



POLITECHNIKA LUBELSKA
Wydział Inżynierii Środowiska

**Zastosowanie techniki TDR do badania procesów
przenoszenia masy i energii przez wybrane przegrody
budowlane**

Praca doktorska

mgr inż. Natalia Bezpalko

Promotor

Prof. dr hab. Henryk Sobczuk

Lublin 2009

SPIS TREŚCI

Spis treści	2
Wprowadzenie.....	5
Cele i zadania pracy	7
1. Pojęcia ogólne i ich definicje	9
1.1. Pojęcie modelu	9
1.2. Struktury niejednorodne.....	10
1.2.1. Definicja ciał porowatych	10
1.2.2. Porowatość ciał	13
1.2.3. Przepuszczalność materiału porowatego.....	13
1.2.4. Powierzchnia właściwa ciała porowatego.....	16
2. Badania teoretyczne dotyczące przenoszenia masy w materiałach budowlanych.....	17
2.1. Uwagi ogólne	17
2.2. Wilgotność powietrza.....	18
2.3. Formy występowania wilgoci w materiałach budowlanych	19
2.4. Przyczyny zawilgocenia przegród budowlanych	20
2.4.1. Wilgoć budowlana	21
2.4.2. Podciąganie wody gruntowej	22
2.4.3. Wilgoć sorpcyjna z opadów atmosferycznych.....	22
2.4.4. Skutki nadmiernego zawilgocenia przegród	25
2.5. Modele przenoszenia wilgoci.....	26
2.5.1. Modele fizyczne przenoszenia wilgoci	26
2.5.2. Pojęcie współczynnika dyfuzji wilgoci.....	29
2.5.3. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w materiałach budowlanych.....	35
2.6. Wnioski	38
3. Badania teoretyczne dotyczące przenoszenia energii w materiałach budowlanych ...	39
3.1. Ruch ciepła przez przegrody budowlane	39

3.1.1. Promieniowanie ciepłe	39
3.1.2. Konwekcyjna wymiana ciepła	42
3.1.3. Złożona wymiana ciepła	43
3.1.4. Przewodzenie ciepła.....	44
3.2. Współczynnik przewodzenia ciepła.....	45
3.3. Modele złożonego przenoszenia ciepła i wilgoci.....	47
3.4. Zawartość soli w materiałach budowlanych	62
3.5. Modele komputerowe przenoszenia masy i energii w ośrodku porowatym	66
3.6. Wnioski	67
4. Metodyka badań, materiały i urządzenia	69
4.1. Materiały budowlane.....	69
4.2. Opis technik pomiarowych stosowanych do badań cieplno- wilgotnościowych w porowatych materiałach budowlanych.....	73
4.3. Metodyka badań	82
4.3. Zestaw komór klimatycznych	87
4.4. Opracowanie danych eksperymentalnych.....	93
5. Badania eksperymentalne przenoszenia energii i masy	94
5.1. Analiza mikroskopowa struktury badanych materiałów budowlanych	94
5.2. Przeprowadzone badania laboratoryjne	98
5.2.1. Badanie procesu desorpcji wody.....	99
5.2.1.1. Desorpcja wody w warunkach konwekcji naturalnej	101
5.2.1.2. Zmiany oporu elektrycznego ośrodka w procesie desorpcji	103
5.2.1.3. Wpływ zmian wilgotności na zmiany oporu elektrycznego ośrodka.....	105
5.2.2. Badanie procesu podciągania kapilarnego w materiałach budowlanych....	107
5.2.2.1. Podciąganie kapilarne w wybranych materiałach budowlanych	108
5.2.2.2. Opór elektryczny ośrodka w procesie podciągania kapilarnego.....	112
5.2.2.3. Wpływ zmian wilgotności na opór elektryczny w procesie podciągania kapilarnego	114
5.2.3. Badania właściwości cieplnych wybranych materiałów budowlanych	116
5.2.3.1. Wykorzystanie metody TDR do obserwacji zmian temperaturowych w przegrodzie	116

5.2.3.2. Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów budowlanych.....	121
5.2.3.3. Wyznaczanie ciepła właściwego.....	131
5.2.4. Badanie zjawiska termodyfuzji.....	134
5.2.5. Wyznaczanie współczynnika dyfuzji wilgoci w wybranych materiałach budowlanych.....	136
5.3. Wnioski z badań eksperymentalnych.....	144
6. Modelowanie komputerowe zjawisk przenoszenia energii i masy za pomocy programu wufi	149
Ogólne wnioski	171
Literatura	173

WPROWADZENIE

W celu utrzymania właściwych dla ludzi warunków zdrowotnych, należy wytworzyć warunki komfortu cieplnego i wilgotnościowego w pomieszczeniach obiektów mieszkalnych, administracyjnych, przemysłowych i innych.

Podstawowym zadaniem zewnętrznych przegród w budynkach jest oddzielenie mikroklimatu wewnątrz, o wymaganych dla człowieka określonych i mniej więcej stałych parametrach temperatury, wilgotności, szybkości ruchu powietrza itp., od zmiennego klimatu zewnętrznego. Przegrody powinny chronić pomieszczenia przed mrozami okresu zimowego, zbyt dużym nagrzewaniem się podczas letnich upałów, opadami i innymi czynnikami atmosferycznymi oraz przed przenikaniem hałasu.

Nowatorskie rozwiązania konstrukcyjne, architektoniczne, a w nich przeważnie lekkie ściany osłonowe, duże powierzchnie przeszklone, cienkie, wielowarstwowe przegrody, zastosowanie nowych materiałów budowlanych oraz powstające, coraz nowe technologie w budownictwie stwarzają wiele nowych problemów z zakresu ruchu ciepła i masy przez te przegrody. Różnorodność materiałów powoduje potrzebę badania ich zachowywania w różnych warunkach klimatycznych, ponieważ wykorzystanie takich materiałów w przegrodach zmienia cieplno-wilgotnościowy stan budowli, w stosunku do zwykle spotykanych wielkości.

Przy projektowaniu przegród budowlanych dąży się do zabezpieczenia ich przed możliwością trwałego zawilgocenia. Niemniej jednak zachodzące zjawiska zawilgocenia i procesy z nim związane powodują, że stan wilgotności tzw. ustabilizowanej – najkorzystniejszy z punktu widzenia warunków eksploatacji budynku – nie utrzymuje się trwale, a w przegrodach występuje okresowo zmienne zawilgocenie. Powodem tych zmian są głównie opady atmosferyczne oraz zróżnicowane warunki zewnętrzne i wewnętrzne w różnych porach roku. Wraz ze wzrostem zawartości wody w materiale wzrasta jego współczynnik przewodności cieplnej, a jednocześnie maleje trwałość. W materiałach pochodzenia organicznego wzrost zawilgocenia sprzyja korozji biologicznej.

Wiedza na temat migracji wody w przegrodach budowlanych nie jest gruntowna. Sytuacja ta jest pochodną trudności w opisie teoretycznym i metodyce pomiarów tego tak ważnego, z punktu widzenia praktyki budowlanej, procesu.

Dzisiaj bardzo ważnym problemem naukowym, związanym z wiedzą o przepływach masy i energii przez przegrody budowlane, jest potrzeba analizy teoretycznej omówionych procesów z wykorzystaniem zasad termodynamiki, teorii filtracji, dyfuzji i sorpcji.

Zwiększona zawartość wilgoci w przegrodzie wpływa na zużycie energii, a co za tym idzie, na emisję CO₂. Energooszczędność w budownictwie jest znaczącym czynnikiem ograniczającym emisję CO₂, a państwa Unii Europejskiej zobowiązały się do 2020 r. zmniejszyć zużycie energii w budynkach o 15-30 %.

Oprócz problemów globalnych, zawilgocenie przegród powoduje i problemy o charakterze miejscowym, na przykład pogorszenie warunków komfortu w pomieszczeniach. Rozwój pleśni i grzybów na ścianach wewnętrznych pomieszczeń powoduje powstawanie różnych chorób u ludzi – chodzi przede wszystkim o choroby alergiczne. W mieszkaniach z wilgotnością podwyższoną ryzyko uczuleń u ludzi wzrasta o 40-50 % w stosunku do budynków suchych.

Wilgoć w przegrodach sprzyja przedwczesnemu starzeniu elementów konstrukcyjnych i termoizolacyjnych. Materiały izolacyjne muszą mieć okres eksploatacji efektywnej nie mniejszy niż 25 lat.

Omówione nierozwiązane zagadnienia mają wielkie znaczenie zarówno dla Polski, jak i dla Ukrainy i wielu innych państw, gdzie pytania o energooszczędność, zwiększenie wymagań dla izolacyjności cieplnej przegród, a także i problemy ekologiczne nabywają dziś wielkiego znaczenia. Rozwój budownictwa, powstawanie dużej ilości nowoczesnych energooszczędnych budowli, praca wielu naukowców nad projektami „domów pasywnych”, coraz nowe materiały budowlane i izolacyjne zmuszają naukę do stałego działania w kierunku opracowania i systematyzacji najważniejszych właściwości materiałów budowlanych, tworzenie programów ułatwiających i umożliwiających efektywne wykonanie obliczeń.

CELE I ZADANIA PRACY

Celem pracy jest zastosowanie techniki TDR do badania procesów przenoszenia masy i energii w ośrodkach porowatych na przykładzie wybranych materiałów budowlanych oraz symulacja sprzężonych zjawisk ciepłno-wilgotnościowych za pomocą przyjętego modelu matematycznego.

Oczekuje się, że modelowe badania, dotyczące wymiany masy i energii w ośrodku porowatym, pozwolą:

- w aspekcie poznawczym, lepiej zrozumieć i wyjaśnić zjawiska fizyczne zachodzące w ośrodku oraz określić wpływ poszczególnych składników ośrodka na te zjawiska;
- w aspekcie aplikacyjnym, wyznaczyć wiele istotnych trudno mierzalnych cech ośrodka (np. wilgotność, zasolenie, przewodność cieplną) z innych łatwo mierzalnych właściwości i wielkości fizycznych ośrodka porowatego;
- w aspekcie doradczym, za pomocy zaprezentowanego oprogramowania modelować przebieg niestacjonarnych procesów ciepłno-wilgotnościowych w wybranych przegrodach budowlanych.

Aby osiągnąć zasadniczy cel pracy, podjęto następujące cele szczegółowe:

- znalezienie i wyjaśnienie związku pomiędzy podstawowymi wielkościami fizycznymi materiału budowlanego tj. przenikalnością dielektryczną, gęstością i temperaturą a prędkością rozprzestrzeniania się fal elektromagnetycznych w ośrodku metodą TDR (techniki reflektometrii czasowej) w celu wykorzystania jej do oceny właściwości cieplnych i wilgotnościowych materiałów budowlanych;
- zaprojektowanie i budowa zestawu pomiarowego do oceny przepływu ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych;
- znalezienie i wyjaśnienie związku pomiędzy rodzajem materiału budowlanego a jego oporem cieplnym;
- znalezienie związku pomiędzy oporem elektrycznym różnych materiałów budowlanych a stanem ich zawilgocenia;
- badanie przepływu wilgoci na skutek zjawiska termodyfuzji w wybranym materiale budowlanym;

- badanie właściwości cieplnych wybranych materiałów budowlanych (ciepła właściwego, współczynnika przewodzenia ciepła);
- znalezienie związku pomiędzy współczynnikiem dyfuzji wilgoci a zawartością wilgoci w wybranych materiałach budowlanych;
- weryfikacja wyników otrzymanych metodą pomiarową TDR za pomocą przyjętego programu komputerowego.

1. POJĘCIA OGÓLNE I ICH DEFINICJE

1.1. Pojęcie modelu

Słownik fizyczny podaje następującą definicję modelu: "Pod pojęciem modelu rozumiemy zespół założeń upraszczających opis danego obiektu fizycznego, procesu lub zjawiska, ujmującego najważniejsze własności obiektu badań i przedstawiający go w ten sposób, że pewien obiekt, proces lub zjawisko, które na ogół w rzeczywistości nie istnieje, ma cechy dostatecznie zbliżone do rzeczywistego obiektu badań..." [87, 112].

Bardziej ogólne sformułowanie pojęcia modelu podaje [34] jako: "...odwzorowanie rzeczywistości fizycznej w matematyczną strukturę formalną lub kontrolowany przez człowieka układ fizyczny pozwalający ją symulować...". A zatem możemy wyróżnić dwa rodzaje modeli: fizyczne i matematyczne.

Modele fizyczne [93] są to układy zawierające elementy materialne, które umożliwiają imitowanie określonych procesów fizycznych (np. kapilary do modelowania przepływu wody w ośrodku porowatym). Ich obserwacja i analiza pozwalają wyciągnąć wnioski o właściwościach procesów i ich przebiegu.

Modelem matematycznym nazywamy układy związków matematycznych (równań różniczkowych, funkcji) między zmiennymi przypisanymi do danych cech materii (zmienne dynamiczne), współrzędnymi przestrzennymi, czasem i parametrami układu.

Matematyczny opis dowolnego zjawiska fizycznego w przestrzeni z reguły obejmuje równanie różniczkowe cząstkowe oraz tzw. warunki jednoznaczności obejmujące warunki początkowe, warunki brzegowe; warunki zachodzące na granicy układu, charakterystyki lub zbiór wartości opisujących właściwości fizyczne rozpatrywanego układu oraz własności geometryczne układu, w którym zachodzi badane zjawisko [108, 116]. Tak, więc rozwiązanie układu równań, które wiąże ze sobą wiele zmiennych pozwala wyznaczyć jedną z tych wielkości jako funkcję pozostałych:

$$\psi = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1.1)$$

Zmienne niezależne $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ zawarte są w warunkach jednoznaczności, które to ściśle określają przebieg rozpatrywanego zjawiska.

