

Tematyka prezentowanego artykułu była omawiana podczas V Międzynarodowej Konferencji pt. *Autoklawizowany Beton Komórkowy*, która odbyła się w Bydgoszczy.

dr inż. Gregor A. Scheffler*

dr inż. Rudolf Plagge**

Metody określania zawartości i transportu wilgoci w autoklawizowanym betonie komórkowym

Methods for moisture content and transport property determination of autoclaved aerated concrete

Streszczenie. Wilgotność autoklawizowanego betonu komórkowego stanowi decydujący wyznacznik wielu innych jego właściwości, takich jak np. przewodzenie ciepła, karbonatyzacja czy skurcz, dlatego też bardzo ważne jest określenie zdolności do transportu i magazynowania wilgoci.

W artykule omówiono różne metody oznaczania właściwości związanych z wilgotnością, które pozwalają na ocenę we wszystkich etapach zawilgocenia. W przypadku określania poziomu i transportu wilgoci, zarówno jako pary jak i wody, stosowane są metody pośrednie i bezpośrednie. Dane te służą do wyprowadzenia nieliniowych funkcji niezbędnych do zaawansowanej symulacji numerycznej zachowania się materiału pod względem odporności na wilgoć.

Słowa kluczowe: magazynowanie wilgoci, transport wilgoci, metody pomiaru.

Abstract. The hygric performance of autoclaved aerated concrete is a key determinant for many other material properties as e.g. thermal conduction, carbonation or shrinkage behavior. With these reasons determination of moisture storage and transport, is hence a prerequisite and a standard in production and process supervision.

In this paper different methods for moisture property determination were discussed. The methods cover the full range of possible moisture stages. For moisture transport, vapor and liquid phase transport is considered by different direct and indirect methods. The obtained data is shown and discussed. This data is used to derive the nonlinear material functions required for sophisticated numerical simulation of the hygric material performance.

Keywords: moisture storage, moisture transport, measurement methods.

Wilgotność autoklawizowanego betonu komórkowego decyduje o jego wytrzymałości, zmianie objętości (skurczu), karbonatyzacji oraz właściwościach cieplnych. Aby zrozumieć procesy wpływające na te czynniki oraz móc modelować i przewidzieć zachowanie się materiału pod względem wilgotności w dowolnych warunkach klimatycznych, istotne jest zebranie wszystkich jego właściwości wilgotnościowych i zbadanie ich różnymi metodami.

Zawartość wilgoci

Dane na temat zawartości wilgoci obejmują wilgotność sorpcyjną i desorpcyjną, które bada się wg różnych procedur i metod. W rezultacie powstał podział na sorpcję wilgoci i retencję wilgoci. Metody sorpcyjne wykorzystują wilgotność względną jako potencjał wilgoci, natomiast metody retencyjne ciśnienie włośkowate. Obie wiążą się z równaniem Kelvina, w którym p_c to ciśnienie włośkowate, ρ_1 gęstość wody w stanie ciekłym, R_v stała gazowa pary wodnej, T temperatura, a ϕ wilgotność względna:

$$p_c(\phi) = \rho_1 \cdot R_v \cdot T \cdot \ln(\phi)$$

Równanie Kelvina nie sprawdza się w przypadku całego zakresu wilgoci, ale wystarcza do poprawnego zebrania danych określających jej poziom.

* Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft, Oddział Badań Stosowanych i Fizyki Budowli

** Uniwersytet Techniczny w Dreźnie, Instytut Klimatologii Budowlanej

Sorpcja wilgoci. Pomiar kumulacji wilgoci higroskopijnej jest najczęściej wykonywany przez wystawienie próbki materiału na działanie określonej wilgotności względnej. Następnie czeka się na moment uzyskania równowagi (stałej masy) i w końcu grawimetrycznie określa odpowiadającą zawartość wilgoci. Istnieją dwa sposoby przeprowadzenia takich doświadczeń. Pierwszy bazuje na wykorzystaniu mikrowagi lub kalorymetru sorpcyjnego. Ustalają one wilgotność względną i automatycznie przeprowadzają pomiary grawimetryczne. Drugim sposobem jest zastosowanie konwencjonalnych eksykatorów z nasyconymi roztworami wodnymi soli. Metoda ta jest zawarta w normie ISO 12571 [2].

