

Fizyczne podstawy procesu krzepnięcia wody w wilgotnych budowlanych materiałach porowatych

Mgr inż. doktorant Jacek Partyka, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące podstaw fizycznych procesu krzepnięcia wody w wilgotnych porowatych materiałach budowlanych.

Wzrost zawartości wody w tych materiałach powoduje wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła danego materiału, natomiast wpływa negatywnie na jego trwałość. W materiałach tych wzrost objętości tworzącego się lodu, występujący podczas przemiany fazowej, powoduje uszkodzenie struktury wilgotnych materiałów porowatych.

Z tego względu zrozumienie i dokładne poznanie zjawiska zamarzania wody w wilgotnych porowatych materiałach budowlanych jest bardzo ważne, ponieważ stwarza możliwości opracowania i zastosowania metod skutecznego przeciwdziałania niekorzystnym następstwom, spowodowanym przez zjawisko krzepnięcia w wilgotnych materiałach porowatych.

2. Proces krzepnięcia w materiałach porowatych

2.1. Badania procesu krzepnięcia w ogólnym zarysie historycznym

Krzepnięcie jest jednym z najbardziej powszechnie obserwowanych zjawisk w naszym otoczeniu. W zastosowaniu inżynierskim procesy krzepnięcia są spotykane w materiałach i procesach, gdzie technologie kontrolujące proces krzepnięcia są przełomowe, decydujące zarówno o wytwarzaniu wysokiej jakości produktów, jak i rozwoju nowych materiałów. Na przykład szybkie krzepnięcie stopów jest ważnym czynnikiem do tego stopnia, że decyduje o wynikach budowy (postaci) fazy stałej (prace Flemingsa (1974) oraz Kurza i Fishera (1992)).

W geofizyce i nauce planetarnej krzepnięcie jest głównym mechanizmem formowania się skorupy ziemi i przyczynia się do poznania głębszych struktur wnętrza planety, (prace Turcotte i Schubert (1982)).

Badania nad krzepnięciem w nasyconych cieczą ciałach porowatych przyciągają wiele uwagi w szczególności dla zrozumienia procesów transportu w zamrożonej glebie. Większość z nich przeprowadzono w warunkach brzegowych stałych temperatur chłodzenia, jak podsumowane to zostało przez Nielda i Bejana (1999).

W latach 70-tych analizy wykorzystania teorii zmiennej zespolonej zostały rozwinięte przez Goldsteina i Reida (1978), aby analizować zmiany fazy w nasyconych wodą ośrodkach porowatych pod względem jej obecności oraz jej przepływu w tych ośrodkach.

O'Neill i Albert (1984) i Oosthuizen (1988) badali krzepnięcie w ośrodkach porowatych na występowanie naturalnej konwekcji, lecz nie rozważali w szczególności zamarzania wody.

Proces zamarzania wody w ośrodkach porowatych został zbadany w odpowiednio późniejszym czasie.

Na przykład Chellaiach i Viskanta (1988), Sasaki i inni (1990) oraz Sasaki i Aiba (1992) badali proces krzepnięcia w prostokątnych wydrążeniach chłodzonych z kierunku bocznego, podkreślając wpływ naturalnej konwekcji na zamarznięte miejsca.

Sugawara i inni (1988) prowadzili studia eksperymentalne nad zamarzaniem w poziomych warstwach ośrodka porowatego. W szczególności rozważali naturalną konwekcję ciepła w ośrodkach o ekstremalnych gęstościach [1,2,4-5]. Problem krzepnięcia cieczy w materiałach porowatych może występować w konstrukcjach inżynierskich, takich jak wilgotne fundamenty w budownictwie, wilgotne izolacje, materiały włókniste, a także w wilgotnych materiałach zmiennofazowych (PCM – phase – change material) podczas akumulacji ciepła [3].

2.2. Materiały porowate

Zakres i znaczenie zjawiska transportu cieczy w materiałach porowatych odnosi się do większości znanych materiałów.

Materiały porowate są dosłownie wszędzie spotykane w naszym życiu.

Występują w technologii i przyrodzie, z wyjątkiem metali i kilku rodzajów zwartych skał i tworzyw sztucznych.



Rys. 1. Styropian [1]



Rys. 2. Beton komórkowy [2]

Praktycznie wszystkie stałe i półstałe materiały są porowate w różnym stopniu.