Jednak rzeczywiste procesy fizyczne są zwykle skomplikowane i dlatego często trzeba stosować wiele uproszczeń tak, aby możliwe było rozwiązanie układu równań opisujących rozpatrywany przypadek [6, 20, 122, 135, 161].

Celem symulacji komputerowej jest odtworzenie przebiegu badanego procesu na podstawie jego modelu matematycznego, za pomocą komputera, i zbadanie wpływu otoczenia (sygnały wejściowe, czyli pobudzenia) i wewnętrznych właściwości obiektu (parametry procesu) na charakterystyki obiektu [40, 46, 112, 151].

Główne zalety symulacji komputerowej w porównaniu do innych metod analizy procesu są [36, 116, 176]:

- „elastyczność” modelu, rozumiana jako łatwość wprowadzania zmian w modelu symulowanego procesu, ponadto łatwość uzupełniania modelu o nowe zjawiska;
- łatwość wprowadzania różnego rodzaju wymuszeń i zakłóceń, w szczególności losowych; to ostatnie jest trudne do odtworzenia w laboratorium, gdy poddaje się badaniom model materialny; możliwość wprowadzania pomierzonych i zarejestrowanych w plikach dyskowych pobudzeń pochodzących od istniejących układów;
- łatwość wprowadzania wymuszeń i zakłóceń ekstremalnych;
- stosunkowo niewielki koszt i czas przygotowania symulacji: najdroższym działaniem może być poszukiwanie wartości współczynników potrzebnych w modelu matematycznym;
- wiarygodność wyników symulacji – szczególnie w tych przypadkach, gdy możemy porównać otrzymane wyniki symulacji z danymi otrzymanymi z pomiarów na rzeczywistym obiekcie, przynajmniej dla jednego zestawu wartości parametrów.

Mając na uwadze powyższe definicje modelu, jak i aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie, zaprezentowano poniżej opis wymiany masy i energii w ośrodku porowatym, zaprojektowano i wykonano stanowisko eksperymentalne dla otrzymania parametrów modelu matematycznego oraz przeprowadzono modelowanie komputerowe w przegrodach budowlanych dla weryfikacji przyjętej metody badawczej tak prosto, dokładnie i w sposób tak pełny, jak tylko było to możliwe na tym etapie rozwiązania.

1.2. Struktury niejednorodne

1.2.1. Definicja ciał porowatych

Ciała stałe, które mają dużą liczbę pustych przestrzeni o wielkości względnie małej w porównaniu z wymiarem charakterystycznym samego ciała nazywamy środowiskami porowatymi. Przestrzenie takie, niezależnie od ich kształtu, nazywamy porami. Wiele ciał

stałych pochodzenia naturalnego i sztucznego ma strukturę porowatą: gleba, drewno, skóra, kość, materiały budowlane, ceramika, metale otrzymane metodą metalurgii proszków itd. Nawet takie proste wyliczenie pokazuje ogromną rolę, którą pełnią ośrodki porowate w życiu ludzi. Specyficzną cechą ciał porowatych jest ich zdolność wchłaniania cieczy i jej ruch wskutek działania sił zewnętrznych i wewnętrznych [2, 148, 164].

Wielkość, rodzaj i forma porów mają podstawowy wpływ na stan związania wody wewnątrz porów, jak również na mechanizmy transportu występujące w nich.

Przestrzenie puste w ciele porowatym noszą nazwę przestrzeni porowych (kapilarnych), a przestrzeń zajęta przez ciało stałe nazywana jest szkieletem lub nośnikiem. W zależności od stopnia połączenia kapilar między sobą oraz otoczeniem rozróżnia się kapilary przelotowe, nieprzelotowe (ślepe) i zamknięte. Poszczególne przestrzenie porowe mogą być ze sobą połączone, stanowiąc zespół naczyń połączonych. Mogą to być także oddzielne przestrzenie, wśród których będą także pory zamknięte.

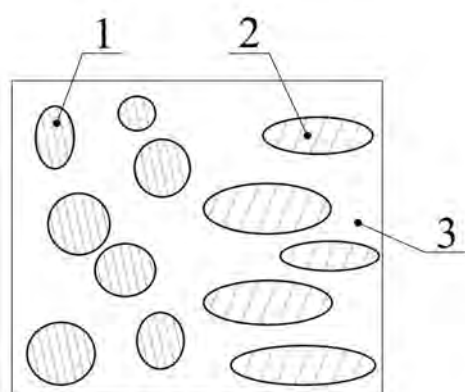
Pory połączone można zróżnicować według ich ukierunkowania: pory ukierunkowane (anizotropowe) oraz nie ukierunkowane (izotropowe). Przykłady izotropowych i anizotropowych dwufazowych systemów pokazano na rys. 1.1.

Pory mogą się różnić rozmiarami jak i kształtem, mogą być np. cylindryczne, kuliste, szczelinowe itp. W jednym ośrodku występują zwykle pory o zróżnicowanych kształtach. Przyjmując cylindryczny kształt porów mówimy o ich średnicy a w przypadku porów szczelinowych o ich szerokości. Zgodnie z porozumieniem IUPAC (Międzynarodowa Unia Chemii Teoretycznej i Stosowanej) pory dzielimy według ich promieni efektywnych r_{ef} na następujące grupy [20]:

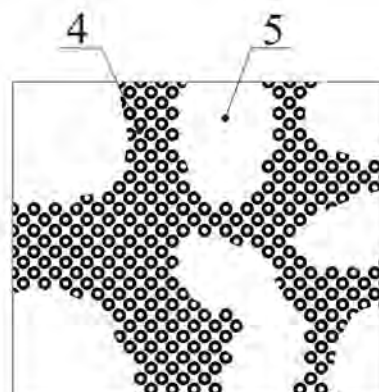
- mikropory – $r_{ef} \leq 2 \text{ nm}$;
- mezopory – $2 \text{ nm} < r_{ef} \leq 50 \text{ nm}$;
- makropory – $r_{ef} > 50 \text{ nm}$.

Warto podkreślić, że porami decydującymi o właściwościach sorpcyjnych ośrodka są mikro- i mezopory, które w materiałach o silnie rozwiniętej powierzchni wewnętrznej zajmują dużą część ich objętości. W niektórych materiałach ziarnistych w makroporach zawarta jest przeważająca część przestrzeni porowej. W przybliżeniu można powiedzieć, że do tej grupy materiałów należą praktycznie wszystkie ciała porowate, których powierzchnia właściwa nie przekracza $10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$. W przypadku ceramicznych materiałów budowlanych obecność odpowiednio dużej liczby makroporów jest warunkiem koniecznym, aby dany materiał był mrozoodpornym.

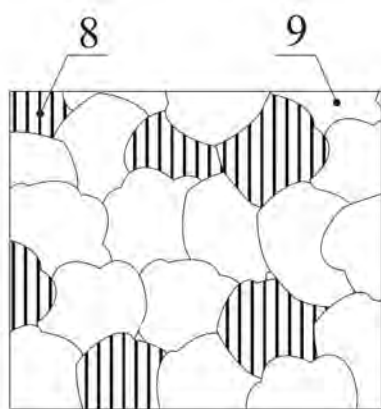
Przepływ cieczy i gazów możliwy jest tylko w porach otwartych. W porach takich przepływowi płynu może towarzyszyć ustalona i nieustalona wymiana ciepła, filtracja, dyfuzja, sorpcja oraz reakcje chemiczne.



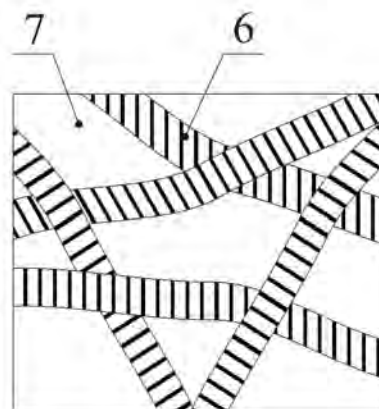
a)



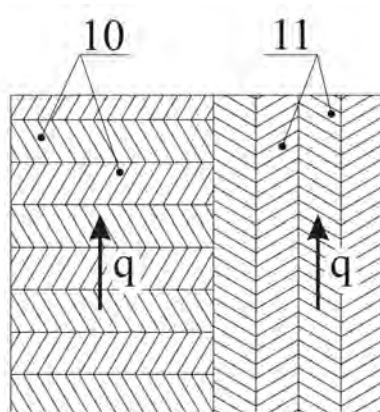
b)



c)



d)



e)

Rys. 1.1. Struktury izotropowych systemów dwufazowych:

- a) 1 – izolowane izomerowe wtrącenia;
 2 – anizotropowo ukierunkowane wtrącenia w składniku ciągłym;
 b) systemy ziarniste, 4 – szkielet ciągły, 5 – pory; c) systemy włókniste;
 6 – włókna, 7 – pory; d) systemy statystycznie niejednorodne;
 8,9 – komponenty o podobnych wymiarach; e) systemy warstwowe;
 10,11 – komponenty, prostopadłe i równoległe do przepływu q [148]

1.2.2. Porowatość ciał

Porowatością nazywa się wielkość bezwymiarową, która określa względną objętość porów w stosunku do objętości całej próbki materiału. Porowatość zwykle nie zależy od wymiarów cząsteczek, z których składa się środowisko porowate [2, 164]. Inaczej mówiąc – dwa dowolne ciała porowate podobne geometrycznie na poziomie mikro, które różnią się tylko rozmiarem cząsteczek, mają jednakową porowatość. Spowodowane jest to tym, że w materiale gruboziarnistym pory są większe, ale ich ilość w jednostce objętości mniejsza i efekty takie kompensują się w stosunku do materiału drobnoziarnistego.

Porowatością całkowitą ε nazywa się objętość porów zawartą w jednostce objętości ciała porowatego.

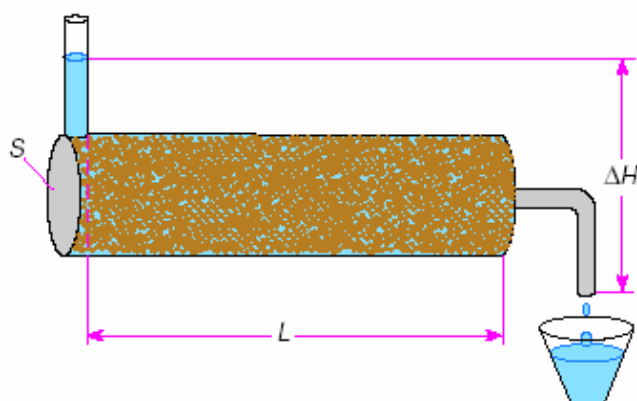
Porowatość rzeczywista ε_{rz} jest to stosunek objętości porów otwartych do całkowitej objętości ciała porowatego. W ciałach o małej zawartości porowatość całkowita i rzeczywista są zbliżone lub nawet takie same. W takich materiałach porowatych, jak szkło piankowe, piankowe tworzywa sztuczne, niektóre spieki ceramiczno-metalowe i materiały węglpochodne większą część przestrzeni porowej zajmują pory zamknięte.

Porowatość zamknięta ε_z jest to różnica porowatości całkowitej i rzeczywistej.

Ważną cechą charakterystyczną materiałów ziarnistych jest porowatość międzyziarnowa ε_m , którą definiuje się jako stosunek objętości międzyziarnowej do całkowitej objętości bryły materiału.

1.2.3. Przepuszczalność materiału porowatego

Bardzo istotną właściwością jest przepuszczalność materiału porowatego – jest to jego zdolność do przepuszczania, pod wpływem gradientu ciśnienia, cieczy i gazów przez przestrzeń porowatą [160, 164]. Jej definicja związana jest z podstawowym zagadnieniem ruchu cieczy w środowisku porowatym, który w uproszczeniu opisuje się wzorem Darcy'ego (1856).



Rys. 1.2. Schemat eksperymentu Darcy'ego (1856) [145]

Darcy przepuszczał wodę (rys. 1.2) przez rurki z piaskiem wymuszając przepływ różnicą poziomów i mierzył przepływ wody Q , to znaczy jej ilość przenikającą przez piasek w jednostce czasu. Okazało się, że przepływ jest proporcjonalny do różnicy poziomów ΔH i do pola przekroju rurki S i odwrotnie proporcjonalny do jej długości L :

$$Q \approx \frac{S\Delta H}{L} \quad (1.2)$$

Jeżeli powtórzyć badania Darcy'ego z cieczami o różnych gęstościach ρ i lepkościach μ , to przekonamy się, że przepływ proporcjonalny jest do gęstości cieczy i odwrotnie proporcjonalny jej lepkości. Wtedy zależność (1.2) przybierze postać:

$$Q = \frac{k\rho g\Delta HS}{L\mu} \quad (1.3)$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie, k – współczynnik proporcjonalności, który jest charakterystyką środowiska porowatego i nie zależy od rozmiarów próbek i właściwości cieczy. Wielkość k nazywa się przepuszczalnością środowiska porowatego, a wzór (1.3) przedstawia sobą współczesny zapis zagadnienia Darcy'ego w najprostszej postaci. Porównyując wymiary dwóch części równania (1.3) widać, że przepuszczalność ma wymiar powierzchni, mianowicie mierzy się w $[m^2]$. Wymiar przepuszczalności wskazuje na to, iż ta wielkość jest tylko właściwością geometryczną środowiska, zależną od jej struktury.

Dla środowisk o strukturze geometrycznie zbliżonej, przepuszczalność jest proporcjonalna kwadratowi charakterystycznego wymiaru struktury. Dlatego, w przeciwieństwie do porowatości, przepuszczalność jest charakterystyką zmienną.

Zależność (1.3) pokazuje, że intensywność strumienia w środowisku porowatym charakteryzuje się układem $U = \frac{Q}{S}$, czyli przepływem w jednostce pola przekroju próbki albo szybkością filtracji. Ta wielkość, mając wymiar szybkości, przedstawia sobą gęstość strumienia, liczonego na całe pole przekroju próbki (nie tylko na powierzchni przekroju porów). Szybkość faktyczna cieczy jest średnio w 1/m razy większą.