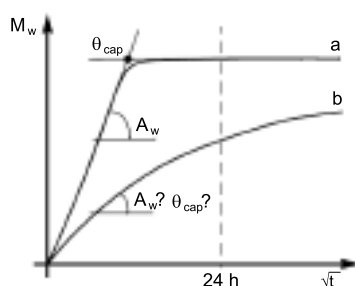
Retencja wilgoci. Kumulacja nadmiernej wilgoci higroskopijnej często nazywana jest retencją wilgoci ze względu na najbardziej popularne techniki pomiarowe używane do jej oznaczenia. W technikach tych wstępnie nasycona próbka poddawana jest działaniu ciśnienia, a następnie po osiągnięciu równowagi mierzona jest masa zatrzymanej wody. Najczęściej stosowanym urządzeniem podczas takich pomiarów jest zestaw komór ciśnieniowych. Metoda ta znalazła się w normie ISO 11274 [1].

Transport wilgoci

Dyfuzja pary wodnej. Podstawowa zasada pomiaru dyfuzji pary wodnej została określona w normie ISO 12572 [3]. W literaturze [2; 6] opisane zostały również inne urządzenia pomiarowe, działające na

tej samej zasadzie pomiarowej, która wykorzystuje stacjonarny przepływ cieczy przy stałym gradientcie potencjału. Potencjał, tj. gradient ciśnienia pary, może być modyfikowany przez kontrolowanie temperatury i wilgotności względnej.

Absorpcja wody. Określenie współczynnika absorpcji wody przeprowadza się zgodnie z normą ISO 15148 [4]. Aby zapewnić transport jednowymiarowy, należy uszczelnić boczne strony próbki. W przypadku materiałów jednolitych i izotropowych, na doświadczenie z absorpcją wody składają się dwie odrębne fazy (rysunek 1, krzywa a). Pierwsza z nich charakteryzuje się liniowym wzrostem masy będącym w zależności z pierwiastkiem kwadratowym czasu. Przejście z fazy pierwszej do drugiej następuje, gdy wilgoć sięga górnej części próbki. Dalszy wzrost masy wywołany jest procesami redystrybucji uwięzionego powietrza i zazwyczaj postępuje bardzo powoli.



Rys. 1. Dane dotyczące absorpcji wody różnych typów materiałów oraz automatyczne urządzenie do pomiaru absorpcji wody opracowane wg [3; 7]

Na podstawie tego doświadczenia można uzyskać współczynnik absorpcji wody oraz zawartość wilgoci kapilarnej. W pierwszej fazie doświadczenia współczynnik absorpcji wody określany jest jako tangens kąta nachylenia wzrostu masy do pierwiastka kwadratowego czasu. Zawartość wilgoci kapilarnej uzyskuje się wówczas, gdy kąt nachylenia wzrostu masy odchyli się od liniowego pierwiastka kwadratowego czasu lub jako zawartość wilgoci uzyskana na zakończenie doświadczenia.

Norma ISO 15148 [4] określa minimalne wymagania, ale przed przeprowadzeniem badań należy przeanalizować czas trwania całego doświadczenia i liczbę danych zebranych podczas pomiaru oraz uszczelnienie górnej części w celu zapobiegnięcia odparowywaniu lub absorpcji wilgoci z zewnątrz. Czas trwania doświadczenia określony na 24 h nie musi być zgodny z czasem koniecznym do osiągnięcia przez wilgoć górnej części próbki. Zależy on od właściwości materiału i wysokości próbki (rysunek 1, krzywa b), dlatego jako kryterium zakończenia doświadczenia powinno być brane zachowanie materiału. Aby poradzić sobie z tym problemem, opracowana została waga automatyczna zgodnie z [3; 7], która nieprzerwanie mierzy wzrost masy, kreśląc krzywą. Czas trwania doświadczenia można precyzyjnie regulować zgodnie z zachowaniem materiału. Ponadto, można obserwować i oceniać absorpcję wody w materiałach niestosujących się idealnie do pierwiastka kwadratowego przebiegu czasu (rysunek 1, krzywa b). Chcąc zapobiec wysuszeniu próbki materiału przez odparowywanie przez górną powierzchnię, zaleca się ją przykryć. Przykrycie musi jednak umożliwiać zrównoważenie ciśnienia nad próbką z ciśnieniem atmosferycznym [4]. W związku z tym w górnym uszczelnieniu robi się otwory lub szczeliny, pozwalające na zrównoważenie ciśnienia powietrza. Więcej informa-