Zgodnie z [6] materiał musi być rozpatrywany z dwóch punktów widzenia:

- musi zawierać odpowiednio małe przestrzenie, zwane porami lub pustkami, wolne od ciał stałych; pory zazwyczaj zawierają wiele cieczy, jak woda, benzyna lub mieszaniny różnych cieczy;
- muszą być przepuszczalne dla różnych cieczy, to znaczy cieczy powinny być zdolne do wnikania do powierzchni tworzonej przez materiał i występującej na jego powierzchni.

W tym przypadku odnosi się to do właściwości zwanej zdolnością materiału porowatego.

Wiele jest przykładów materiałów porowatych w naszym codziennym życiu i środowisku naturalnym.

Tkaniny i skóry są silnie porowate; zawdzięczają to swoim termicznym izolacyjnym właściwościom oraz mają właściwość określaną jako „oddychanie”, dzięki porowatej strukturze.

Papierowe ręczniki i chusteczki są także silnie porowate i zawdzięczają to swojej częściowej chłonności przez porowatą strukturę i częściowo – jako właściwość określaną – silne zwilżanie przez wodę.

Porowatymi są takie materiały budowlane, jak cegły, beton, wapień, piaskowiec. Są one lepiej od innych materiałów izolujące termicznie, ponieważ mają porowatą strukturę. Domy mieszkalne izolowane są materiałami izolacyjnymi, które swoje wyjątkowe właściwości zawdzięczają w przeważającej części ich bardzo wysokiej porowatości, która umożliwia im zatrzymywanie dużych ilości powietrza.

Drewno, jako materiał budowlany, może być impregnowane, dzięki właśnie swojej porowatości.

Przykłady materiałów porowatych przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Mamy wiele przykładów, gdzie materiały porowate odgrywają ważną rolę w technologii i odwrotnie: istnieje wiele różnych rodzajów technologii, które zależą od wykorzystania materiałów porowatych. Najważniejsze obszary technologii w dużym stopniu zależą od właściwości materiałów porowatych, które występują w hydrologii, odnoszą się do ruchu wody na ziemi i gruncie, występują w strukturach takich, jak tamy, przepływy

do studzienek, czy zjawiskach, jak wtargnięcie wody morskiej w obszary przybrzeżne lub urządzeniach, np. filtry do oczyszczania wody zdanej do spożycia i odprowadzanej jako ścieki, itp. [6].

Porowatość materiałów jest właściwością, która sprzyja wchłanianiu wody przez te materiały.

Głównym parametrem materiałów porowatych jest porowatość efektywna, która wyrażona jest wzorem [7]:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

gdzie: V_p jest objętością porów otwartych zawartych w elementarnym obszarze wypełnionym materiałem porowatym, V natomiast jest objętością całego obszaru.

W tabeli 1 zestawiono wyznaczone za pomocą geometrii różnicowej podstawowe parametry strukturalne kilku przykładowych wybranych materiałów budowlanych [7]:

Tabela 1. Podstawowe parametry struktury wewnętrznej wybranych materiałów budowlanych [8]

Materiał	Gęstość pozorna kg/m ³	Gęstość szkieletu kg/m ³	Porowatość %	Całkowita objętość porów dm ³ /kg	Całkowita powierzchnia porów m ² /g
Zaprawa cementowa	2019	2535	20,04	0,1008	1,317
Cegła zwykła	1780	2668	33,3	0,1870	7,867
Gips budowlany	935	2334	60,5	0,6407	3,041
Gazobeton	1002	2334	57,1	0,5694	26,743

Przedstawione właściwości wybranych materiałów budowlanych w powyższej tabeli są dowodem na to, że porowatość materiałów budowlanych jest bardzo powszechna. Z porowatością związana jest skłonność do pochłaniania wilgoci [7], a co za tym idzie dalej, zdolność do ich przemarzania w warunkach niskich temperatur.

3. Podstawy fizyczne procesu krzepnięcia w wilgotnych budowlanych materiałach porowatych

3.1. Oddziaływanie zamrożonej wody na porowaty materiał budowlany

Niskie temperatury i mróz są nie tylko szkodliwe dla budynków, ale często zagrażają ich eksploatacji.

W niskich temperaturach materiały budowlane mogą się kruszyć, pękać i rozpadać, czyli mróz i lód czynią je nietrwałymi w tych warunkach.