W eksperymencie, pokazanym na rys.1.2, wielkość $\rho g \Delta H$ opisuje spadek ciśnienia Δp na długości próbki L , więc zagadnienie Darcy'ego można zapisać w postaci

$$U = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (1.4)$$

Szybkość filtracji jest zatem ukierunkowana w stronę spadającego ciśnienia, jest proporcjonalna do gradientu ciśnienia i odwrotnie proporcjonalna do lepkości cieczy i proporcjonalna do przepuszczalności środowiska. Wzór (1.4) wykorzystuje się dla określenia pozasystemowej jednostki przenikalności 1 Darcy (1 D) – tej przenikalności, dla której gradient ciśnienia jednej atmosfery fizycznej (760 mm Hg) powoduje szybkość filtracji 1 cm/s przy lepkości cieczy 1 MPa·s. Łatwo można stwierdzić, że $1 \text{ D} = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Jeśli ograniczamy się tylko do wody, której lepkość wynosi odpowiednio $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ i gęstość $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, to zamiast ciśnienia często korzysta się z naporu $H = p / \rho g$, mierzonego w metrach, a przepuszczalność środowiska dla strumienia filtracyjnego charakteryzuje się współczynnikiem filtracji,

$$C = \frac{\rho k g}{\mu}, \quad U = C \frac{\Delta H}{L} \quad (1.5)$$

który będzie miał wymiar szybkości. Jest to szybkość, z którą woda wypływa z pionowej nasyconej wodą próbki pod działaniem siły ciężkości.

Zagadnienie Darcy'ego i prawo zachowania masy (równanie ciągłości) razem tworzą układ równań do opisu rozkładu ciśnień i pola szybkości filtracji. Równanie dla ciśnienia (albo naporu) ma postać równania różniczkowego cząstkowego, podobnego, dla materiału jednorodnego, do równania Laplace'a, opisującego rozkład potencjału pola elektrycznego [95].

Fakt ten nie jest przypadkowy, dlatego że istnieje analogia matematyczna pomiędzy rozkładem prądu elektrycznego a rozkładem szybkości filtracji [105]. W analogii tej prąd odpowiada szybkości filtracji, potencjał elektryczny – ciśnieniu albo naporowi, przewodnictwo – przepuszczalności, a zagadnienie Ohma – zagadnieniu Darcy'ego. Przed rozpowszechnieniem komputerów ta analogia była szeroko stosowana do rozwiązywania zadań z teorii filtracji metodą elektromodelowania.

Przepuszczalność gazów i powietrza jest jednym z kryteriów oceny właściwości izolacyjnych i zdolności przepuszczania płynów w przypadku materiałów budowlanych i izolacji cieplnych [24, 131, 132, 175].

Najciekawsze zjawiska mają miejsce podczas ruchu w środowisku porowatym kilku faz, na przykład, wody i powietrza [20]. Określenie granic międzyfazowych wymaga uwzględnienia sił kapilarnych. Rola względna sił kapilarnych w stosunku do siły ciężkości i sił oporu lepkiego określana jest za pomocą wielkości, które mają nazwę liczb kapilarnych

$$C_{aK} = \frac{\rho g d^2}{\sigma}, \quad C_a = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (1.6)$$

gdzie σ - napięcie międzyfazowe rzędu 10 mN/m.

W każdym elemencie środowiska porowatego równowaga faz określona jest przez siły kapilarne oraz zewnętrzne. W naszym przypadku środowisko porowate jest zwykle hydrofilnym, dlatego cieczą zwilżającą jest woda w obecności powietrza. Współistnienie dwóch faz charakteryzuje się nasyceniem fazowym s_i , $i=1,2$. Nasyceniem nazywa się udział przestrzeni porowatej, który zajmuje dana faza tak, że $s_1 + s_2 = 1$. Gdy nasycenie fazy zwilżającej jest małe, poniżej pewnej wartości krytycznej s_k , faza zwilżająca rozpada się na odrębne krople, które są zamknięte siłami kapilarnymi i nie mają możliwości poruszać się pod działaniem zwykłych spadków ciśnienia. Gdy nasycenie jest większe niż krytyczne, pory w materiale wypełnione wodą tworzą połączoną sieć, w której możliwy jest przepływ. Zmiana charakteru przepływu, która odbywa się ze zmianą stosunku między ilością napełnionych i nienapełnionych porów, jest zjawiskiem ogólnym dla procesów przewodnictwa w wielu izotropowych systemach fizycznych. Znajomość tych zjawisk krytycznych doprowadziła do powstania nowej dziedziny fizyki teoretycznej, która otrzymała nazwę teorii perkolacji [148]. Ciekawym jest, że dla samej teorii przyjęto nazwę z teorii ruchu przez środowiska porowate, a ta ostatnia wykorzystuje jej nowe podejścia i wyniki.

1.2.4. Powierzchnia właściwa ciała porowatego

Znane są dwie definicje powierzchni właściwej ciała porowatego [38]. Jedna z nich odnosi całkowitą powierzchnię ciała do jego objętości, druga zaś – powierzchnię tę odnosi do masy ciała porowatego.

Powierzchnia właściwa w objętości ciała złożonego z oddzielnych ziaren o kształcie walca, kuli i sześcianu równa jest odpowiednio

$$a_w = \frac{2}{r}, \quad a_k = \frac{3}{r}, \quad a_s = \frac{6}{r} \quad (1.7)$$

gdzie r – promień podstawy walca, promień kuli, krawędzi sześcianu.

Parametry charakteryzujące strukturę ciał porowatych (porowatość, przepuszczalność, powierzchnia właściwa) są ze sobą wzajemnie powiązane. Jednakże analityczne określenie tych powiązań jest możliwe tylko dla najprostszych układów modelowych, które znacznie różnią się od struktur rzeczywistych ciał porowatych. Z tego powodu, pomimo że ostatnio osiągnięto sukcesy w matematycznym modelowaniu materiałów porowatych, doświadczalne wyznaczenie porowatości, przepuszczalności i powierzchni właściwej ciał porowatych jest nadal podstawową metodą ich określania [123, 149].

2. BADANIA TEORETYCZNE DOTYCZĄCE PRZENOSZENIA MASY W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

2.1. Uwagi ogólne

Przez stan wilgotnościowy przegród budowlanych rozumie się całokształt przebiegu procesów związanych z zawilgoceniem i wysychaniem materiałów w przegrodach budowlanych.

Zawilgocenie przegród jest zjawiskiem niekorzystnym ze względów higieniczno-sanitarnych, niszczenia materiałów przegrody wskutek korozji chemicznej lub biologicznej oraz zwiększonych strat ciepła. Najniekorzystniejsze warunki występują w okresie zimy i stąd rozpatrywanie wszystkich procesów związanych z zawilgoceniem materiałów budowlanych, jak i strat ciepła, przeprowadza się głównie dla tego okresu.

Materiały budowlane w większości mają budowę kapilarno-porowatą, umożliwiającą pochłanianie wody, która może wnikać w głąb materiału wypełniając całkowicie lub tylko częściowo jego pory. Tylko niektóre materiały praktycznie są nienasiąkliwe i nie zmieniają właściwości pod wpływem wody, o ile wyłączymy z rozważań korozję chemiczną.

Wraz ze wzrostem zawartości wody w materiale rośnie jego współczynnik przewodności cieplnej, a jednocześnie maleje trwałość. W materiałach pochodzenia mineralnego wzrost objętości przy przechodzeniu wody w lód powoduje uszkodzenie struktury wilgotnych materiałów porowatych, a zwłaszcza przy wielokrotnym powtarzaniu cykli zamarzania i odtajania. Również zmiany objętości towarzyszące zmianie zawartości wody (skurcz lub pęcznienie) w przypadku wielokrotnego zawilgocenia i wysychania materiałów prowadzi do ich stopniowego niszczenia.

Zjawiska transportu wody zachodzące w porowatych materiałach budowlanych składają się na bardzo skomplikowany proces, gdyż oprócz przepływów molekularnych może występować w ich porach również dyfuzja powierzchniowa, transport kapilarny i inne rodzaje transportu. Równocześnie mogą zachodzić procesy sorpcji lub desorpcji, przemiany fazowe, a w warunkach nierównowagi cieplnej zjawiska termodyfuzji. To, czy i z jaką intensywnością będą się ujawniać poszczególne zjawiska, zależy od struktury porowatości danego materiału i jego właściwości cieplno-wilgotnościowych [11, 32, 44, 57, 129, 136].

2.2. Wilgotność powietrza

Powietrze atmosferyczne można traktować jako mieszaninę suchego powietrza i pary wodnej. Zawarta w powietrzu para wodna wywiera pewne ciśnienie cząstkowe, które wraz z ciśnieniem cząstkowym suchego powietrza składa się na pełne ciśnienie atmosferyczne powietrza [16, 23, 60, 175]. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej, podobnie jak zawartość pary wodnej w powietrzu, może mieć dla danej temperatury wartość maksymalną i stan taki określa się pojęciem pary wodnej nasyconej. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej zależy od temperatury powietrza – ze wzrostem temperatury zwiększa się, ze spadkiem temperatury maleje. Maksymalna ilość, w gramach, pary wodnej nasyconej w 1 m³ powietrza w danej temperaturze lub maksymalne ciśnienie cząstkowe, czyli ciśnienie pary nasyconej, nazywa się wilgotnością absolutną.

W normalnych warunkach powietrze nie jest całkowicie nasycone parą wodną i dlatego do określenia jego stopnia zawilgocenia używa się pojęć: rzeczywiste ciśnienie pary wodnej, wilgotność bezwzględna oraz wilgotność względna.

Rzeczywiste ciśnienie pary wodnej jest to ciśnienie cząstkowe pary wodnej zawartej w powietrzu nienasyconym, przy określonej jego temperaturze i ciśnieniu atmosferycznym. Miarą zawartości pary wodnej w powietrzu jest wilgotność bezwzględna, wyrażona jako masa pary wodnej w gramach, przypadająca na 1 m³ lub na 1 kg suchego powietrza. Miarą nasycenia powietrza wilgocią jest wilgotność względna φ wyrażona procentowym stosunkiem ciśnienia cząstkowego (rzeczywistego) pary wodnej zawartej w powietrzu p do ciśnienia pary wodnej nasyconej p_s , przy tej samej temperaturze i ciśnieniu powietrza

$$\varphi = \frac{p}{p_s} 100 \quad (2.1)$$

Rzeczywiste ciśnienie pary wodnej obliczają za wzorem:

$$p_i = \frac{p_{si} \varphi_i}{100}, \quad p_e = \frac{p_{se} \varphi_e}{100} \quad (2.2)$$

gdzie p_i , p_e – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu i na zewnątrz budynku; φ_i , φ_e – wilgotności względne powietrza: wewnątrz i na zewnątrz; p_{si} , p_{se} – ciśnienie pary wodnej nasyconej odpowiadające temperaturom wewnątrz i na zewnątrz budynku.

Ze wzrostem temperatury, przy stałej zawartości wilgoci w powietrzu, wilgotność względna zmniejsza się. Natomiast przy ochładzaniu, przy stałej zawartości wilgoci, wilgotność względna zwiększa się, aż w pewnej temperaturze osiągnie 100 %, czyli powietrze staje się całkowicie nasycone parą wodną. Temperaturę stanu nasycenia nazywa się temperaturą punktu rosy. Dalsze obniżanie temperatury spowoduje nadmiar wilgoci w powietrzu i para wodna będzie się skraplała.

Wilgotność powietrza w pomieszczeniach jest zazwyczaj większa od wilgotności powietrza zewnętrznego. Usuwana ona w wyniku wentylowania pomieszczeń. W okresach zwiększonej wilgotności względnej powietrza pewna ilość pary wodnej jest pochłaniana przez materiały przegród, wskutek czego zwiększa się ich zawilgocenie. W warstwie powierzchniowej od strony pomieszczenia zachodzi nie tylko sorpcja lecz również desorpcja, tzn. para wodna jest wchłaniana bądź oddawana z powrotem do powietrza przy wzroście lub obniżeniu wilgotności względnej tego powietrza. Ilość pary wodnej biorącej udział w tej wymianie zależy od właściwości materiałów zastosowanych do wykończenia powierzchni, lecz w ogólnym bilansie jest to ilość raczej mała.

Z powodu występowania prądów konwekcyjnych powietrze ma w przybliżeniu jednakową wilgotność w całej objętości pomieszczenia. Para wodna przemieszcza się w powietrzu w kierunku powierzchni przegród wskutek dyfuzji i tutaj jest pochłaniana lub przenika przez przegrodę na zewnątrz. W wyniku tego w warstwie przylegającej do tej powierzchni maleje stężenie pary, a wskutek różnicy stężenia występuje zjawisko dyfuzji. Dyfuzja pary wodnej w powietrzu przebiega z określoną prędkością zależną od współczynnika dyfuzji, który nie jest wielkością stałą, lecz zależy od temperatury i ciśnienia atmosferycznego.

2.3. Formy występowania wilgoci w materiałach budowlanych

Wilgoć występuje w materiałach budowlanych w kilku postaciach, jak: woda związana chemicznie, wilgoć sorpcyjna, swobodna para wodna, wolna woda [11, 52, 69].

Klasyfikacja form występowania wilgoci podano w tab. 2.1.

