

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYCH MATERIAŁÓW HIGROSKOPIJNYCH Z SUROWCÓW POCHODZENIA ROŚLINNEGO

Dobrosława KACZOREK*, Barbara PIETRUSZKA**

* Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Fizyki Ciepłej, Instalacji Sanitarnych i Środowiska
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, e-mail: d.kaczorek@itb.pl

** Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Fizyki Ciepłej, Instalacji Sanitarnych i Środowiska
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, e-mail: b.pietruszka@itb.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania podstawowych właściwości cieplno-wilgotnościowych naturalnych materiałów higroskopijnych. Uzyskane wyniki posłużyły do dalszych badań mających na celu określenie wpływu zróżnicowanych profili obciążeń wilgocią na możliwości absorpcji, magazynowania oraz oddawania wilgoci przez poszczególne materiały. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły, że na zachowanie poszczególnych materiałów pod wpływem danego profilu obciążeń wilgocią mają wpływ jego właściwości sorpcyjne oraz przepuszczalność pary wodnej.

Słowa kluczowe: materiały higroskopijne, magazynowanie wilgoci, absorpcja wilgoci, symulacje cieplno-wilgotnościowe.

1. WPROWADZENIE

Materiały higroskopijne dzięki swoim zdolnościom do absorbowania oraz magazynowania wilgoci mogą wpływać na kształtowanie poziomu wilgoci w pomieszczeniach, co z kolei może przyczynić się do poprawy komfortu cieplnego oraz do ograniczenia zużycia energii na ogrzewanie i chłodzenie poszczególnych pomieszczeń [1, 4, 5, 13]. Wiele przeprowadzonych badań doświadczalnych potwierdza, że profil obciążeń wilgotnościowych wpływa w znaczący sposób na potencjał akumulacji wilgoci przez poszczególne materiały [3, 6, 15]. Różnice we właściwościach, takich jak: chłonność wody oraz przepuszczalność pary wodnej, poszczególnych materiałów powodują, że pod wpływem tych samych obciążeń materiały te pochłaniają i oddają wilgocę w różny sposób.

W niniejszej pracy skupiono się na badaniach pochłaniania i oddawania wilgoci przez naturalne materiały higroskopijne w warunkach zmiennego obciążenia wilgocią.

Wyznaczono podstawowe właściwości fizyczne, takie jak: przewodność cieplna, opór dyfuzyjny, krzywa sorpcji, gęstość, przepuszczalność pary wodnej. Przebadano potencjał magazynowania wilgoci przez cztery różne materiały dla dwóch profili obciążenia wilgocią, wykorzystując w tym celu komercyjny program komputerowy do obliczeń cieplno-wilgotnościowych elementów budowlanych WUFI Pro 5.0 [14].

Przedstawione w niniejszej pracy badania są fragmentem prac prowadzonych w ramach projektu H-House [16], którego jednym z celów jest wyodrębnienie takich materiałów, które dzięki swoim higroskopijnym właściwościom będą zdolne do regulacji jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach, tak aby zapewnić jak najlepszy komfort ich użytkownikom.

2. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYCH MATERIAŁÓW

Badaniu poddano cztery rodzaje naturalnych materiałów:

- sżywna płyta izolacyjna z włókna drzewnego o gr. 40 mm (oznaczenie materiału 3.3.3.)
- płyta izolacyjna z włókna drzewnego o gr. 40 mm (oznaczenie materiału 3.3.10.)
- mata izolacyjna z włókien konopi o gr. 80 mm (oznaczenie materiału 4.7.3.)
- płyta pilśniowa z włókien lnianych i drzewnych o gr. 70 mm (oznaczenie materiału 6.5.3.)

2.1. Przewodność cieplna

Badania współczynnika przewodzenia ciepła wykonano w aparacie płytowym z czujnikami strumienia cieplnego

HFM Fox 314 w warunkach ustalonego przepływu ciepła zgodnie z PN-EN 12664:2002 [10] i PN-EN 12667:2002 [11]. Przed przystąpieniem do badań, próbki kondycjonowano w warunkach temperatury (23 ± 5) °C i wilgotności względnej powietrza (50 ± 5) %, aż do osiągnięcia stałej masy. Pomiary wykonano przy średniej temperaturze próbki 10°C, różnicy temperatury na grubości próbki 20 K i ruchu ciepła z dołu do góry, na 5 próbkach każdego typu materiału, o wymiarach 300 x 300 mm i grubości podanej w tabeli 1.