Udowodniono w praktyce, że porowate materiały jamiaste (kamień, cegła, zaprawa, dachówka, beton i wszystkie materiały prefabrykowane) mogą być stabilne, ale także niestabilne w niskich temperaturach, w zależności od składu i struktury oraz ich środowiska.

Różne czynniki są przyjmowane jako kryterium dla określenia, czy materiał jest wrażliwy na mróz, czy nie. Niektóre uwzględniają porowatość i absorpcję wody, inne zmiany objętościowe, inne jeszcze liczbę cykli zamrażania i rozmrażania materiału itp.

Porowatość materiałów dzieli się na bezwzględną (całkowitą), dotyczącą wszystkich porów otwartych i zamkniętych lub względną, dotyczącą porów otwartych, które mogą wchłonąć wodę i spowodować zamknięcie porów.

Woda jako ciecz i woda w postaci lodu w znacznym stopniu wpływa na ogół na trwałość materiałów budowlanych, a zwłaszcza na trwałość materiałów porowatych, ponieważ nawilżenie i nawodnienie powoduje poważne zmiany w strukturze materiału.

W wyniku zmian spowodowanych przez nasycenie wodą materiału przez dłuższy czas jest on podatny na kruszenie, pękanie i całkowity rozpad, zwłaszcza w warunkach mrozu [9].

W opracowaniach dotyczących problematyki krzepnięcia stwierdza się, że przy zamrażaniu wody następuje wzrost objętości tworzącego się lodu o 9%.

Z badań wynika jednak, że zwiększaniu objętości zamrażającej wody i powstawaniu w materiale naprężeń dodatnich (nadciśnienia) towarzyszy zjawisko jego odprężenia (podciśnienia), związanego z migracją wilgoci, spowodowaną ciśnieniem termomolekularnym [7, 10, 11].

W odróżnieniu od gruntów porowate materiały budowlane w warunkach naturalnych nie są w pełni nasycone wodą, czyli część ich porów jest pusta. W takich materiałach przy obniżaniu temperatury w pierwszej kolejności zamraża woda w porach największych, tworząc w nich kryształki lodu, przy czym znaczna ilość wody znajdującej się w porach mniejszych, na skutek działania sił powierzchniowych na ściankach porów, pozostaje nie zamrożona.

Jeśli w porach materiału nie ma wystarczająco dużo miejsca, aby zniwelować skutki zwiększania się objętości zamrażającej wody o 9%, to powstaje w nich ciśnienie hydrauliczne, mogące prowadzić do uszkodzenia struktury materiału.

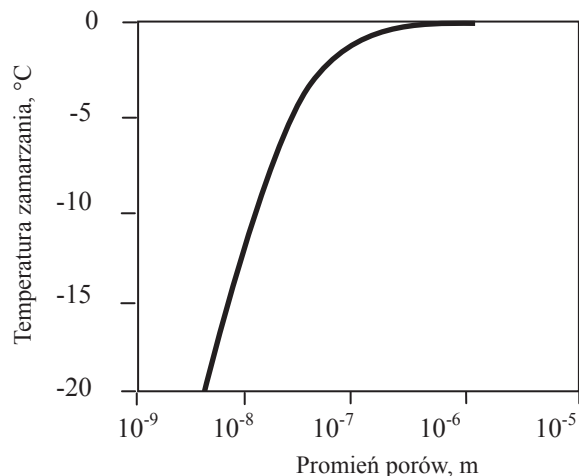
Jest to jednak przypadek dość rzadki, gdyż najczęstszą przyczyną zniszczeń mrozowych materiałów porowatych jest ekspansja w nich lodu [14].

3.2. Temperatura i ciśnienie w procesie krzepnięcia wilgotnych porowatych materiałów budowlanych

Temperatura zamrażania wody zawartej w porach materiału jest znacznie niższa, niż wynikałoby to z występowania w niej rozpuszczonych soli, względnie przechłodzenia.

Zjawisko to jest tym wyraźniejsze, im mniejsza jest szerokość porów materiału. Z obserwacji wynika również, że cząsteczki wody w niektórych położeniach na powierzchni ciała stałego zamrażają dopiero w temperaturze od -80 do -120°C , a między lodem i ciałem stałym utrzymuje się cienka warstwa wody o właściwościach płynnych.