Tab. 2.1. Klasyfikacja rodzajów wody w porowatych materiałach budowlanych

Lp	Woda	Własności
1	Związana chemicznie (hydratacyjna)	wysoka energia wiązania, bezpośredni związek z wytrzymałością i odkształcalnością, usunięcie wymaga temperatury powyżej 550° C
2	Półzwiązana – adsorpcyjna	nie rozpuszcza elektrolitów, niska przewodność elektryczna, zwiększona gęstość (1,3–2,4 g/cm ³) i lepkość, stała dielektryczna 2,2; zamarza w temperaturze poniżej 0° C, w warstwie molekularnej nie zamarza nawet poniżej – 78° C, częściowe własności ciała sztywno–sprężystego
3	Półzwiązana – kapilarna	tak jak woda swobodna, występują siły kapilarne
4	Wolna	wypełnia większe pustki, zamarza, bierze udział w dalszej hydratacji, łatwo ulatnia się w temperaturze poniżej 110° C

Wodę związaną chemicznie można oddzielić tylko przez prażenie w odpowiednio wysokich temperaturach lub w czasie reakcji chemicznych, stąd nie ma ona wpływu na

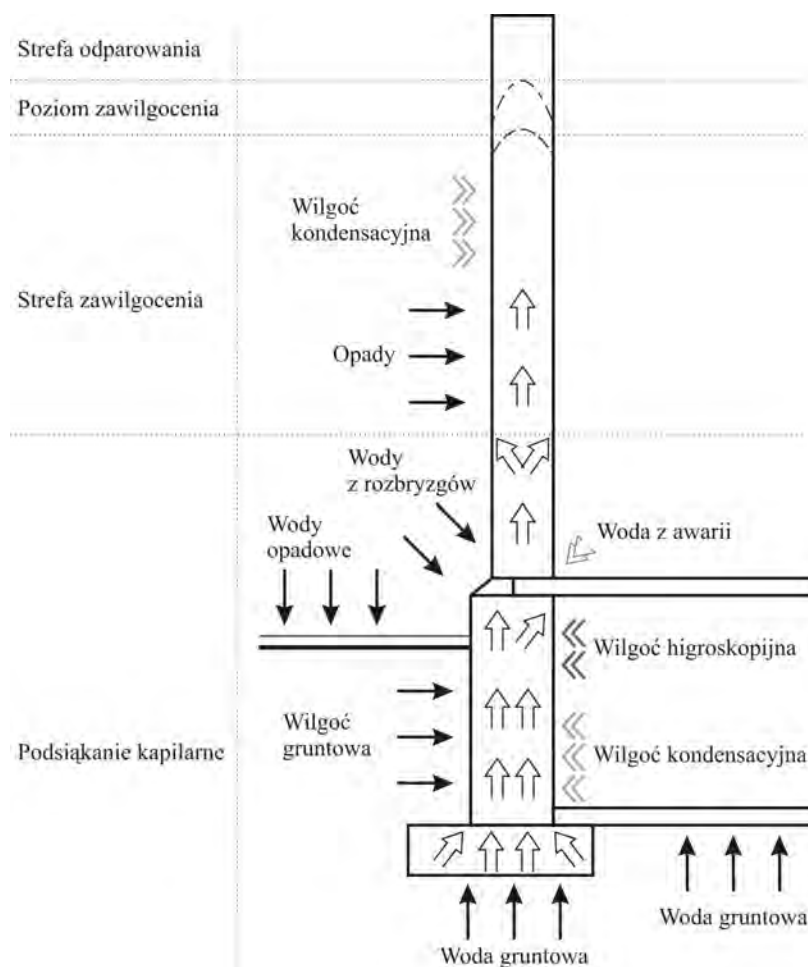
wilgotność materiału i przy rozważaniach stanu wilgotnościowego przegród może być pominięta.

Udział swobodnej pary wodnej w porach materiału jest minimalny w porównaniu do ogólnej zawartości wilgoci w materiale. Decydujące znaczenie ma woda występująca na ściankach lub wewnątrz porów i kapilar i związana z materiałem siłami van der Waalsa (wilgoć sorpcyjna) lub siłami kapilarnymi. Ostatnie dwa rodzaje wilgoci mogą przechodzić jeden w drugi, zależnie od warunków otoczenia.

W procesach transportu, np. przy wysychaniu elementu, bardzo rzadko mamy do czynienia z przemieszczającym się do wnętrza równomiernym frontem wysychania, objawiającym się całkowitym wyschnięciem powierzchni zewnętrznej i cofnięciem się powierzchni odparowywania w głąb elementu. W praktyce w odrębnie wysychającego ciała w dowolnej odległości od jego powierzchni mogą występować jednocześnie wszystkie trzy wymienione fazy, a przepisywane im mechanizmy transportu będą współistnieć, wykazując zmienną intensywność.

2.4. Przyczyny zawilgocenia przegród budowlanych

Przemieszczanie pary wodnej odbywa się przez dyfuzję, filtrację i ruch molekularny; przemieszczanie wody – wskutek podciągania kapilarnego, a także dyfuzji oraz filtracji wywołanej gradientem ciśnienia hydrostatycznego. Rozgraniczenie tych procesów jest trudne, ponieważ udział każdego z nich zależy od wielu czynników, na przykład od struktury materiału, rozwiązań konstrukcyjnych przegrody, warunków otoczenia, stopnia zawilgocenia itp. [11, 29, 32, 44, 57, 63, 69, 89, 129, 136]. Możliwe źródła zawilgocenia przegród pokazane na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Źródła zawilgocenia przegród budowlanych

2.4.1. Wilgoć budowlana

Wilgoć budowlana powstaje podczas wznoszenia nowych budynków w wyniku mokrych procesów technologicznych, jak: murowanie, betonowanie, tynkowanie, malowanie i in. Zaprawa murarska czy też mieszanka betonowa zawierają pewną ilość wody zarobowej, której tylko część potrzebna jest do chemicznego związania, a reszta z biegiem czasu wydyfundowuje na zewnątrz. Część materiałów budowlanych jest wbudowana w stanie dużego zawilgocenia, ponieważ od wyprodukowania ich mija zbyt krótki czas i z materiałów tych nie zdąży jeszcze całkowicie wydyfundować w sposób naturalny nadmiar wody użytej w procesach wytwarzania. Podobnie w transporcie i podczas składowania materiały mogą ulec zawilgoceniu i przed ich wbudowaniem nie zdążą wyschnąć.

Czas wysychania od wilgoci budowlanej zależy od konstrukcji przegród i warunków otoczenia, lecz najczęściej nie przekracza 2–3 lat. W przypadku zastosowania od strony

zewewnętrznej przegrody materiałów o dużym oporze dyfuzyjnym, czas wysychania z wilgoci budowlanej może się wydłużyć. W początkowym okresie eksploatacji budynków należy się liczyć ze zwiększoną przewodnością ciepła przez przegrody budowlane, a więc i ze zwiększonymi stratami ciepła z budynku.

2.4.2. Podciąganie wody gruntowej

Zawilgocenie murów piwnicznych i pierwszej kondygnacji (rzadko drugiej kondygnacji) w wyniku kapilarnego podciągania wody z gruntu powstaje przy braku izolacji przeciwwilgociowych (poziomej i pionowej), ich uszkodzeniu lub przy naturalnym zużyciu izolacji w czasie wieloletniej eksploatacji budynku.

Styczność ścian z gruntem o naturalnej wilgotności wystarcza dla rozpoczęcia procesu kapilarnego podciągania wody w wyższe partie ścian wykonanych z materiałów porowatych, jakimi są cegła, zaprawa czy beton. W ścianach wykonywanych z cegły pełnej wilgoć ta może wnieść się na wysokość nawet do 2,5 m od poziomu gruntu, przy czym na długości muru rozkład zawilgocenia może być bardzo zróżnicowany, zarówno pod względem wysokości, jak i stopnia zawilgocenia. Dość często woda kapilarna wznosi się na wysokość 0,5 do 1,5 m, a tylko miejscowo wyżej. Destrukcyjne działanie wilgoci, powodujące obniżenie wytrzymałości murów i izolacyjności termicznej oraz wytworzenie niekorzystnego mikroklimatu wewnątrz, jest już wyżej wspomniane.

2.4.3. Wilgoć sorpcyjna z opadów atmosferycznych

Podczas intensywnych opadów atmosferycznych deszczu i śniegu, szczególnie przy silnych wiatrach, po ścianach zewnętrznych spływają znaczne masy wody. Zdolność kapilarnego wnikania wody w porowate materiały budowlane powoduje, że w zależności od użytych materiałów, woda z opadów może wnikać do kilku, a nawet kilkunastu centymetrów w głąb przegrody.

Sorpcja wilgoci jest to proces pochłaniania wilgoci (pary wodnej) z powietrza otaczającego materiał o właściwościach hydrofilowych (zdolność przyłączania wody). Cząsteczki pary wodnej przylegają do powierzchni porów wskutek działania sił van der Waalsa (adsorpcja) oraz wnikają w ciało stałe (absorpcja). Ze względu na trudności w rozróżnianiu tych zjawisk, łączne ich działanie nazywa się sorpcją.

Wskutek sorpcyjności materiały wykazują zawsze określone zawilgocenie, zależne od wilgotności względnej otaczającego powietrza i temperatury. Przy niskiej wilgotności

względnej powietrza sorpcyjność jest przeważnie niewielka, natomiast wzrasta znacznie przy wilgotności powietrza powyżej 75 %. W zakresie temperatury oddziałującej na przegrody budowlane zawilgocenie sorpcyjne tylko w niewielkim stopniu zmienia się, dlatego wpływ temperatury najczęściej pomija się.

W procesie sorpcji pary wodnej na powierzchni porów początkowo wytwarza się błonka monomolekularna (grubośći równej średnicy molekuly wody), w dalszym procesie sorpcji powstaje warstwa polimolekularna, a przy wysokiej wilgotności względnej otaczającego powietrza może wystąpić kondensacja kapilarna.

Kondensująca się wilgoć znajduje się w stanie słabo związanym, co zaznacza się szybką migracją i wzrostem zawilgocenia materiału. Zależność między wilgotnością względną powietrza i zawilgoceniem materiału w danej temperaturze przedstawia się graficznie za pomocą izoterm sorpcji.

Przy zmianie wilgotności względnej powietrza otaczającego materiał, po pewnym czasie powietrze w porach uzyskuje tą samą wilgotność. Stan ten nazywamy równowagą sorpcyjną. Przy wilgotności względnej powietrza wynoszącej 100 % wzrost zawilgocenia materiału następuje z innych przyczyn (np. na skutek kapilarnego podciągania wody). Zawilgocenie takie nazywa się ponadsorpcyjne.

W pracach [35, 36, 77] fazowy spadek ciśnienia i siła ciężkości są siłami wywołującymi przemieszczenia masy

$$\langle \rho v \gamma \rangle = -K(\theta, T) \left\langle \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \right\rangle \quad (2.3)$$

gdzie $\rho v \gamma$ – adwektywny strumień masy (wilgoci); $K(\theta, T)$ – współczynnik przenoszenia masy, który zależy od struktury szkieletu środowiska porowatego i objętościowej zawartości wilgoci; $\partial p / \partial x$ – spadek ciśnienia; ρg – wpływ siły ciężkości.

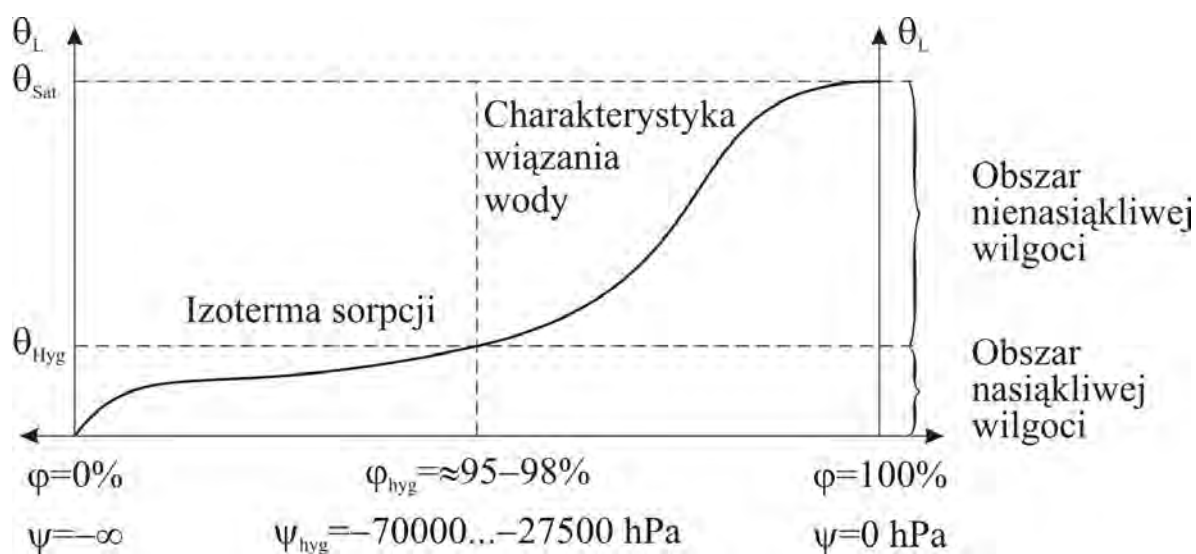
Równanie może być zastosowane dla nasyconego i nienasyconego ośrodka, ale tylko dla ruchu laminarnego. Konieczna jest wiedza o charakterystykach dwóch funkcji –izoterm sorpcji $\phi(\theta, c_c, T)$ i funkcji wiązania wody $\psi(\theta, c_c, T)$, które mają być otrzymane doświadczalnie. Dwie funkcje materiałowe $\theta_L(\phi, c_c, T)$ i $\theta_L(\psi, c_c, T)$ opisują stan równowagi między wilgotnością a jej stanami zmiany: wilgotnością względną a ciśnieniem kapilarnym. Ich stosunek opisuje równanie Kelvina:

$$\psi = \rho R_v T \ln \phi \quad (2.4)$$

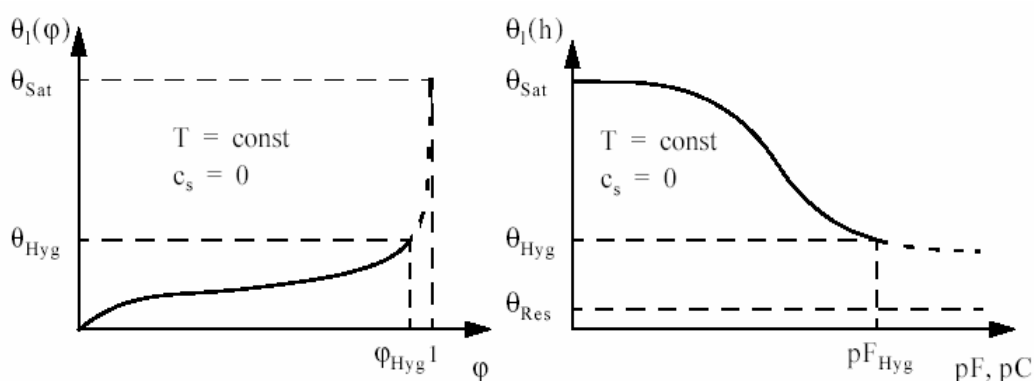
Izoterma sorpcji i krzywa retencji wodnej zawierają (teoretycznie) jednakową informację. Przy stałych stężeniu soli i temperaturze funkcje są przekształcane jedna w drugą [35, 36].