Końcową wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ podano jako wartość deklarowaną obliczoną zgodnie z PN-EN ISO 10456:2009/AC:2010 [12] (jest to wartość określona dla temperatury 10°C i zawartości wilgotności równej zawartości wilgotności w materiale w stanie równowagi z powietrzem o temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50%, obliczona z pięciu wyników pomiarów). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

2.2. Gęstość

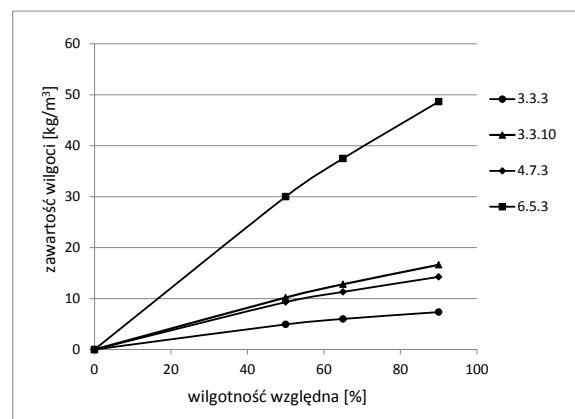
Gęstość poszczególnych materiałów wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 1602:1999 [9], na pięciu próbkach z każdego rodzaju materiału. Przed badaniem próbki były kondycjonowane w ustabilizowanych warunkach temperatury (23 ± 2) °C i wilgotności powietrza (50 ± 5) %. Badanie polegało na ważeniu próbek, określeniu ich objętości oraz obliczeniu gęstości jako ilorazu masy i objętości. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

2.3. Izoterma sorpcji

Badania wykonano w komorze klimatycznej zgodnie z normą PN-EN ISO 12571:2002 [7]. Próbki o wymiarach 100 x 100 mm i grubościach w zakresie 40-80 mm

umieszczano kolejno w ciągu środowisk o stopniowo rosnącej wilgotności względnej 50 %, 65 %, 90 % i stałej temperaturze 23 °C.

Dla każdego badanego materiału sorpcję określono na pięciu próbkach, a następnie obliczono wartości średnie. Zależność pomiędzy wilgotnością sorpcyjną materiału a wilgotnością względną powietrza otaczającego, przedstawiono graficznie w postaci izotermy sorpcji na rys. 1.



Rys. 1. Izotermy sorpcji dla badanych materiałów.

Fig. 1. Sorption isotherms for tested materials.

2.4. Współczynnik oporu dyfuzyjnego i przepuszczalności pary wodnej

Współczynnik przepuszczalności pary wodnej został wyznaczony zgodnie z normą PN-EN ISO 12572:2004 [8]. Badania przeprowadzono dla każdego rodzaju materiału na trzech próbkach o wymiarach $\phi 127 - 128$ mm i grubościach w zakresie 40 - 80 mm.

Tabela 1. Właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów.

Table 1. Hygrothermal properties of materials.

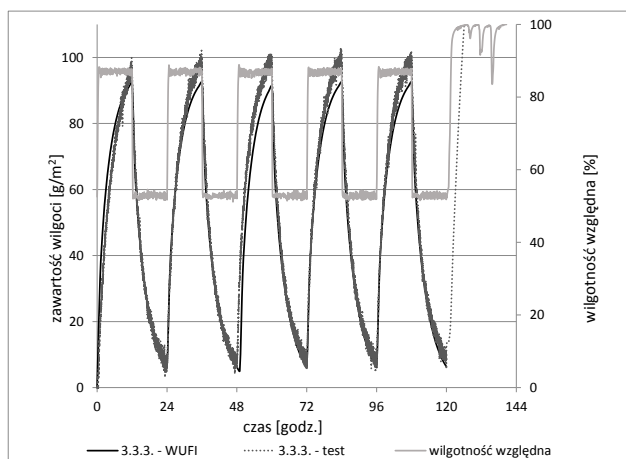
Właściwość	Materiał			
	3.3.3	3.3.10	4.7.3.	6.5.3
grubość [mm]	40	40	80	70
objętość [cm ³]	0,0021	0,0021	0,0041	0,0036
gęstość [kg/m ³]	159	163	96	370
paroprzepuszczalność δ [mg/(m·h·Pa)]	0,178	0,178	0,355	0,065
współczynnik oporu dyfuzyjnego μ [-]	4	4	2	11
współczynnik przewodzenia ciepła [λ]	0,045	0,043	0,049	0,13
współczynnik S_d [m]	0,16	0,16	0,16	0,77