Z uwagi na dużą powierzchnię właściwą budowlanych materiałów porowatych (np. w przypadku kamienia cementowego sięga ona powyżej $100\text{ m}^2/\text{g}$) zamrażanie wody w porach uzależnione jest w dużym stopniu od sił powierzchniowych. Siły te powodują znaczne zwiększenie ciśnienia wody w wąskich porach materiału. Ze względu na to, że temperatura zamrażania wody zawartej w materiale spada wraz ze wzrostem ciśnienia, największy jej spadek obserwuje się w porach najmniejszych [7] (rys. 3).



Rys. 3. Zależność temperatury zamrażania od promienia porów [7, 13]

Temperaturę zamrażania wody zawartej w materiale porowatym można obliczyć z zależności [7, 12]:

$$\ln = \frac{T_p}{T} = - \frac{V_i \Delta \Psi}{L_i r} \quad (2)$$

gdzie oznaczono odpowiednio:

T_p jako temperaturę zamrażania wody porowej, T jest temperaturą zamrażania wody swobodnej, V_i jest objętością molową lodu, $\Delta \Psi$ jest zmianą energii powierzchniowej przy zamrażaniu, natomiast L_i – ciepłem topnienia lodu.

Przy zamarzaniu wody w porach materiału występują zatem dwa rodzaje ciśnienia:

- nadciśnienie, spowodowane zwiększaniem się objętości wody przy jej zamarzaniu o 9%,
- podciśnienie, wywołane siłami powierzchniowymi, a w konsekwencji migracja wilgoci w materiale.

Interesująca jest teoria wynikająca z opracowania [14]. Mianowicie, w odróżnieniu od gruntów, porowate materiały budowlane w warunkach naturalnych nie są w pełni nasycone wodą, czyli część ich porów jest pusta. W takich materiałach przy obniżaniu temperatury, w pierwszej kolejności zamarza woda w porach największych, tworząc w nich kryształki lodu, przy czym znaczna ilość wody znajdującej się w porach mniejszych, na skutek działania sił powierzchniowych na ściankach porów, pozostaje nie zamrożona.

Jeśli w porach materiału nie ma wystarczająco dużo miejsca, aby zniwelować skutki zwiększania się objętości zamarzającej wody o 9%, to powstaje w nich ciśnienie hydrauliczne, mogące prowadzić do uszkodzenia struktury materiału. Jest to jednak przypadek dość rzadki, gdyż najczęstszą przyczyną zniszczeń mrozowych materiałów porowatych jest ekspansja w nich lodu.

Zagadnienia zależności ciśnienia występującego podczas procesu zamarzania wody w materiale porowatym od temperatury przemiany fazowej rozważane są również w pracy [9]. Z opracowania tego wynika, że ilość wody (V_w), której ciężar właściwy wynosi jeden, w temperaturze 0°C , krzepnie i zamienia się w lód, którego ciężar właściwy wynosi 0,9175, co z kolei zmienia objętość wody osiągając $V_t = 1,09 V_w$.

Oznacza to, że po zamrożeniu, objętość lodu wzrasta do 9%, jeśli może on dowolnie się rozszerzać.

Jeżeli jakakolwiek ilość wody będzie ochłodzona do $-t^\circ\text{C}$ (rys. 4, punkt R), to swobodnie zwiększa ona swoją objętość.

Jeśli to zwiększenie objętości lodu jest niemożliwe, to niemożliwe jest również utrzymanie ciśnienia, natomiast

występuje zamiana w wodę (rys. 4, punkt R). Jeżeli ciśnienie jest dodatkowo zwiększone, a temperatura pozostaje niezmienną, wówczas nie tylko zmienia się objętość, ale woda może ponownie zamienić się w lód (rys. 4, pkt S), którego ciężar właściwy nie wynosi 0,9175, ale jest większy od 1 [15].

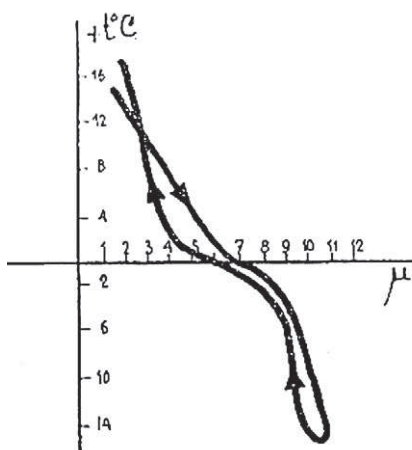
Na tym rysunku można zauważyć, że lód znajduje się między liniami AB oraz osią rzędnych i może powodować maksymalne ciśnienie 2200 kp/cm^2 , kiedy woda, to znaczy lód ochładza się do -22°C .