Na rys. 2.2 widzimy krzywą retencji wodnej. Typowe funkcje są na rys. 2.3. Izoterm sorpcji kształtują się na początku $\phi=0$, $\theta=0$ i na końcu w punkcie $\phi=\phi_{\text{Hyg}}$, $\theta=\theta_{\text{Hyg}}$. Między nimi funkcja jest rosnąca i ma punkt przegięcia. Parametr θ_{Hyg} odpowiada wilgotności

bezwzględnej $\varphi_{\text{Hyg}} = 95-98\%$ i określa wyjściowy punkt mierzonej izotermy sorpcji. Parametr θ_{sat} wpływa na izotermę sorpcji pośrednio, to znaczy oddziaływaniem na charakterystykę retencji wodnej. Zależność temperaturową izotermy sorpcji najczęściej się pomija. W przeciwieństwie do tego wpływ soli na sorpcję wody w materiałach porowatych jest istotny. Wpływ soli prowadzi do zwiększenia zawartości wody, gdy wilgotność względna powietrza przewyższa wartość krytyczną. Parametry pierwotne θ_{Hyg} i θ_{sat} także są wykorzystane dla opisu krzywej retencji wodnej. Parametr θ_{res} reprezentuje wilgotność pozostałą przy $\psi \rightarrow \infty$.



Rys. 2.2. Krzywa retencji wodnej [77]



Rys. 2.3. Krzywa retencji wodnej: izoterma sorpcji i charakterystyka retencji wodnej [77]

Oddawanie wilgoci do powietrza przez materiał nadmiernie zawilgocony, aż do stanu osiągnięcia równowagi sorpcyjnej, nazywa się desorpcją. Izoterm sorpcji i desorpcji nie pokrywają się: przy desorpcji materiały wykazują większą wilgotność przy tej samej wilgotności względnej powietrza, jak przy sorpcji - to zjawisko nazywa się histerezą.

W pracy [129] obszar przegrody podzielono na dwie strefy zawilgocenia:

- suchą – strefa wilgotności higroskopijnej

$$0 \leq \theta \leq \theta_h, \quad \theta(p, \Theta) = \frac{p}{p^s} \theta^h \quad (2.5)$$

- wilgotną - strefa wilgotności ponadhigroskopijnej (obszar kondensacji)

$$\theta_h < \theta \leq \theta_s, \quad p(\theta, \Theta) = p^s(\Theta) \quad (2.6)$$

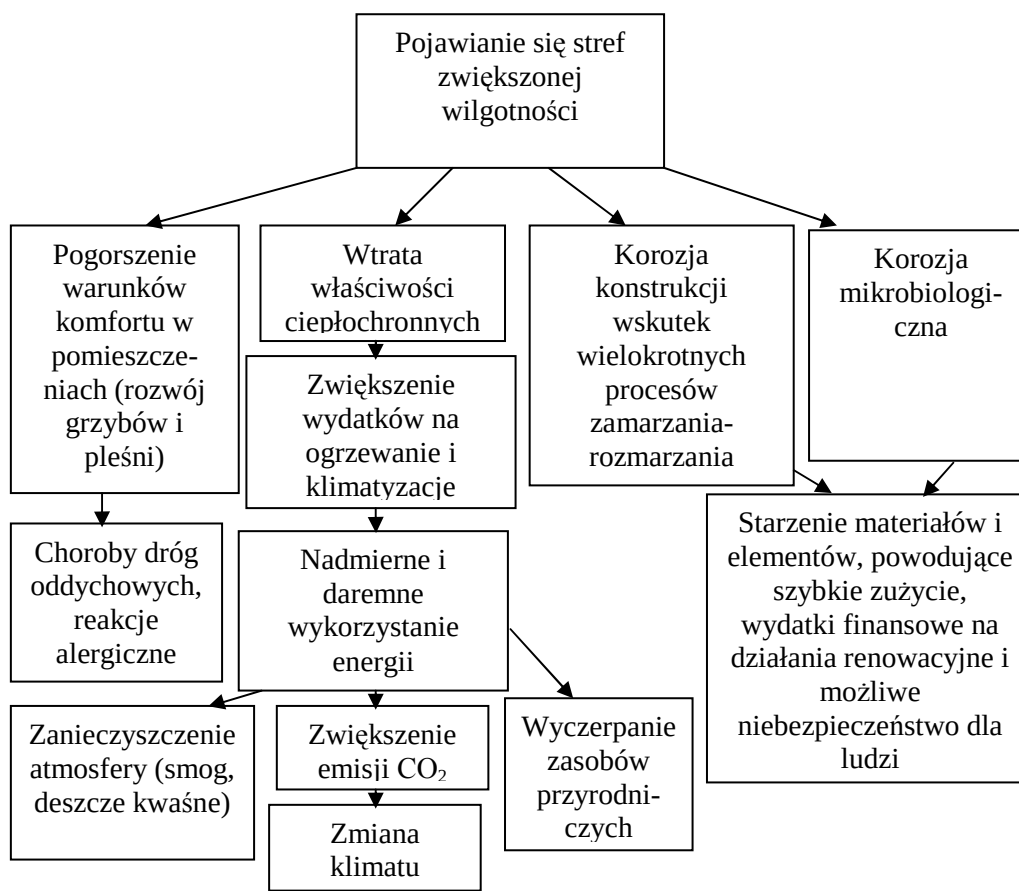
Wilgotność materiału wyznacza się w pierwszej strefie na podstawie ciśnienia cząstkowego pary wodnej wykorzystując zlinearyzowane izoterm sorpcji, a w strefie kondensacji oblicza się z zależności gęstości strumienia wody w poszczególnych warstwach przegrody oraz według warunków brzegowych.

2.4.4. Skutki nadmiernego zawilgocenia przegród

Możliwe skutki zawilgocenia przegród przedstawiono na poniższym schemacie [133, 134].

Zwiększona zawartość wody w przegrodzie ma wpływ na aktualne dziś problemy energooszczędności i zmniejszenia emisji CO₂. Udowodniono, że największym „źródłem” energii jest energooszczędność, a emisję CO₂ państwa Unii Europejskiej zobowiązały się do 2020 r. zmniejszyć o 15-30 %.

Oprócz zagadnień globalnych, od zawilgocenia przegród powstają i problemy o charakterze miejscowym, na przykład pogorszenie warunków komfortu w pomieszczeniach. Rozwój pleśni i grzybów na ścianach wewnętrznych pomieszczeń powoduje powstawanie różnych chorób u ludzi – przede wszystkim chodzi o choroby alergiczne. Wilgoć w przegrodach sprzyja przedwczesnemu starzeniu elementów konstrukcyjnych i cieplizolacyjnych. Pojęcie starzenia nabrało ostatnio dużej wagi - materiały izolacyjne muszą mieć termin eksploatacji efektywnej nie mniej 25 lat.



2.5. Modele przenoszenia wilgoci

2.5.1. Modele fizyczne przenoszenia wilgoci

Transport wody w materiale budowlanym zależy z jednej strony od struktury porów, tj. ich wielkości, formy i rodzaju, ale z drugiej strony również od pojawiających się w poszczególnych porach sił i mechanizmów wywołujących przepływ wody [11, 29, 32, 44, 57, 63, 64, 69, 89, 123, 129, 136]. Przyjęło się wyróżniać przy analizie procesów transportowych w porach materiałów budowlanych dwa zjawiska, mianowicie tzw. dyfuzję jako pojęcie ogólne opisujące przepływ pary wodnej i tzw. przewodnictwo kapilarne, które opisuje proces transportu ciekłej wody w porach [29]. Pewnym postępowaniem w stosunku do tego podziału jest klasyfikacja przedstawiona przez Rose'a, który wymienia trzy mechanizmy transportu,

wyróżniając obok strumienia kapilarnego dwa rodzaje dyfuzji: dyfuzję powierzchniową i dyfuzję pary wodnej. Natomiast Gertis i Werner, w odniesieniu do zjawisk transportu molekularnego, proponują podział na [119]:

1. Dyfuzję.
2. Przepływ laminarny.
3. Molekularny transport Knudsen.

Dyfuzja rozumiana jest jako proces samoczynnego mieszania się cząsteczek płynów, który przebiega tak długo, dopóki w przestrzennym układzie, w którym zachodzi transport masy występujące różnice koncentracji substancji uczestniczących w procesie nie zostaną w pełni wyrównane [29]. W porowatym materiale budowlanym dyfuzja zachodzi w przypadku, gdy zawartość wilgoci w materiale spadnie na tyle, że woda związana jest na powierzchniach wewnętrznych szkieletu jako mono- lub polimolekularna błonka adsorbentu.

W hydrodynamice wyróżnia się dwa rodzaje przepływu strumienia lepkiego, nieściśliwego płynu: przepływ laminarny i turbulentny [143, 155, 156, 181]. To, który z nich występuje, zależy od wartości liczby Reynoldsa, (Re). Oprócz szybkości strumienia i lepkości płynu szczególne znaczenie mają charakterystyczne geometryczne wymiary przekroju, w którym odbywa się przepływ. Maksymalna wielkość liczby Reynoldsa dla kapilar ciał porowatych, przy której zapewniona jest laminarność przepływu, jest podawana dość różnie przez poszczególnych autorów. Dane te oscylują pomiędzy $Re_{min}=0,1$ i $Re_{min}=75$ [169]. Według [119] w ciałach porowatych, z uwagi na bardzo silnie zmieniające się promienie kapilar, przepływ laminarny może wystąpić w przypadku, gdy liczba Reynoldsa $Re < 4$ [170]. Z uwagi na małe przekroje poprzeczne porów występujących w strukturze porowatych materiałów budowlanych nie ma praktycznie możliwości jej przekroczenia. Można więc uznać, że m.in. w zaprawie cementowej zapewniony jest laminarny charakter przepływu. Pojawienie się strumienia laminarnego w ciałach porowatych uwarunkowane jest dodatkowo spełnieniem nierówności:

$$\frac{e}{r} \ll 1 \quad (2.7)$$

gdzie e — średnia droga swobodna pojedynczej molekuly, r — promień poru. Spełnienie nierówności gwarantuje, że wzajemne zderzenia molekuł gazu będą przeważały w stosunku do zderzeń molekuł ze ściankami porów. Zakłada się, że w sposób laminarny będą pokonywane pory o promieniu $r \approx 10e$. Z uwagi na to, że średnia droga swobodna cząsteczek pary wodnej i powietrza w warunkach normalnego ciśnienia wynosi 10^{-7} m, można oczekiwać strumienia laminarnego tylko w makroporach o promieniach $r > 10^{-6}$ m. W małych porach, które występują w strukturach podstawowych, względnie w połączeniach struktur, strumień laminarny przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym nie występuje.

Przy bardzo niskich ciśnieniach substancji dyfundującej, względnie przy małych promieniach porów, tj. w warunkach, gdy spełniona jest nierówność:

$$\frac{e}{r} \gg 1 \quad (2.8)$$

liczba zderzeń molekuł ze ściankami porów jest wyraźnie większa niż liczba wzajemnych zderzeń między molekułami. Ponieważ molekuły na ściankach porów są odbijane w sposób rozproszony, daje to w efekcie strumień masy podlegający innym zależnościom aniżeli te, które dotyczą strumienia laminarnego czy typowej dyfuzji. Ruch cząsteczek ma charakter analogiczny do przepływu gazu przez przewody pod bardzo niskim ciśnieniem. Przepływ tego rodzaju nosi nazwę dyfuzji Knudsena [91].

Odnosząc się do wyszczególnionych wyżej mechanizmów transportu wody w materiale porowatym, należy stwierdzić, że mogą one występować tylko przy określonej geometrii porów i w określonych termodynamicznych warunkach. W tab. 2.2 zebrano podstawowe dane na temat trzech wymienionych rodzajów transportu.

