 530 kg/m³, still about twice as high as in Case 1. In Case 2, representing natural drying, the results were even higher – from approximately 500 to over 620 kg/m³, depending on the wall variant. These findings indicate that under both assumed scenarios – natural and forced drying – the partitions did not return to equilibrium moisture conditions. Even one year after the event, the residual moisture level remained high enough to affect the operational performance of the partitions, particularly in layers susceptible to biological degradation and reduction of thermal resistance.

Figure 3 illustrates the change in total moisture content in the analyzed wall partitions for all wall variants (1, 2, and 3) under three cases: the reference condition (Case 1) and the two post-flood drying scenarios (Cases 2 and 3).

ta nie zmniejszyła się do poziomu porównywalnego z przypadkiem referencyjnym. Wartości końcowe wynosiły od 410 do ponad 530 kg/m³, czyli nadal były ok. dwukrotnie większe niż w przypadku 1. W przypadku 2, czyli naturalnego osuszania, wyniki były jeszcze większe – od ok. 500 do ponad 620 kg/m³, w zależności od wariantu ściany. Z danych tych wynika, że w przyjętych scenariuszach – zarówno naturalnym, jak i wymuszonym – nie dochodzi do pełnego powrotu przegrody do stanu wilgotności równowagowej. Nawet po roku od zdarzenia wilgoć pozostaje na poziomie, który może wpływać na właściwości eksploatacyjne przegród, szczególnie w warstwach podatnych na degradację biologiczną oraz zmniejszenie oporu cieplnego.

Na rysunku 3 przedstawiono zmianę całkowitej zawartości wilgoci w przegrodach we wszystkich analizowanych wariantach ścian (1, 2 i 3) w trzech przypadkach: referencyjnym (przypadek 1) oraz dwóch założeniach osuszania po podtopieniu (przypadki 2 i 3).

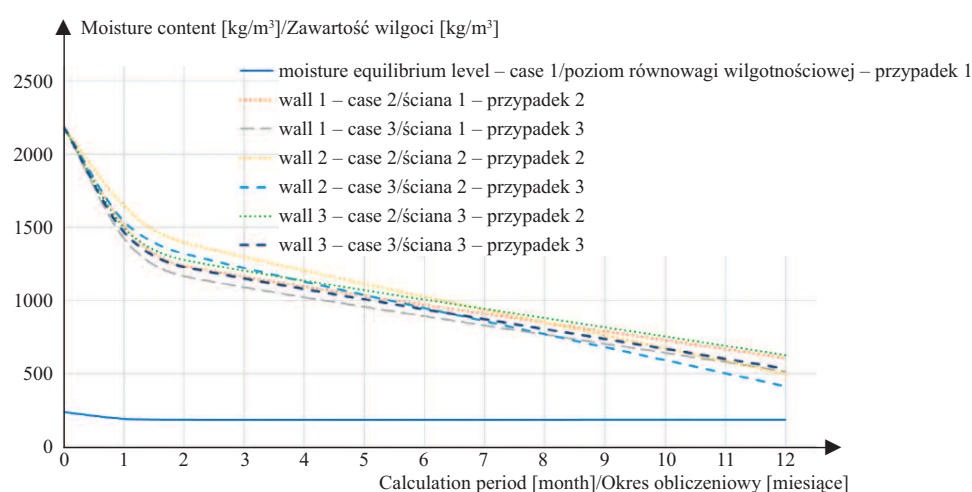


Fig. 3. The quantitative change of the total moisture content in the partitions for the analyzed cases

Rys. 3. Ilościowa zmiana całkowitej zawartości wilgoci w przegrodach w analizowanych przypadkach

Summary and Conclusions

Information about the materials and the type of structure of a flooded partition is crucial for determining the drying time under various renovation scenarios. Laboratory tests were carried out to determine the sorption, water absorption, and thermal conductivity of individual materials as a function of moisture content. The absorption tests showed that the tested materials absorb a large amount of water within a relatively short period.

The data obtained enabled an analysis of the potential for removing residual moisture after flooding or inundation. The drying performance was tested for three wall models. The analysis indicates that even short-term wetting of partitions leads to a significant disturbance of the moisture balance throughout the structure. The numerical calculations assumed idealized drying conditions, allowing for a general assessment of the observed moisture changes. Although the simulations demonstrated a partial ability of the walls to self-dry, full recovery within 12 months cannot be achieved. Consequently, it should be assumed that operating such partitions under elevated moisture conditions may result in deterioration of

Podsumowanie i wnioski

Informacje o materiałach oraz rodzaju konstrukcji zalanej przegrody mają kluczowe znaczenie do ustalenia czasu osuszania w różnych scenariuszach prac remontowych. Przeprowadzono badania laboratoryjne sorpcji, nasiąkliwości oraz przewodzenia ciepła w zależności od wilgotności w przypadku poszczególnych materiałów. Badania nasiąkliwości wykazały, że testowane materiały chłoną dużą ilość wody w dość krótkim czasie.