Mechanizm degradacji, wskutek działania mrozu, wydaje się stosunkowo prosty, ale występują wspomniane zmiany, w przybliżeniu, w sposób następujący:

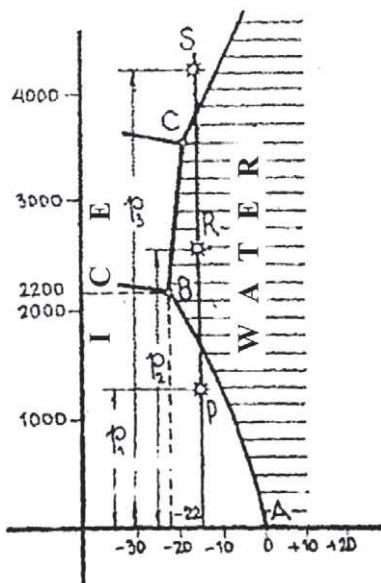
- nieprzenikniony i porowaty materiał jest nasycony wodą i w temperaturze poniżej zera, tworzy się lód;
- zamrożona woda – lód zwiększa swoją objętość i wzrost ciśnienia, co powoduje naprężenia w materiałach, a wraz z dalszym obniżaniem temperatury, może doprowadzić do zniszczenia materiału.

Gdy ciśnienie lodu staje się tak duże, że naprężenia rozciągające w materiale zostają przekroczone, materiał może pękać i ostatecznie ulec zniszczeniu.

Mimo to, taka interpretacja uszkodzenia materiału spowodowana działaniem mrozu, pojawia się jako prosta



Rys. 5.
Materiał ceramiczny – zachowanie stabilne na mroz [9]

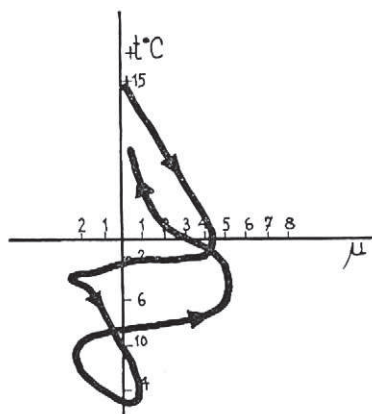


Rys. 4.
Schemat zależności ciśnienia od temperatury [9]

i akceptowalna i zależna od wielu różnych czynników. Materiały budowlane, takie jak: kamień, cegły, beton, zaprawy i inne podobne materiały, zwiększają swoją objętość, znajdując się w wodzie przez dłuższy czas. W czasie zamarzania wody w materiale przez dalsze obniżenie temperatury występują nowe zmiany objętościowe.

Ze względu na spadek temperatury materiał kurczy się, gdy woda przekształca się w lód, zgodnie ze schematem (rys. 6), co prowadzi do wniosków o stabilności lub niestabilności materiałów narażonych na działanie mrozu. Współczynnik rozszerzalności liniowej lodu to 51×106 , podczas gdy dla cegły i betonu jest on od 4,5 do 11 razy mniejszy.

Profesor Leman wyjaśnia powyższe problemy w pracy [15] na przykładzie oceny zachowania się pod wpływem mrozu, ceramicznych materiałów (rys. 5 i 6).

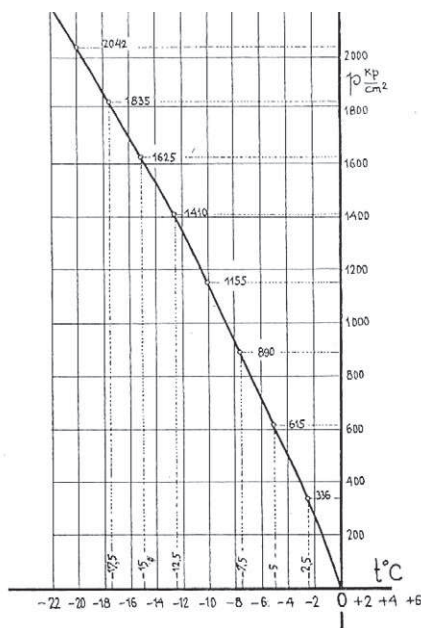


Rys. 6.
Materiał ceramiczny – zachowanie niestabilne na mróz [9]

To samo zjawisko jest postrzegane w konstrukcjach betonowych.