cji na temat badania absorpcji wody i wpływu innych czynników w [1; 4; 7; 10].

Wysychanie. Pomiar wysychania materiałów budowlanych zapewnia informacje na temat właściwości transportu wilgoci przy niższej zawartości wilgoci nienasyconej. Dzięki temu schnięcie pełni ważną rolę w przypadku konstrukcji murew [5; 10].

Wysychanie materiałów porowatych zależy od:

- właściwości materiałów (magazynowanie i transport wilgoci);
- warunków klimatycznych (temperatura i wilgotność względna);
- warunków wymiany ciepła i pary (warunki przepływu powietrza).

Można wyodrębnić dwie fazy wysychania. Pierwsza charakteryzuje się nieomal liniowym spadkiem masy w danym czasie. Wówczas materiał transportuje wilgoć do powierzchni odparowywania szybciej niż to, co może wyparować. Podczas pierwszej fazy wysychanie jest ograniczone przez warunki graniczne [9; 11]. W drugiej fazie wysychania zachodzi odwrotne zjawisko fizyczne. Transport wilgoci odbywa się wolno, a warunki graniczne umożliwiają poruszanie się wilgoci w kierunku otaczającego powietrza szybciej, niż dociera ona do powierzchni. Podczas drugiej fazy wysychanie jest ograniczone przez właściwości materiałów. Do tej pory nie powstała norma dotycząca wysychania. Ze względu na to, że na wysychanie wpływa wiele czynników, ważne jest przeprowadzanie doświadczeń w warunkach laboratoryjnych, aby zmierzyć wilgotność względną i temperaturę otoczenia oraz temperaturę powierzchni odparowywania. W tym celu opracowane zostało specjalne urządzenie do suszenia. Więcej informacji w [9; 10; 11].

Doświadczenia z przepływem nasyconym i nienasyconym.

W obrębie ciśnienia włoskowatego bliskiego stanowi nasycenia można przeprowadzić pomiary stacjonarnych przepływów cieczy przy różnym poziomie ciśnienia, aby określić przewodność kapilarną. Układ doświadczalny działa na tej samej zasadzie jak w przypadku pomiaru dyfuzji pary [6].

Wyniki

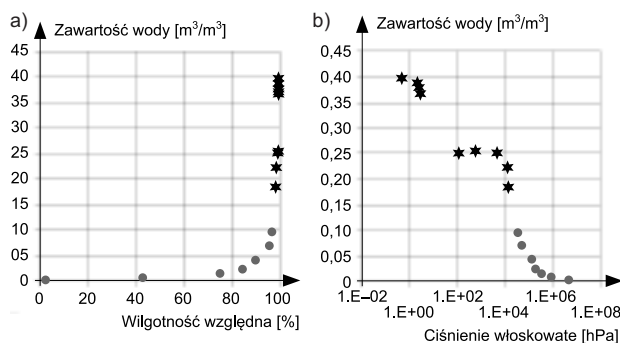
Badany autoklawizowany beton komórkowy (ABK) to odmiana P2 o gęstości 400 kg/m³ (tabela). Dane dotyczące kumulacji wilgoci znajdują się na rysunku 2. Przy użyciu równania Kelvina zostały przekształcone dane dotyczące wilgotności względnej i ciśnienia włoskowatego.