Przed przystąpieniem do badań próbki kondycjonowano w temperaturze (23 ± 5) °C i wilgotności względnej powietrza (50 ± 5) % do czasu ustabilizowania masy w trzech kolejnych ważeniach, tak aby ich ciężar zawierał się w zakresie 5 %. Następnie, próbki umieszczono w specjalnych metalowych naczyniach na dnie których umieszczono środek osuszający (CaCl_2). Ważenia próbek dokonywano w 24 godzinnych odstępach czasowych aż pięć kolejnych określić zmiany masy w jednostce czasu było stałe z tolerancją ± 5 % wartości średniej dla każdej badanej próbki. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości zmiany masy poszczególnych próbek, gęstość strumienia pary wodnej, współczynnik przepuszczalności pary wodnej oraz współczynnik oporu dyfuzyjnego μ . Uzyskane wyniki dla poszczególnych materiałów przedstawiono w tabelicy 1.

3. BADANIA SYMULACYJNE

3.1. Badania weryfikacyjne

Model symulacyjny został zweryfikowany poprzez porównanie zawartości wilgoci w próbce materiału o numerze 3.3.3. otrzymanej na podstawie badania absorpcji w warunkach laboratoryjnych oraz na podstawie obliczeń numerycznych z programu WUFI Pro 5.0 (rys. 2). Próbkę poddano kondycjonowaniu w temperaturze 23 °C oraz wilgotności względnej powietrza równej 50 %. Po osiągnięciu przez próbkę stanu równowagi, skokowo co 12 godzin, zwiększano wilgotność powietrza do 80 % i ponownie obniżano do 50 %. Badanie prowadzono przez okres 120 godz. (10 cykli). W badaniu wzorowano się na metodzie badania opisanej w niemieckiej normie DIN 18947 [2] dla tynków glinianych.



Rys. 2. Sorpcja materiału 3.3.3. dla profilu obciążeń wilgocią 12 godz. 50% / 12 godz. 80% na podstawie badań i symulacji w programie WUFI.

Fig. 2. Sorption test for moisture load profile 12 h 50% / 12 h 80% based on research and simulation in WUFI for the 3.3.3. material.

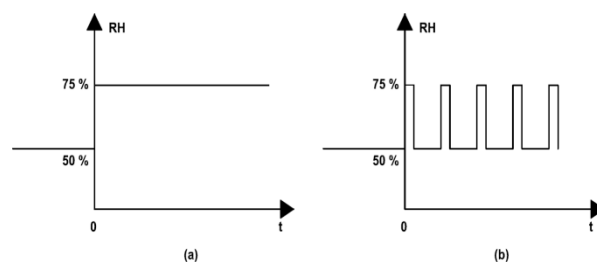
Na podstawie przeprowadzonych badań widać, że wartości maksymalnej wilgoci zaabsorbowanej przez materiał otrzymane z programu są niższe o ok. 10 % od wartości otrzymanych z pomiaru. Pozostałe wartości nie wykazują różnic większych niż 1 %. Różnice te mogą wynikać z faktu, że do programu wprowadzono krzywe sorpcji wyznaczone w badaniach laboratoryjnych dla innych próbek tego samego materiału aniżeli próbki dla których wykonywano pomiary sorpcji w cyklach 12 godz.

3.2. Zakres przeprowadzonych symulacji

Badania symulacyjne przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie materiały zostały poddane skokowej zmianie obciążenia wilgocią do wartości równej 75 % przez okres ok. 1300 godz. Analizie poddano czas dojścia do stanu ustalonego oraz końcową zaabsorbowaną przez poszczególne materiały zawartość wilgoci.

W drugim etapie materiały poddano dwóm różnym dziennym profilom obciążeń 9 godz. 75 % / 15 godz. 50 % oraz 2 godz. 75 % / 22 godz. 50 %. W tym przypadku analizie poddano ilość zaabsorbowanej wilgoci przez poszczególne materiały oraz ilość wilgoci pozostałej w materiale przy zmiennym profilu obciążeń wilgocią w stanie quasi-ustalonym.