Ustalono, że zaprawy i betony, które nie są stabilne w temperaturach dodatnich, w przypadku przedłużającej się ekspozycji na mróz, wykazują tendencję do zwiększania objętości, natomiast te, które są stabilne na mróz nie zwiększają objętości, lecz wręcz przeciwnie, kurczą się.

Na wykresie na rysunku 4 lub na schemacie na rysunku 7, który jest tylko częścią wykresu rysunku 4, można zauważyć, że ciśnienie wywierane przez lód na przeszkodę



Rys. 7.
Wykres zależności ciśnienia od temperatury lodu (fragment wykresu przedstawionego na rys. 4) [9]

dy, na drodze rozszerzenia, może być znacznie wyższe, niż wytrzymałych materiałów stałych o strukturze kapilarnej, stosowanych w inżynierii.

A zatem materiał nie jest w stanie wytrzymać nacisku, powodując degradację materiału, ze względu na działanie lodu.

Zatem dla każdego materiału, w zależności od jego konstrukcji, przyporządkowana jest pewna ilość wody – „krytyczna ilość wody”, która powoduje degradację materiału podczas zamrażania.

To, w jakim stopniu różne materiały będą odporne na niszczące działanie zamrożonej wody, zależy niewątpliwie od właściwości mechanicznych materiału [15].

4. Podsumowanie

Przemarzenie wilgotnych budowlanych materiałów porowatych wpływa na własności techniczne materiałów, a nawet może prowadzić do ich destrukcji.

Problem krzepnięcia materiałów porowatych w połączeniu z migracją wilgoci ma duże znaczenie naukowe i techniczne.

Obecnie brakuje szczególnie badań eksperymentalnych, ze względu na trudność obserwacji procesu krzepnięcia w nieprzezroczystych materiałach, jakimi są materiały porowate.

Wymienione zjawiska są wystarczającym motywem, decydującym o prowadzeniu badań procesu krzepnięcia wilgotnych budowlanych materiałów porowatych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Weaver J. A., Viskanta R., Melting of frozen, porous media contained in a horizontal or a vertical, cylindrical capsule. Int J Heat Mass Transf 29, 1986
- [2] Lipnicki Z., Weigand B., Natural convection flow with solidification between two vertical plates filled with a porous medium. Heat Mass Transfer 44, 2008
- [3] Lipnicki Z., Weigand B., An experimental and theoretical study of solidification in a free-convection flow inside a vertical annular enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer 55, 2012
- [4] Derek B., Ingham Pop.I.J., Transport Phenomena in porous media III. 2005
- [5] Kimura S., Dynamic Solidification in a water-saturated porous medium cooled from above, Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Japan, 2005
- [6] Dullien F. A. L., Porous Media Fluid Transport and Pore Structure, Second Edition, San Diego Kalifornia, 1992
- [7] Klemm P., Praca zbiorowa: Budownictwo Ogólne, tom 2 Fizyka budowy, Arkady, Warszawa, 2005-2008
- [8] Gawin D., Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepło-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej. Rozprawy Naukowe z. 279, Łódź, 2000
- [9] Zdravković S., Stojić D., Turnič, D., Rehabilitation of Buildings in Winter conditions; University of Nis, The Faculty of Architecture and Civil Engineering, Serbia; FACTA UNIVERSITATIS Series: Architecture and Civil Engineering Vol. 9, No 3, 2011
- [10] Gumiński K., Termodynamika procesów nieodwracalnych. PWN, Warszawa 1983.
- [11] Wettlaufer J.S., Dash J.G., Topnienie poniżej zera. Świat Nauki, 4 (104), 2000
- [12] Setzer M. J., Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Schriftenreihe Daf Stb, 43, 1977
- [13] Neiss J., Numerische Simulation des Wärme – und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf, 1982
- [14] Wyrwał J., Podstawy fizyczne procesu zamarzania wody w porowatych materiałach budowlanych, Politechnika Opolska, Komisja Inżynierii Budowlanej Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach Roczniki Inżynierii Budowlanej – Zeszyt 6/2006
- [15] Tufejdić V., Građevinski materijali-II, ponašanje materijala u različitim sredinama, Naučna knjiga, Beograd, 1975

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] <http://www.gomar.org.pl/?styropian>, 39; przykłady – ilustracje materiałów porowatych: styropian.
- [2] <http://tobudowa.com/tag/beton/>; przykłady- ilustracje materiałów porowatych: beton komórkowy.