Tab. 2.2. Zestawienie wzorów opisujących procesy dyfuzji, przepływu laminarnego oraz molekularnego transportu Knudsena w porowatych materiałach budowlanych [29, 119]

Forma transportu	Strumień masy	Współczynnik transportu	Średnia swobodna droga/promień poru	Zakres porów
Dyfuzja	$m = -P \cdot \text{grad}p$	$P = \frac{M \cdot r^2 \sqrt{8R \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)} \cdot \sqrt{T}}{N_L \cdot \sigma_{1,2}^2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{p}$	$\frac{e}{r} \ll 1$	Mikro- i makropory
Strumień laminarny	$m = -L \cdot \text{grad}p$	$L = \frac{\pi r^4 \cdot M}{8R\alpha} \cdot \frac{p \left(1 + \frac{b}{T} \right)}{3 T^2}$	$\frac{e}{r} \ll 1$	Makropory, $r > 10^{-6} \text{m}$
Transport Knudsena	$m = -K \cdot \text{grad}p$	$K = \frac{4r^3}{3} \sqrt{\frac{2\pi M}{R}} \cdot \frac{1}{\sqrt{T}}$	$\frac{e}{r} \gg 1$	Mikro- i makropory, $r < 10^{-6} \text{m}$

We wszystkich tych przypadkach strumień masy opisany jest ogólnie obowiązującym równaniem typu:

Strumień masy = współczynnik transportu $\times$ gradient ciśnienia.

Poszczególne współczynniki transportu wykazują jednak różną zależność od molekularno-kinetycznych, geometrycznych i przede wszystkim termodynamicznych wielkości.

Analizując przedstawione wyżej informacje pod względem możliwości zastosowań praktycznych w budownictwie, należy zauważyć, że w rzeczywistości w materiałach budowlanych — odpowiednio do częstości występowania pewnych struktur porów — mogą współistnieć różne rodzaje transportu o rozmaitej wydajności. Prawidłowości rządzące pojedynczymi mechanizmami, przedstawione w tab. 2.2, dają się ująć tylko przy pewnych założeniach upraszczających, a często wymagają dalszych wyjaśnień. Podstawowym jednak problemem przy próbach praktycznego korzystania z przedstawionych powyżej zależności matematycznych jest możliwość równoczesnego występowania kilku mechanizmów transportu w obrębie rozpatrywanego tu zakresu sorpcyjnego.

2.5.2. Pojęcie współczynnika dyfuzji wilgoci

Warunki komfortu cieplno-wilgotnościowego w pomieszczeniu oraz procesy przenoszenia masy i ciepła, przebiegające w materiałach budowlanych zależą od charakterystyk hydrofizycznych materiałów, a głównie – współczynnika dyfuzji wilgoci i krzywej retencji wodnej. Na podstawie wiedzy o tych wielkościach można wnioskować o przenoszeniu wody w materiale, uzyskując przy tym odpowiednie wnioski o jego odporności na nasiąkanie wilgocią i możliwości wykonywania z niego przegród izolacyjnych.

Przepływ wody w ośrodku kapilarno-porowatym, można opisać równaniem Richardsa, które w wersji jednowymiarowej ma postać [18, 39, 59, 74, 111, 121, 143]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2.9)$$

gdzie ψ – potencjał wody, cm H₂O; θ – wilgotność ośrodka, cm³·cm⁻³; $K(\psi)$ – współczynnik przewodnictwa wodnego, cm·s⁻¹; t – czas, s; z – współrzędna, cm. Do rozwiązania tego równania, czy to w sposób analityczny, czy numeryczny, niezbędna jest znajomość zarówno zależności pomiędzy potencjałem wody a wilgotnością (krzywa retencji wodnej) $\psi(\theta)$, jak też pomiędzy współczynnikiem przewodnictwa wodnego a potencjałem wody lub wilgotnością $K(\psi)$ lub $K(\theta)$.

Współczynnik dyfuzji wilgoci w ośrodku porowatym definiowany jest równaniem Darcy, które mówi, że gęstość strumienia wody jest wprost proporcjonalna do gradientu jej potencjału:

$$\vec{q} = -K(\psi) \text{grad} \psi \quad (2.10)$$

gdzie $\vec{q}$ – gęstość strumienia wody, cm·s⁻¹.

Wyidealizowanym modelem przepływu cieczy w ośrodku porowatym jest równanie Hagen - Poiseuille'a opisujące laminarny i stacjonarny przepływ cieczy przez prostą kapilarę o przekroju kołowym [143].

$$K = \frac{\rho g}{8\eta} r^2 \quad (2.11)$$

gdzie r oznacza promień kapilary, g – przyspieszenie ziemskie, η jest lepkością cieczy, ρ – gęstość.

Według [105] współczynnik dyfuzji wilgoci:

$$K(\Theta) = \frac{k_0}{r_{\max}^{2j}} \Theta^l \left(\int_0^\Theta r^{(2+2j)/i}(x) dx \right)^i \quad (2.12)$$

gdzie l – parametr krętości porów, r – promień poru, m ; $r_{\max}$ – promień poru o maksymalnych wymiarach w próbce, m ; Θ – wilgotność zredukowana:

$$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (2.13)$$

gdzie θ – wilgotność aktualna, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_r – wilgotność resztkowa, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_s – wilgotność odpowiadająca stanowi nasycenia, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; k_0 , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, - współczynnik proporcjonalności:

$$k_0 = g / (k^* \nu \sigma) \quad (2.14)$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; k^* – współczynnik kształtu; ν – lepkość kinematyczna, $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; σ – napięcie powierzchniowe, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; j oraz i są parametrami modelu.

Jeżeli podstawimy $l=a$, $(2+2j)/i=b$, $i=c$ oraz $k = k_0 / r_{\max}^{2j}$, to otrzymamy równanie modelu wyliczania współczynnika dyfuzji wilgoci w strefie nienasyconej z parametrami empirycznymi:

$$K(\Theta) = k \Theta^a \left(\int_0^\Theta r^b(x) dx \right)^c \quad (2.15)$$

Najczęściej używane w literaturze modele obliczeniowe współczynnika dyfuzji wilgoci w strefie nienasyconej są szczególnymi przypadkami równania (2.15) i otrzymuje się je przez podstawienie konkretnych wartości parametrów a , b i c (tab. 2.3, w nawiasach przedstawiono parametry wyznaczone empirycznie).

Tab. 2.3. Wartości parametrów a, b i c równania (2.20) odpowiadające poszczególnym modelom [105, 116]

Model	a	b	c
Purcell [1949]	0	2	1
Fatt and Dykstra [1951]	0	(3)	1
Burdine [1953]	(2)	2	1
Mualem [1976]	(0,5)	1	2

Do wyznaczania współczynnika dyfuzji wilgoci $K(\Theta)$, niezbędne jest określenie $r(\Theta)$. Wszystkie modele opierają się na równaniu Younga-Laplace'a, które mówi, że ciśnienie pod zakrzywioną powierzchnią cieczy jest odwrotnie proporcjonalne do średniego promienia krzywizny tej powierzchni. W przypadku gdy menisk ma kształt powierzchni kulistej: $\psi = 2\sigma / R_H$, gdzie ψ – ciśnienie kapilarne, cm H₂O; σ – napięcie powierzchniowe, N·m⁻¹; a R_H – promień krzywizny menisku, m.

Dwa często używane w literaturze modele do wyznaczania współczynnika przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej są następujące:

Burdine'a [77]:

$$K(\Theta) = K_s \Theta^1 \left[\frac{\int_0^\Theta \psi^{-2}(x) dx}{\int_0^1 \psi^{-2}(x) dx} \right] \quad (2.16)$$

i Mualema [77]:

$$K = \Theta^{1/2} \left[\frac{\int_0^\Theta \frac{1}{\psi(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{\psi(x)} dx} \right]^2 \quad (2.17)$$

są również szczególnymi przypadkami modelu ogólnego. Porównanie zgodności wyników otrzymywanych przy użyciu modeli Burdine'a i Mualema z danymi eksperymentalnymi pozwoliło na stwierdzenie, że przy pomocy obu modeli można szacować współczynnik dyfuzji wilgoci z podobną dokładnością [77].

Także ciekawym jest wzór Usowicza [116], który jest wynikiem podobieństwa modeli hydraulicznych a elektrycznych:

$$K = \frac{\rho g}{8\eta} \sqrt{\frac{1}{u \sum_{j=1}^L \frac{P(x_{1,j}, \dots, x_{k,j})}{x_{1,j} \frac{r_1^4}{l_1} + \dots + x_{k,j} \frac{r_k^4}{l_k}}} } \quad (2.18)$$

gdzie L – liczba wszystkich możliwych kombinacji ułożenia kapilar, a_j zawiera $x_1, x_2, \dots, x_k$ – liczbę kapilar powstałych między cząstkami ośrodka o promieniach kapilar $r_1, r_2, \dots, r_k$ i długościach $l_1, l_2, \dots, l_k$, przy czym

$$\sum_{i=1}^k x_{ij} = u, j = 1, 2, \dots, L \quad (2.19)$$

$P(x_{ij})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia danej konfiguracji kapilar. Spełniony musi

być też warunek: $\sum_{j=1}^L P(X = x_j) = 1$.

Istnieją również modele, w których funkcyjna zależność pomiędzy współczynnikiem dyfuzji wilgoci a potencjałem wody lub wilgotnością określana jest na podstawie danych eksperymentalnych. Zaliczyć do nich można równania Brooksa-Coreya [18, 39, 59, 74, 121]:

$$K(\psi) = K_{sat} \quad \psi \geq \psi_p \quad (2.20)$$

$$K(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\psi}{\psi_p} \right)^{-(2+3\lambda)} \quad \psi < \psi_p \quad (2.21)$$

Winda:

$$K(\psi) = a \psi^{-n} \quad (2.22)$$

Gardnera:

$$K(\psi) = K_s e^{\alpha\psi} \quad (2.23)$$

$$K(\psi) = \frac{a}{\psi^n + b} \quad (2.24)$$

Gilhama i in.:

$$K(\theta) = \alpha \theta^n \quad (2.25)$$

Campbella:

$$K(\theta) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+2} \quad (2.26)$$

$$K(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\psi_p}{\psi} \right)^{2+2/b} \quad (2.27)$$

Jacksona:

$$K(\theta) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (2.28)$$

$$K(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\psi_p}{\psi} \right)^{2+3/b} \quad (2.29)$$

Znany jest model van Genuchtena [59]:

$$\Theta = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha\psi|^n]^{1-1/n}}, & \psi < 0 \\ 1, & \psi \geq 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

$$K = K_s \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{n/(n-1)})^{1-1/n}]^2, (n > 1) \quad (2.31)$$

albo w takiej postaci:

$$K(\psi) = K_s \frac{\left(1 - [\alpha\psi]^{n-1} (1 + [\alpha\psi]^n)^{-m} \right)}{\left(1 + (\alpha\psi)^n \right)^{m/2}} \quad (2.32)$$

gdzie stosunek pomiędzy parametrami Van Genuchtena można podać w postaci $m=1-1/n$.

Modele te klasyfikowane są jako eksponencjalne lub potęgowe. W równaniach tych K oznacza współczynnik dyfuzji wilgoci w strefie nienasyconej wyrażony w jednostkach, $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; ψ – potencjał wody, $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$; natomiast parametry a , α , b , n , λ są empirycznymi parametrami poszczególnych równań. Parametry te wyznaczane są przy pomocy matematycznych metod dopasowywania empirycznych równań do danych pomiarowych, np. metodą najmniejszych kwadratów.

Pomimo że znane są prawa opisujące przebieg procesu transportu cieczy w cylindrycznych kapilarach, to jednak przepływu kapilarnego zachodzącego w porowatych materiałach budowlanych nie daje się ująć w postaci równie prostego, a jednocześnie dokładnego, teoretycznie wyprowadzonego opisu matematycznego [77, 116, 148, 164, 165].

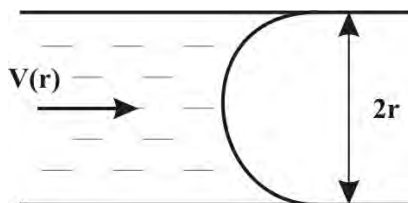
Główną przyczyną jest złożona struktura wewnętrzna materiału: znaczne zróżnicowanie wielkości porów, trudna do zdefiniowania zmienność kształtu podłużnego poszczególnych porów oraz zmienność ich przekroju poprzecznego, a także występowanie trudno definiowalnych połączeń między pojedynczymi kanalikami biorącymi udział w przepływie. Z tego względu w grę wchodzi jedynie obliczeniowe przybliżenie, oparte na określonym wyobrażeniu modelowym i bezwzględnie wymagające przeprowadzenia eksperymentu.

Historycznie, ruch w wielofazowych środowiskach porowatych modelowany był analogicznie do ruchu cieczy w kapilarach, gdzie obszar porów w środowisku porowatym idealizowano jako zespół kapilar.

W różnych dziedzinach nauki, na przykład przy badaniach gleb, też są wykorzystane modele porów [18, 41, 59, 74, 111, 121]. Modele ciał porowatych bazują się na kształcie wiązań kapilarów. Dla różnych układów powstały modele Burdine and Mualem [35]. Znaną jest praca van Genuchtena i in. [45], która w swoim czasie była najlepszym opisem istniejących modeli porowo-skalowych.

Większa część modeli wykorzystuje najprostszą geometrię poru – por cylindrycznego kształtu.

Najprostszy model poru (rys.2.4) zaproponowany był przez Burdine. Element bazowy modelu składa się jedynie z poru cylindrycznego kształtu z promieniem r [35, 36, 77].