Za stan początkowy przyjęto warunki równowagi dla 50 % wilgotności względnej i 23 °C. Profile obciążeń wilgocią dla dwóch etapów badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 3.



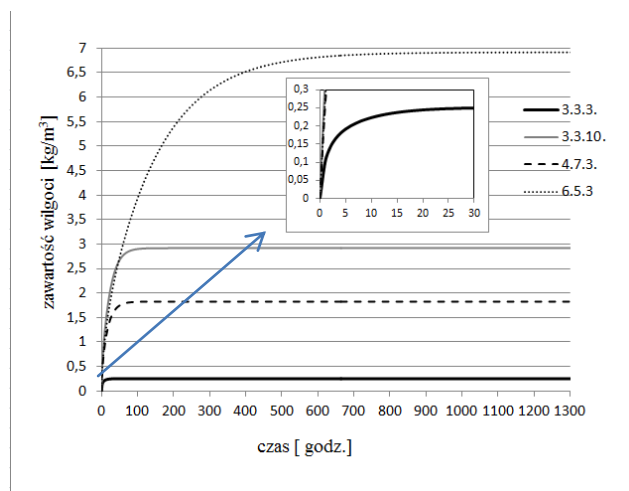
Rys. 3. Profile obciążenia wilgocią dla dwóch etapów symulacji a) skokowe obciążenie wilgocią b) dzienne obciążenie wilgocią.

Fig. 3. Moisture load profiles for two stage of simulation a) step moisture load b) daily moisture load.

3.3. Wyniki badań symulacyjnych

Na podstawie wyników uzyskanych z pierwszego etapu badań symulacyjnych, pokazanych na rys. 4 można stwierdzić, że końcowa wartość zaabsorbowanej wilgoci w stanie ustalonym dla 75 % obciążenia wilgocią przez materiał 6.5.3. jest ok. 27 razy większa od wartości dla materiału 3.3.3. Materiał 6.5.3. absorbuje ok. $6,92 \text{ kg/m}^3$ wilgoci w przypadku gdy materiał 3.3.3. tylko $0,25 \text{ kg/m}^3$. Materiał 6.5.3. charakteryzuje się również najdłuższym

czasem dojścia do stanu ustalonego ok. 1300 godz., podczas gdy materiał 3.3.3. osiąga ten stan po 27,5 godz. Za stan ustalony uznano stan, kiedy dzienny przyrost wagi materiału był mniejszy niż 0,1 % całkowitego przyrostu wagi w pięciu kolejnych następujących po sobie cyklach. Czas dojścia do stanu ustalonego oraz ilość zaabsorbowanej wilgoci przez poszczególne materiały przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 4. Czasowe przebiegi dochodzenia do stanu ustalonego po skokowej zmianie obciążenia wilgotnością do 75%.

Fig. 4. Time courses of reach a steady state after a step change in load humidity to 75%.

Tabela 2. Porównanie wartości końcowych dla pierwszego etapu symulacji.

Table 2. Comparison the final value for the first-stage simulations.

Materiał	Czas dojścia do stanu ustalonego [godz.]	Ilość zaabsorbowanej wilgoci [kg/m ³]
3.3.3.	27,5	0,25
3.3.10.	92	2,92
4.7.3.	125	1,83
6.5.3.	1300	6,92

W drugim etapie symulacji poszczególne materiały zostały poddane zmiennym, dziennym profilom obciążenia wilgotnością 9 godz. 75 % / 15 godz. 50 % oraz 2 godz. 75 % / 22 godz. 50 %. Za stabilny cykl magazynowania wilgoci uznano moment, kiedy ilość pozostałej wilgoci w materiale w ciągu