Rysunek 2b pokazuje, iż ABK zawiera pory o różnej średnicy. Przy niskim ciśnieniu włoskowatym istnieją dwa maksima porowe, tj. dwa ostre ujemne kąty nachylenia. Przy wyższym ciśnieniu włoskowatym, tj. przy niższej zawartości wilgoci, nie istnieje żadne wyraźne maksimum porowe. Zamiast tego mamy do czynienia z wieloma porami i w rezultacie z przejściem w zakres wilgoci higroskopijnej, która jest typową właściwością betonu komórkowego.

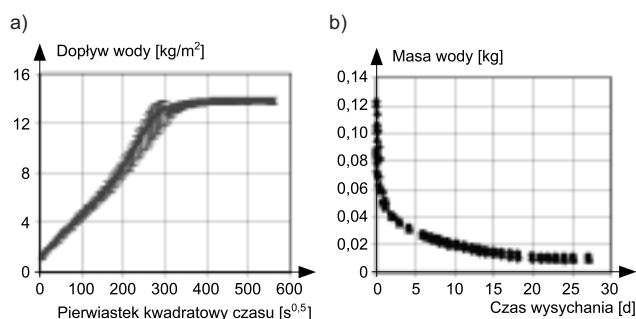
Rysunek 3a przedstawia dane uzyskane na podstawie doświadczeń z absorpcją wody, a rysunek 3b z wysychaniem. Widać, że absorpcja wody w ABK odpowiada, z małym odchyleniem, przewidywanemu zachowaniu liniowemu w skali pierwiastka kwa-

Podstawowe właściwości badanego ABK

Parametry	Wartość
Gęstość w stanie suchym ρ [kg/m ³]	400
Porowatość otwarta θ_{por} [m ³ /m ³]	0,87
Nasycenie kapilarne θ_{cap} [m ³ /m ³]	0,26
Współczynnik oporu dyfuzyjnego μ_{dry}	7,5
Absorpcja wody A_w [kg/(m ² s ^{0.5})]	0,043



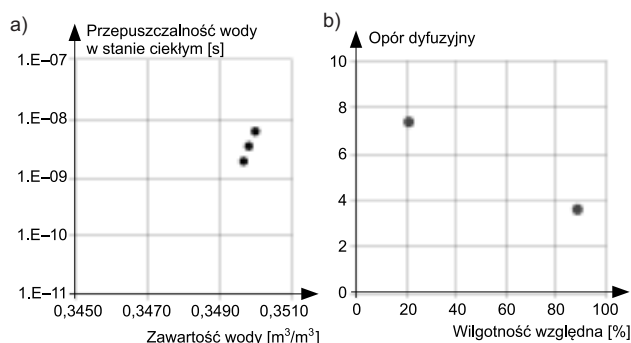
Rys. 2. Dane dotyczące kumulacji wilgoci w badanym ABK. Kropki symbolizują dane uzyskane w doświadczeniach z sorpcją; gwiazdki w doświadczeniach z retencją



Rys. 3. Dane dotyczące absorpcji wody (a) i wysychania w badanym ABK (b)

dratowego czasu. Po tym jak wilgoć osiągnęła górną część próbki (łuk na krzywej absorpcji wody), zanotowano dalszy niewielki wzrost zawartości wilgoci. Współczynnik absorpcji wody został wyprowadzony na podstawie liniowego kąta nachylenia. Krzywa wysychania (rysunek 3b) rozróżnia wyraźnie pierwszą i drugą fazę wysychania. Na podstawie kąta nachylenia w drugiej fazie można wywnioskować, że ABK wysycha stosunkowo szybko. Jest to spowodowane niskim oporem dyfuzyjnym oraz transportem wilgoci nienasyconej, który jest stosunkowo szybki.