Uzyskane informacje umożliwiły przeprowadzenie analizy możliwości pozbycia się wilgoci pozostałej po powodzi lub zalaniu. Wydajność osuszania testowano w przypadku trzech modeli ścian. Z przeprowadzonej analizy wynika, że nawet krótkotrwałe zawilgocenie przegród prowadzi do poważnego zaburzenia równowagi wilgotnościowej całej konstrukcji. Wykonane obliczenia numeryczne zakładały wyidealizowane warunki osuszania. Pozwala to na ogólną ocenę zachodzących zmian wilgotności. Mimo że symulacje wykazują częściową zdolność ścian do samoistnego osuszania, to jednak nie można mówić o ich pełnej regeneracji w ciągu 12 miesięcy. W konsekwencji należy zakładać, że eksploatacja takich przegród w stanie

their insulation parameters, reduced durability, and an increased risk of biological and chemical degradation.

These findings should be taken into account both in the design process of structures vulnerable to flooding and when planning renovation strategies following emergency events. In the long term, despite apparent stabilization of moisture content, such walls do not regain their original performance properties, leading to a decline in indoor environmental quality and overall structural durability.

Prompt implementation of remedial actions to remove excessive moisture has a significant impact on the continued usability of the building. This is particularly relevant for frame constructions, where – as the analysis showed – the time required to restore hygrothermal equilibrium can be so long that it causes an extended period of building downtime. In such cases, replacement of the moisture-damaged materials with new ones should be considered.

Received: 07.07.2025

Revised: 18.08.2025

Published: 23.10.2025

zwiększonej wilgotności może skutkować pogorszeniem ich parametrów izolacyjnych, skróceniem trwałości oraz zwiększonym ryzykiem degradacji biologicznej i chemicznej. Wyniki te powinny być uwzględnione w procesie projektowania obiektów wrażliwych na zalanie, jak również przy planowaniu strategii renowacyjnych po wystąpieniu zdarzeń awaryjnych. W dłuższej perspektywie, pomimo pozornej stabilizacji wilgotności, ściany takie nie odzyskują pierwotnych właściwości użytkowych, co powoduje pogorszenie jakości środowiska wewnętrznego i trwałości całej konstrukcji.

Szybkie podjęcie działań naprawczych w przypadku usuwania nadmiernej wilgoci ma istotny wpływ na dalszą eksploatację obiektu. Odnosi się to szczególnie do przegród wykonanych w konstrukcji szkieletowej, w przypadku których – jak wykazała analiza – czas przywrócenia stanu równowagi wilgotnościowej może być na tyle długi, że powoduje zbyt długi okres wyłączenia budynku z użytkowania. W takich przypadkach należy rozważyć wymianę zawilgoconych materiałów na nowe.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 18.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Major M, Kosiń M. Lekkie konstrukcje stalowe w budownictwie mieszkaniowym, Materiały i technologie ekologiczne w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2016.
- [2] Major M, Kosiń M. Effect of Steel Framing for Securing Drywall Panels on Thermal and Humidity Parameters of the Outer Walls, Civil and Environmental Engineering, 2017.
- [3] Asdrubali F, Ferracuti B, Lombardi L, Guattari C, Evangelisti L, Grazieschi G. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications, Building and Environment, Elsevier, 2017.
- [4] Dubina D. Eurocode 3: Design of Steel Structures PART 1-3 – Design of Cold-formed Steel, Structuresliteratura, Belgium 2014.
- [5] Zhang X, Zillig W, Künzle HM, Mitterer Ch, Zhang X. Combined effects of sorption hysteresis and its temperature dependency on wood materials and building enclosures-part II: Hygrothermal modeling, Building and Environment, Elsevier, 2016.
- [6] Kosiń M, Major M. Modelowanie rozkładu temperatur w przegrodach zewnętrznych wykonanych z użyciem lekkich konstrukcji szkieletowych, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2016.
- [7] Major M, Major I, Kalinowski J, Kosiń M. Model Tests of Bending and Torsional Deformations of Thin-Walled Profiles Stiffened with Elements Made in 3D Printing Technology, Case Studies in Construction Materials, 2020.
- [8] Major M, Kosiń M. Analiza numeryczna osuszania przegrody zewnętrznej na podstawie danych eksperymentalnych, Materiały Budowlane, 2023.

- [9] PN-EN ISO 12571:2013-12P, Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie właściwości sorpcyjnych.
- [10] PN-EN ISO 10456:2009P Materiały i wyroby budowlane – Właściwości ciepłno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
- [11] PN-EN 12087:2000P, Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie – Określanie nasiąkliwości wodą przy długotrwałym zanurzeniu.
- [12] PN-EN ISO 10456:2009P Materiały i wyroby budowlane – Właściwości ciepłno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
- [13] PN-ISO 8302 Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną.
- [14] Siwińska A, Garbalińska H. Niestacjonarne pomiary współczynnika przewodzenia ciepła porowatych materiałów budowlanych, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C., 2011.
- [15] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2024).
- [16] PN-EN ISO 13788: 013-05 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgoci powierzchni i kondensacji międzywarstwowa. Metody obliczania.
- [17] Künzle H, Radon J, Holm A, Schmidt T, Zirkelbach D. WUFI-pro – handbuch. IBP Holzkirchen Valley, 2003.