2.4. Model pory Burdine [35]

Por może być nasycony wodą lub powietrzem. Objętościowy strumień cieczy znajduje się zgodnie z równaniem Hagena - Poiseuille'a [143, 155]:

$$V_L(r) = -\frac{\pi r^4}{8\mu_L} \rho_L g \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.33)$$

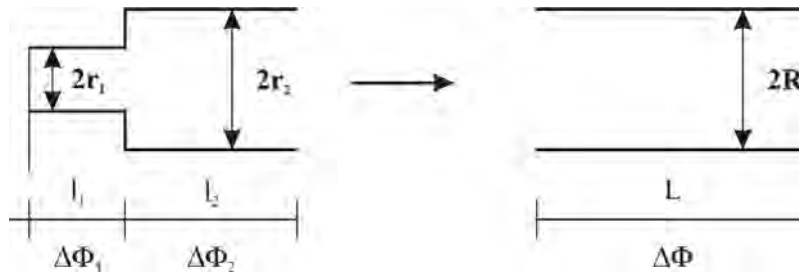
Objętościowy strumień pary znajduje się z wzoru Stefana:

$$V_v(r) = -\pi r^2 \frac{D}{\rho_L R_v T} \rho_L g \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.34)$$

W [77] funkcja modelu pora określona jest:

$$f_{p.Burdine}(\theta_L) = \int_0^{\theta_L} \frac{1}{h^2} d\theta_L + \frac{\rho_v}{\rho_L} \frac{D}{R_v T} \theta_G \quad (2.35)$$

Drugi model porów, który będzie rozpatrzony dokładnie to model Mualema [1976]. Elementami bazowymi modelu są dwie związane kapilary z promieniami r_1 i r_2 , jak pokazano na rys. 2.5. Stosunki pomiędzy promieniami i długościami porów przyjęto za jednakowe. Bazowym elementem była jedna kapilara z promieniem r i długością L . Przyjęto, że równe objętości i równy gradient potencjału tworzą jednakowe strumienie objętościowe.



Rys. 2.5. Bazowy element modeli pory Mualema [35]

Strumień cieczy i pary znajduje się z równań Hagena-Poiseuille'a i Stefana, przyjęte za [77]:

$$V_L(r_1, r_2) = -\frac{\pi r_1^2 r_2^2}{8\mu_L} \rho_L g \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.36)$$

$$V_v(r_1, r_2) = -\pi r_1 r_2 \frac{D}{\rho_L R_v T} \rho_L g \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.37)$$

$$f_{p.Mualem}(\theta_L) = \int_0^{\theta_L} \frac{1}{h_1} \frac{1}{h_2} d^2 \theta_L + \frac{\rho_v}{\rho_L} \frac{D}{R_v T} \theta_G^2 \quad (2.38)$$

W modelu porów Mualema przenikanie wody jest słabsze w porównywaniu z modelem Burdina. Wynika to z większego oporu połączonych kapilar o różnych średnicach.

W przedstawionych powyżej modelach (równaniach matematycznych) tylko niektóre z parametrów posiadają zdefiniowany sens fizyczny. Można do nich zaliczyć współczynnik

dyfuzji wilgoci w strefie nasyconej K_{sat} , ciśnienie wejścia powietrza ψ_p oraz wilgotność nasycenia θ_s . Pozostałe z nich nie mają sensu fizycznego, są natomiast, w wyniku analiz empirycznych i teoretycznych, często przedstawiane jako funkcje pewnych parametrów fizycznych fazy stałej.

2.5.3. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w materiałach budowlanych

Fick przedstawił gęstość strumienia dyfuzyjnego F przy przepływie stacjonarnym jako proporcjonalną do gradientu koncentracji c substancji dyfundującej:

$$F = -K \text{ grad} c \quad (2.39)$$

Ten zapis matematyczny odnosi się do ośrodka izotropowego, którego struktura i właściwości dyfuzyjne w sąsiedztwie każdego punktu są jednakowe w odniesieniu do wszystkich kierunków. Korzystając z równania (2.39) wyprowadza się podstawowe równanie dyfuzji niestacjonarnej:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div} F = \text{div}(K \text{ grad} c) \quad (2.40)$$

W przypadku przepływu jednokierunkowego równanie (2.40) przyjmuje postać:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial(K \partial c / \partial x)}{\partial x} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial K}{\partial x} + c \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} \quad (2.41)$$

Odnosi się ono do przypadku, gdy gradient koncentracji występuje jedynie wzdłuż osi x , co odpowiada dyfuzji niestacjonarnej, np. w próbce równoległościenną o zaizolowanej poboczniczy. Dwa ostatnie składniki sumy wyzerują się, jeżeli badany proces będzie odpowiadał założeniom podanym na rys. 2.6, tj. jeżeli dla każdego $x \in \langle 0, d \rangle$ współczynnik dyfuzji wilgoci będzie odznaczał się stałą, uśrednioną po grubości (tj. w przedziale $c_1 - c_2$) wartością $K = \bar{K} = \text{const}$.

Wówczas równanie dyfuzji jednowymiarowej uprości się do postaci:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.42)$$

Przedstawione wyżej podstawowe równania dyfuzji dotyczą procesów izotermicznych, przy czym wielkość temperatury wpływa na ruchliwość cząstek, a zatem i na przebieg zjawiska. Równania te wykluczają zewnętrzne działania sił (np. różnice w ciśnieniu całkowitym).

W pierwszych pracach opisujących proces wysychania materiału porowatego korzystano z teorii dyfuzji liniowej, zakładając stałą wartość współczynnika dyfuzji wilgoci [29, 85].

Opracowane w pracach Kasperkiewicza [52] tabelaryczne zestawienie zbiorcze obrazuje, jak duży jest zakres zmienności współczynników dyfuzji wilgoci materiałów na spoiwie cementowym – wyznaczonych przez różnych badaczy: od $4 \cdot 10^{-8}$ do około $600 \cdot 10^{-8}$ m²/h. Spowodowane jest to niewątpliwie zróżnicowaniem właściwości poszczególnych materiałów. Jednak obraz taki wynika zapewne również z trudności technicznych związanych z samym pomiarem pola wilgoci, jak również z przyjęcia stałych wartości współczynników dyfuzji wilgoci, które w poszczególnych przypadkach mogą odnosić się do zupełnie różnych poziomów wilgotności.

Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w porach materiału rozważana była po raz pierwszy przez Pihlajavaarę [85, 143] i jego współpracowników. Przedstawili oni analizy numeryczne dotyczące procesu wysychania płyt, wykorzystując różne hipotetyczne postaci funkcji $K=K(c)$. Chociaż nie informowali oni o próbach wykorzystania doświadczalnych danych, to stwierdzili na podstawie analiz teoretycznych, że współczynnik dyfuzji wilgoci przypuszczalnie zmniejsza się aż kilka razy przy zmianie wilgotności względnej ze 100 % do 70 %. Pihlajavaara zaproponował zamiast stałej wartości współczynnika K liniowy zapis w postaci:

$$K = K_e(1 + b \cdot c) \quad (2.43)$$

w którym K_e , b stanowiły parametry materiałowe.

Kolejne badania tegoż autora nie potwierdziły jednak prawidłowości tego zapisu. Mógł on być stosowany jedynie w przypadku, gdy względna koncentracja wilgoci nie przekraczała wartości 0,5-0,6. Ostatecznie Pihlajavaara zaproponował rozwiązanie w postaci:

$$K = K_e(1 + b \cdot c^n) \quad (2.44)$$

które według niego pozwalało z zadowalającą dokładnością opisać rzeczywiste procesy migracji wody w zakresie $c < 0,9$. Dla badanych próbek wartość współczynnika K zawierała się w granicach $K = 1,5 \cdot 10^{-11}$ m²/s – $K = 20 \cdot 10^{-11}$ m²/s, tzn. zmieniała się w przybliżeniu o jeden rząd wielkości.

Analizy przeprowadzone przez Bażanta i Najjara [29] nie potwierdziły przydatności zależności wykładniczej (2.44) proponowanej przez Pihlajavaarę. W rezultacie podjęli się oni analitycznego zbadania zależności współczynnika dyfuzji wilgoci od wilgotności względnej porów oraz dodatkowo od temperatury i stopnia hydratacji. Przez wprowadzanie różnych zależności funkcyjnych do równania dyfuzji starano się dopasowywać rozkłady wilgotności dla płyt, walców i kul, uzyskane za pomocą techniki komputerowej, do zaczerpniętych z literatury danych doświadczalnych. Rozważane początkowo zależności typu

$$K = K_1(\alpha_0 + (1 - \varepsilon_0)\theta^n) \quad (2.45)$$

lub

$$K = K_1(1 - (1 - \alpha_0)(1 - \theta)^n) \quad (2.46)$$

nie przyniosły oczekiwanych rezultatów. Dopiero opisanie zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci równaniem:

$$K = f(\theta) = K_1 \left\{ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{[1 + (1 - \theta)/(1 - \theta_c)]^n} \right\} \quad (2.47)$$

pozwoлиło z zadowalającą dokładnością dopasować przebieg wykresów teoretycznych do posiadanych danych doświadczalnych. Gdzie: θ — wilgotność we wnętrzu porów (lub względne ciśnienie pary); K_1 — wartość współczynnika dyfuzji wilgoci przy $\theta \rightarrow 1$ (przyjmowano $K_1 = 0,1 - 0,4 \text{ cm}^2/\text{dzień}$; $4,2 \cdot 10^{-7} - 16,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$); α_0 — parametr równy stosunkowi $K_{\min}/K_{\max}$ (wartości α_0 mieściły się w granicach 0,025–0,10); θ_c — parametr charakteryzujący wilgotność, przy której współczynnik dyfuzji wilgoci K spada do wartości równej średniej arytmetycznej jego minimalnej i maksymalnej wartości. We wszystkich przypadkach założono $\theta_c = 0,75$; n przyjmowano w granicach 6–16.

Kasperkiewicz [52] zaproponował zależność funkcyjną o następującej postaci:

$$K(\theta) = a\theta^2 + b\theta + c \quad (2.48)$$

gdzie a , b , c – stałe materiałowe, które należałoby określić eksperymentalnie, θ – wilgotność materiału, która może być utożsamiana z koncentracją wilgoci w materiale.

Według pracy Kasperkiewicza krzywa drugiego stopnia też niedoskonale oddaje rzeczywistą zmienność współczynnika dyfuzji wilgoci. Z analizy wykresów doświadczalnych wynika, że w czasie pierwszych godzin proces wysychania charakteryzuje się znaczną intensywnością. Rzeczywista zmienność współczynnika K zdaniem Kasperkiewicza powinna być opisana bardziej skomplikowaną funkcją, odznaczającą się silnym wzrostem wartości w zakresie wysokich wilgotności.

W pracy Kiessla i Gertisa [119] wykorzystano krzywe $K(c)$ do numerycznego rozwiązania izotermicznego, jednowymiarowego procesu wysychania płyty gazobetonowej o określonej grubości – z zastosowaniem równania typu

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(K \text{ grad} c) \quad (2.49)$$

zredukowanego do przypadku jednowymiarowego. Wyznaczone krzywe rozkładu wilgoci w przekroju poprzecznym płyty odzwierciedlały wyraźnie wpływ cech charakterystycznych każdego z przyjętych współczynników transportu. Mimo że przedział zmienności współczynnika K w poszczególnych przypadkach był zbliżony, to jednak uzyskano różne pod względem zarówno ilościowym, jak i jakościowym obrazy tego samego procesu. Zatem w celu zapewnienia zadowalającej dokładności rozwiązania problemu konieczne jest nie tylko ustalenie zakresu zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci danego materiału, ale możliwie wierne odtworzenie faktycznej zmienności współczynnika dyfuzji wilgoci w zależności od koncentracji wilgoci.

Praca Kiessla i Gertisa [119] jest przykładem praktycznego zastosowania zaproponowanej procedury obliczeniowej. Był on stosowany przy wyznaczaniu przebiegu zmian wilgotności w osłonach reaktorów jądrowych, które to zmiany ustalane były z uwzględnieniem sprzężeń cieplno-wilgotnościowych. Kiessl i Gertis przyjęli funkcje $f(\theta)$ i $f(T)$ w następujących postaciach:

$$f(\theta) = 0,104 \cdot 10^{-5} \cdot \left(0,05 + \frac{0,95}{1 + (4 - 4\theta)^{11}} \right) \quad (2.50)$$

$$f(T) = \frac{T}{T_0} \exp \left[4683 \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.51)$$

Wartości wymaganych parametrów materiałowych w powyższych równaniach ustalono na podstawie obszernego materiału doświadczalnego uzyskanego w toku realizowanego w Niemczech wieloletniego programu badawczego, związanego z budownictwem osłon reaktorów jądrowych.

Oprócz aktualnych warunków wilgotnościowych, w których odbywa się transport, wpływ na przebieg procesu wywierają również inne czynniki. Z przedstawionych wcześniej informacji wynika, że do takich czynników należy zaliczyć przede wszystkim strukturę materiału oraz temperaturę, w której zachodzi przepływ.

W ostatnie lata dla rozwiązania równania (2.49) korzystano z metodyki Boltzmanna-Matano [27, 166]. Ten sposób został przyjęty i opisany w podalszej części pracy.

2.6. Wnioski

- zaproponowana została klasyfikacja form występowania wilgoci w materiałach budowlanych;
- na bazie przeglądu literaturowego i doświadczenia w dziedzinie budownictwa wykonana została analiza przyczyn zawilgocenia przegród, ich wpływu na stan przegrody i przeciwdziałanie zawilgoceniu;
- przeprowadzono analizę procesów transportowych wody w porach materiałów budowlanych. Problemem przy próbach praktycznego korzystania z przedstawionych zależności matematycznych jest możliwość równoczesnego występowania kilku mechanizmów transportu wody, a nie pojedynczego z opisanych;
- w wyniku porównywania różnych zależności dla współczynnika dyfuzji wilgoci w ośrodkach niejednorodnych zweryfikowano zależność od warunków wilgotnościowych, temperatury i struktury materiału.

3. BADANIA TEORETYCZNE DOTYCZĄCE PRZENOSZENIA ENERGII W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

3.1. Ruch ciepła przez przegrody budowlane

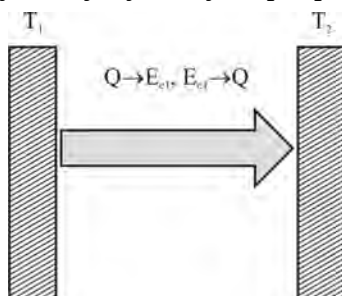
Wewnątrz pomieszczeń budowlanych dominuje jednoczesna wymiana ciepła przez konwekcję (unoszenie) oraz przez promieniowanie, natomiast w przegrodach rozdzielających pomieszczenie występuje wymiana ciepła przede wszystkim przez przewodzenie [10, 11, 21, 32, 44, 50, 51, 53, 57, 72, 76, 83, 88, 91, 104, 108, 116, 136, 150, 152, 159, 178].