Rysunek 4 przedstawia wyniki prób oporu dyfuzyjnego pary wodnej i przepuszczalności wody. W przeciwieństwie do doświadczeń z absorpcją wody i wysychaniem, te dwie metody umożliwiają bezpośredni pomiar właściwości transportowych. Rysunek 4a przedstawia dane z pomiarów, które potwierdzają, iż w pełni nasycony ABK odznacza się stosunkowo dużą przepuszczalnością. Widać to wyraźnie na rysunku 4b, na którym przedstawiono mierzone współczynniki oporu dyfuzyjnego w zależności od średniej



Rys. 4. Dane dotyczące badanego ABK: w stanie nasycenia wodą w stanie ciekłym (a) oraz współczynniki oporu dyfuzyjnego (b)

wilgotności względnej. Wyniki wskazują na umiarkowane właściwości transportowe wody przez ABK już przy niskiej zawartości wilgoci. Do tego samego wniosku można dojść, wykorzystując dane z doświadczenia z wysychaniem.

Wnioski

Przedstawiono kilka podstawowych doświadczeń stosowanych w badaniach wilgotności ABK. Stanowią one właściwą podstawę metodologiczną do oceny materiału pod kątem odporności na wilgoć. Zaprezentowane metody badań ABK oraz uzyskane dzięki nim dane mogą posłużyć jako podstawa do modelowania materiału, tj. do przekształcenia mierzonych właściwości w funkcje, które z kolei mogą być wykorzystane w modelach symulacyjnych transportu wilgoci.

Literatura

- [1] Descamps F., 2004. Continuum and discrete modelling of isothermal water and air transfer in porous media. Ph. D. Thesis, Catholic University Leuven. Leuven, Belgium 1997.
- [2] Galbraith G. H., McLean R. C., Kelly D., 1997. Moisture permeability measurements under varying barometric pressure. Building Research and Information, Vol. 25, No. 6, 348 – 353.
- [3] Häupl P., Stopp H., Strangfeld F., 1989. Messverfahren und Messanordnung zur gleichzeitigen Bestimmung der Kapillarwasserleitfähigkeit und der gravimetrischen Feuchteleitfähigkeit von kapillarporösen Stoffen. Patentschrift DD 290 951 A5, ISSN 0433-6461.
- [4] Janssen H., Derluyn H., Carmeliet J., 2007. Moisture transfer through mortar joints: interface resistances or hygric property changes? Proceedings to the 12th Symposium for Building Physics, Dresden University at Technology, Institute of Building Climatology, Vol. 2, Dresden, 808 – 815.
- [5] Ojanen T., Salonvaara M., Simonson C. J., 2002. Integration of simplified drying tests and numerical simulation in moisture performance analysis of the building envelope. 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, 151 – 158.
- [6] Plagge R., Cerny R., Mathiasovsky P., 2003. Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation, Workpackage 3 – Laboratory Measurements. Final report of the INSUMAT project, Workpackage 3, Self publishing at TU Dresden.
- [7] Plagge R., Scheffler G., Grunewald J., 2005. Automatic measurement of the water uptake behavior for building materials. 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavik June. Vol. 1, 15 – 22.
- [8] Richards L. A., Fireman M., 1943. Pressure-Plate Apparatus for Measuring Moisture Sorption and Transmission by Soils. Soil Science, Vol. 56, No. 6, 395 – 404.
- [9] Scheffler G. A., Plagge R., 2005. Drying behaviour of building materials. 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Proceedings Vol. 1, Reykjavik, 23 – 30.
- [10] Scheffler G. A., 2008. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. PhDthesis, Institute of Building Climatology, Dresden University of Technology.
- [11] Scheffler G. A., Plagge R., 2010. Introduction of a drying coefficient for building materials. Buildings XI Conference, Clearwater Beach FL.

Normy

- [1] ISO 11274:1998 Jakość gleby – Oznaczanie charakterystyki retencji wodnej – Metody laboratoryjne.
- [2] ISO 12571:2000 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie właściwości sorpcyjnych.
- [3] ISO 12572:2001 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie właściwości związanych z transportem pary wodnej.
- [4] ISO 15148:2002 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie współczynnika absorpcji wody przez częściowe zanurzenie.