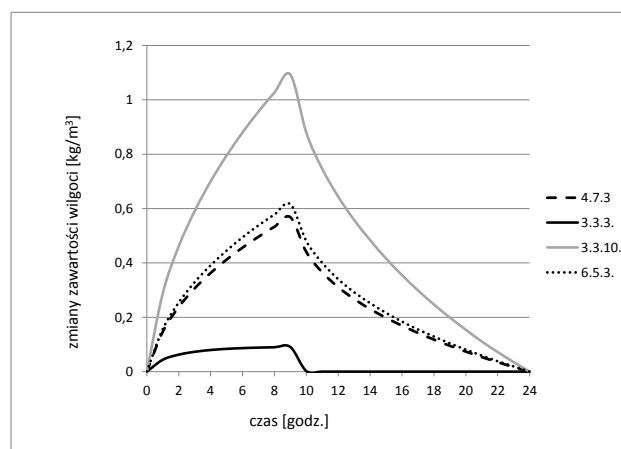
jednodniowego cyklu obciążeń była mniejsza od 0,1 % zmiany wagi próbki podczas całego cyklu obciążeń. Czasy osiągnięcia przez dany materiał przy danym profilu obciążeń stanu ustabilizowanego podano w tabeli 3. Poszczególne materiały charakteryzują się porównywalnym czasem dojścia do stabilnego cyklu magazynowania wilgotnością bez względu na profil obciążenia wilgotnością. Przy czym należy tutaj zwrócić uwagę, że poszczególne materiały w różny sposób magazynują wilgoć. Ilość zmagazynowanej wilgoci przez poszczególne materiały w przypadku profilu obciążeń 9/15 jest większa w poszczególnych cyklach aniżeli w przypadku profilu obciążeń 2/22.

Tabela 3. Czas dojścia do stanu ustabilizowanego dla różnych profili obciążenia wilgotnością.

Table 3. Time to reach steady-state for different moisture load profiles.

Materiał	Profil obciążeń 9/15godz.	Profil obciążeń 2/22godz.
3.3.3.	2 dni	2 dni
3.3.10.	5 dni	5 dni
4.7.3.	6 dni	6 dni
6.5.3.	40 dni	33 dni

Krzywe absorpcji wilgoci przy danym profilu obciążenia wilgotnością dla poszczególnych materiałów w stanie ustalonym porównano na rys. 5 – 6.

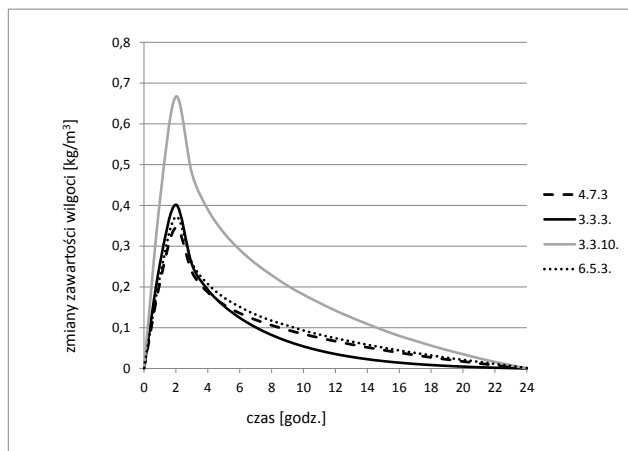


Rys. 5. Krzywe absorpcji wilgoci przy profilu obciążeń wilgotnością 9/15 godz.

Fig. 5. Moisture absorption curves under 9/15 moisture load profile.

Widzimy, że ilość zaabsorbowanej wilgoci przez dany materiał jest zmienna i uzależniona od profilu obciążeń wilgocią. Wszystkie materiały za wyjątkiem materiału 3.3.3. dla profilu obciążeń 9/15 pochłaniają więcej wilgoci niż dla krótszego profilu obciążenia wilgocią 2/22. Materiał 3.3.3. pod obciążeniem 2/22 pochłania $0,40 \text{ kg/m}^3$, a pod obciążeniem 9/15 - $0,09 \text{ kg/m}^3$, czyli o ok. 77 % mniej niż w przypadku obciążenia 2/22.

W przypadku skokowego obciążenia wilgocią materiał 6.5.3. w stanie ustalonym pochłania najwięcej wilgoci $6,92 \text{ kg/m}^3$. W dużym stopniu wpływa na to jego o wiele większa zdolność do pochłaniania wilgoci niż pozostałych materiałów (izoterma sorpcji). W przypadku obciążeń dynamicznych sytuacja ulega zmianie, w tym przypadku zarówno pod wpływem profilu obciążeń 9/15 jak i 2/22 materiałem, który pochłania największą ilość wilgoci jest materiał 3.3.10. (rys. 5, 6). Widzimy zatem, że w przypadku obciążeń dynamicznych ilość wilgoci pochłanianej i oddawanej przez dany materiał jest zmienna na co wpływ oprócz chłonności wody ma również przepuszczalność pary wodnej.



Rys. 6. Krzywe absorpcji wilgoci przy profilu obciążeń wilgocią 2/22 godz.

Fig. 6. Moisture absorption curves under 2/22 moisture load profile.

4. PODSUMOWANIE

W artykule skupiono się na badaniach wpływu zróżnicowanych profili obciążeń wilgocią oraz wpływu pozostałej w materiale wilgoci w poszczególnych cyklach obciążeń na zdolności magazynowania wilgoci przez poszczególne materiały. Wpływ tych czynników jest silnie uzależniony od właściwości danego materiału. Przebadano materiały charakteryzujące się dużą chłonnością wilgoci i oporem dyfuzyjnym $\mu > 10$, tak jak materiał 6.5.3. oraz materiały o małej chłonności i niskim oporze dyfuzyjnym $\mu < 5$ takie jak 3.3.3., 3.3.10., oraz 4.7.3. Materiał 6.5.3.

pomimo bardzo dużej zdolności do pochłaniania wilgoci przy zmiennych profilach dziennego obciążenia wilgocią nie wykazuje największych zdolności do akumulowania wilgoci. Z kolei materiał 3.3.10., który ma zdecydowanie mniejszą zdolność do pochłaniania wilgoci przy zmiennych cyklach obciążenia wilgocią akumuluje zdecydowanie więcej wilgoci. A zatem widzimy, że przy zmiennych profilach obciążeń na zdolność magazynowania wilgoci oprócz sorpcji wpływa także opór dyfuzyjny materiału.

Należy również podkreślić znaczenie grubości danego materiału na jego zdolność do akumulacji wilgoci. Pomimo podobnych właściwości jakimi charakteryzuje się materiał 3.3.10. oraz materiał 4.7.3. widzimy, że materiał 4.7.3., który jest o 40 mm grubszy od materiału 3.3.10. akumuluje zdecydowanie mniejszą ilość wilgoci niż materiał 3.3.10.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2013-2017 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego.

INVESTIGATIONS OF HYGROTHERMAL PROPERTIES OF NATURAL HYGROSCOPIC MATERIALS

Summary: This paper presents the study of basic hygrothermal properties of natural, hygroscopic materials. The results were used for further studies to determine the effect of different moisture load profiles on the possibility to absorb and release moisture by different materials. Results of this study confirmed that the behavior of individual materials under the influence of the moisture load profile is affected by the moisture sorption properties and water vapor permeability.

Literatura

- [1] Casey S.P., Hall M.R., Tsang S.C.E., Khan M.A. *Energetic and hygrothermal analysis of a nano-structured material for rapid-response humidity buffering in closed environments*. Building and Environment 60 (2013) 24-36.
- [2] DIN 18947, Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods
- [3] Ge H., Yang X., Fazio P., Rao J. *Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials*. Building and Environment 81 (2014) 162-171
- [4] Li Z., Chen W., Deng S., Lin Z. *The characteristics of space cooling load and indoor humidity control for residences in the subtropics*. Building and Environment 41 (2006) 1137-1147
- [5] Osanyintola O.F., Simonson C.J. *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact*. Energy and Buildings 38 (2006) 1270-1282
- [6] Osanyintola O.F., Talukdar P., Simonson C. *Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the*

moisture buffering capacity of spruce plywood. Energy and Buildings 38 (2006) 1283-1292

[7] PN-EN ISO 12571:2002 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie właściwości sorpcyjnych

[8] PN-EN ISO 12572:2004 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie właściwości związanych z transportem pary wodnej

[9] PN-EN 1602:2013-07 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określenie gęstości pozornej

[10] PN-EN 12664 :2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego. Suche i wilgotne wyroby o średnim i małym oporze cieplnym

[11] PN-EN 12667:2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego. Wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym

[12] PN-EN ISO 10456:2009/AC:2010 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych

[13] Wołoszyn M., Kalamees T., Abadie M.O., Steeman M., Kalagasidis A.S. *The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings*. Building and Environment 44 (2009) 515-524.

[14] WUFI Pro 5.0 Program do symulacji cieplno-wilgotnościowych przegród budowlanych opracowany przez Fraunhofer Instytut für Bauphysik (Niemcy)

[15] Yang X, Fazio P, Ge H, Rao J. *Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full scale experimental investigation*. Building and Environment 47 (2012) 88-196

[16] www.h-house.project.eu