Konwekcja albo unoszenie następuje w wyniku zmiany położenia poszczególnych cząstek makroskopowych gazów lub cieczy wywołanej termiczną różnicą gęstości ośrodka. Zjawisko to jest charakterystyczne dla gazów oraz cieczy i stanowi podstawowy rodzaj ruchu cząstek w tych ośrodkach.

Promieniowanie jest to przekazywanie energii cieplnej między powierzchniami ciał stałych, które znajdują się w pewnej odległości od siebie, może ono zachodzić zarówno w ośrodkach materialnych, jak i w próżni.

3.1.1. Promieniowanie cieplne

Wymiana ciepła przez promieniowanie odbywa się za pośrednictwem fal elektromagnetycznych między powierzchniami ciał stałych, które znajdują się w pewnej odległości od siebie. Może ona występować zarówno w ośrodku gazowym (powietrze), w przezroczystych ośrodkach stałych i ciekłych jak i w próżni, czyli bez udziału ośrodka materialnego. Schemat poglądowy takiej wymiany ciepła pokazano na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schemat przenoszenia energii cieplnej przez promieniowanie między powierzchniami ciał stałych [104]

W procesie wymiany ciepła przez promieniowanie między powierzchniami ciał stałych następuje dwukrotna zamiana postaci energii:

- na powierzchni ciała emitującego ciepło następuje zamiana energii cieplnej na elektromagnetyczną;
- na powierzchni ciała pochłaniającego ciepło następuje z kolei zamiana energii elektromagnetycznej na energię cieplną.

Celem ilościowego opisu określonych zjawisk fizycznych związanych z promieniowaniem cieplnym wprowadzają się pojęcie ciała doskonale czarnego oraz ciała szarego.

Ciało nazywa się doskonale czarnym, jeśli niezależnie od temperatury i częstotliwości fali elektromagnetycznej padającej na jego powierzchnię pochłania całą energię padającego promieniowania.

Ciało nazywa się ciałem szarym, jeśli w danej temperaturze niezależnie od częstotliwości pochłania taką samą część energii padającego promieniowania elektromagnetycznego. Zdolność absorpcyjna (ilość energii pochłoniętej) ciała szarego jest taka sama dla wszystkich częstotliwości, zależy tylko od temperatury, składu chemicznego oraz własności powierzchni.

Powierzchnie przegród i urządzeń grzewczych przyjmuje się za ciała szare. W odróżnieniu od ciał doskonale czarnych, ciała szare wypromieniowują mniej ciepła, a padający na nie strumień cieplny jest częściowo pochłaniany, a częściowo odbijany od powierzchni.

W fizyce cieplnej budowli rozróżnia się dwa rodzaje promieniowania:

- wysokotemperaturowe promieniowanie słoneczne odpowiadające temperaturze około 6000 K;
- niskotemperaturowe promieniowanie, pochodzące od przegród i urządzeń grzewczych, odpowiadające temperaturze około 300 K.

W zależności od rodzaju padającego promieniowania, własności absorpcyjne ciał mogą być całkowicie różne [180]. Tak np. w zakresie promieniowania niskotemperaturowego, aluminium matowe (blacha stosowana na pokrycia dachowe) pochłania tylko 5,5 % padającego promieniowania, natomiast azbestocement pochłania aż 96% tego promieniowania. Natomiast w zakresie promieniowania wysokotemperaturowego własności absorpcyjne obu materiałów są bardzo zbliżone.

W procesie oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z powierzchnią ciała szarego część padającego promieniowania ulega odbiciu od powierzchni, natomiast pozostała część tego promieniowania zostaje przez ciało pochłonięta. Zjawisko odbicia oraz

pochłaniania promieniowania ciepłego charakteryzują odpowiednie współczynniki odbicia i pochłaniania.

Współczynnik odbicia oznaczany przez ρ jest to stosunek natężenia promieniowania odbitego do natężenia promieniowania padającego.

Współczynnik absorpcji oznaczany przez ε jest to stosunek natężenia promieniowania pochłoniętego przez powierzchnię ciała do natężenia promieniowania padającego. W przypadku powierzchni przezroczystych występuje jeszcze dodatkowo zjawisko przepuszczania, które charakteryzuje współczynnik przepuszczania τ .

Współczynnik przepuszczania τ jest to stosunek natężenia promieniowania przepuszczonego przez przegrodę przezroczystą do natężenia promieniowania padającego.

Własności emisyjne ciał charakteryzuje tzw. zdolność emisyjna promieniowania (natężenie promieniowania), którą określa się jako ilość energii cieplnej wypromieniowanej w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni ciała:

$$E = \frac{Q}{St}, \text{ W/m}^2 \quad (3.1)$$

Natężenie promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne określa prawo Stefana-Boltzmanna:

$$E_0 = C_0 \left| \frac{T}{100} \right|^4 \quad (3.2)$$

gdzie $C_0 = 5,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ - współczynnik promieniowania ciała doskonale czarnego, T - temperatura bezwzględna, K.

Natężenie promieniowania emitowanego przez ciało szare można przez analogie określić w przybliżeniu z wyrażenia:

$$E = C \left| \frac{T}{100} \right|^4 \quad (3.3)$$

gdzie C - współczynnik promieniowania powierzchni ciała szarego.

Między współczynnikiem promieniowania ciała doskonale czarnego a współczynnikiem promieniowania ciała szarego zachodzi związek:

$$C = \varepsilon C_0 \quad (3.4)$$

Najczęściej w praktyce przy analizie wymiany ciepła przez promieniowanie oblicza się tzw. współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, który definiuje się jako stosunek gęstości strumienia ciepłego, przekazywanego z powierzchni S_1 do powierzchni S_2 , do różnicy temperatur T_1-T_2 [148].

Gęstość strumienia ciepłego przekazywanego z powierzchni S_1 na powierzchnie S_2 określa się z wyrażenia:

$$q_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{S_1} = \varepsilon_{1-2} C_0 \varphi_{1-2} \left| \frac{T_1}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_2}{100} \right|^4 \quad (3.5)$$

Współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie oblicza się wówczas ze wzoru:

$$h_r = \frac{q_{1-2}}{T_1 - T_2} = \varepsilon_{1-2} C_0 \varphi_{1-2} \frac{\left| \frac{T_1}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_2}{100} \right|^4}{T_1 - T_2} = \varepsilon_{1-2} C_0 \varphi_{1-2} b_{1-2} \quad (3.6)$$

3.1.2. Konwekcyjna wymiana ciepła

W ogólnej wymianie ciepła w pomieszczeniach budowlanych obok promieniowania występuje jednocześnie zjawisko konwekcji. Powietrze znajdujące się w pomieszczeniu zamkniętym w wyniku zetknięcia się z ogrzаныmi lub ochłodzonymi powierzchniami przegród lub urządzeń grzewczych czy chłodzących podlega cyrkulacji. Nagrzane powietrze unosi się do góry, natomiast oziębione opada w dół, w wyniku tego ruchu następuje wymieszanie się powietrza w pomieszczeniu.

W przypadku gdy strumień takiego powietrza cyrkulacyjnego zostanie skierowany wzdłuż powierzchni przegrody, między powierzchnią a opływającym strumieniem zachodzi konwekcyjna wymiana ciepła, w wyniku której powierzchnia zostaje ogrzana lub ochłodzona w zależności od kierunku cyrkulacji powietrza.

Rozróżnia się dwa rodzaje konwekcji:

- konwekcja naturalna (swobodna);
- konwekcja wymuszona.

Konwekcja swobodna powstaje w wyniku różnicy gęstości powietrza wywołanej wzrostem objętości przy ogrzewaniu. Ten typ konwekcji jest charakterystyczny dla pomieszczeń zamkniętych.

Konwekcja wymuszona jest spowodowana działaniem wiatru lub podmuchem wentylatora, czynniki te wywołują wymuszoną cyrkulację powietrza napływającego na powierzchnię przegrody. Ten typ konwekcji występuje głównie na zewnętrznych ścianach budynku.

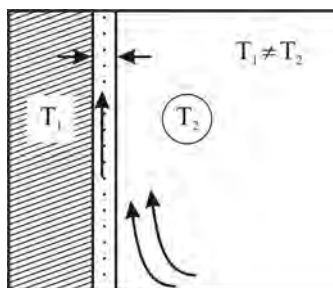
Podczas wymiany ciepła między powietrzem a powierzchnią przegrody na proces konwekcji nakłada się dodatkowo wymiana ciepła o charakterze przewodnictwa.

Badania systematyzowane w danej dziedzinie zaczęły się w latach 50 zeszłego wieku i dotyczyły wyznaczania warunków powstawania procesu konwekcji w materiałach porowatych. W konsekwencji był zaproponowany wzór [148]:

$$\frac{g\beta\Delta T\delta k}{\nu a} > 4\pi^2 \approx 40 \quad (3.7)$$

gdzie ΔT – różnica temperatur na ściankach porów, δ – rozmiar ścianki porów, ν – lepkość kinematyczna, a – przenikalność temperatury, β – współczynnik rozszerzenia gazu czy cieczy, k – współczynnik przenikalności podczas ruchu laminarnego.

W wyniku różnicy temperatury powietrza wewnętrznego i powierzchni przegrody, przy powierzchni przegrody tworzy się cienka warstwa powietrza poruszającego się wzdłuż przegrody, której schemat pokazano na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Schemat powstawania cienkiej warstwy powietrza przy powierzchni przegrody [104]

Zjawisko wymiany ciepła między powietrzem otaczającym a powierzchnią przegrody nazywa się przejmowaniem lub wnikaniem ciepła przez konwekcję. Fizyczną miarą tej wymiany ciepła jest współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję h_a w W/m^2K .

Fizycznie współczynnik h_a określa ilość ciepła wnikającego z otoczenia do przegrody (wewnątrz pomieszczenia) lub ilość ciepła wydostającego się z przegrody do otoczenia (na zewnątrz przegrody) w odniesieniu do $1 m^2$ powierzchni w jednostce czasu, przy różnicy temperatur otoczenia i powierzchni przegrody równej $1 K$.

3.1.3. Złożona wymiana ciepła

W warunkach rzeczywistych na powierzchni przegród budowlanych zarówno po stronie zewnętrznej jak i wewnętrznej występuje jednoczesna wymiana ciepła przez promieniowanie i konwekcję, czyli występuje złożona wymiana ciepła [173].

W przypadku występowania jednoczesnej wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję przyjmuje się, że gęstość całkowitego strumienia cieplnego przekazywanego rozpatrywanej powierzchni jest równa sumie gęstości strumienia cieplnego przekazywanego na drodze konwekcji oraz gęstości strumienia cieplnego przekazywanego przez promieniowanie:

$$q_c = q_k + q_r \quad (3.8)$$

gdzie q_k - gęstość strumienia cieplnego przekazywanego na drodze konwekcji, q_r - gęstość strumienia cieplnego przekazywanego na drodze promieniowania [44, 130].

3.1.4. Przewodzenie ciepła

Ruch ciepła przez przewodzenie polega na wymianie energią kinetyczną podczas kontaktów poruszających się molekuł między sobą i z powierzchnią fazy stałej czy też cieczą [148, 174]. W końcu XVIII wieku Smoluchowski eksperymentalnie obserwował to, że podczas spadku ciśnienia na granicy faz gaz-ciało stałe uzyskuje się przyrost temperatury:

$$\Delta T_a = T - T_G \quad (3.9)$$

Na bazie molekularno-kinetycznej teorii gazów Maxwell przedstawił związek przyrostu temperatury i właściwości fizycznych gazu:

$$\Delta T_a = \frac{2-a'}{a'} \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{l_w}{Pr} \left(\frac{\partial T_G}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (3.10)$$

gdzie a' – współczynnik akomodacji, Pr – kryterium Prandtla, l_w – droga swobodna molekuł gazu, ν – lepkość kinematyczna.

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.11)$$

$$Pr = \nu / a \quad (3.12)$$

$$a' = 1 - \left[\frac{M_i^2 + M_j^2}{(M_i + M_j)^2} \right]^p \quad (3.13)$$

gdzie M_i – masa molekuł, M_j – masa ścianki, p – ilość uderzeń molekuł z fazą stałą ($3 \leq p \leq 4$).

Wykorzystując kryterium Knudsen $Kn = l_w / \delta$, przyrost temperatury będzie równy:

$$\Delta T_a = G \delta \left(\frac{\partial T_G}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (3.14)$$

gdzie

$$G = \frac{2-a'}{a'} \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{Kn}{Pr} \quad (3.15)$$

W warunkach, gdy $\delta \gg 0,1$ mm, $Kn \ll 1$ i $G \ll 1$, przyrost temperatury jest dużo mniejszy w porównywaniu z różnicą temperatur na granicy.

Badania teoretyczne przenoszenia ciepła przez ruch molekularny gazu z uwzględnieniem granicy podziału fazy stałej i gazu prowadziło wiele naukowców. Prasolów [161] przedstawił następujący wyraz dla współczynnika przewodności cieplnej gazu:

$$\lambda_m = \lambda_G \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{2-a_1}{a_1} + \frac{2-a_2}{a_2} \right) \frac{Kn}{Pr} \right]^{-1} \quad (3.16)$$

gdzie λ_G – współczynnik przewodności cieplnej gazu przy ciśnieniu atmosferycznym H_0 i temperaturze T [137, 150, 161, 162].

3.2. Współczynnik przewodzenia ciepła

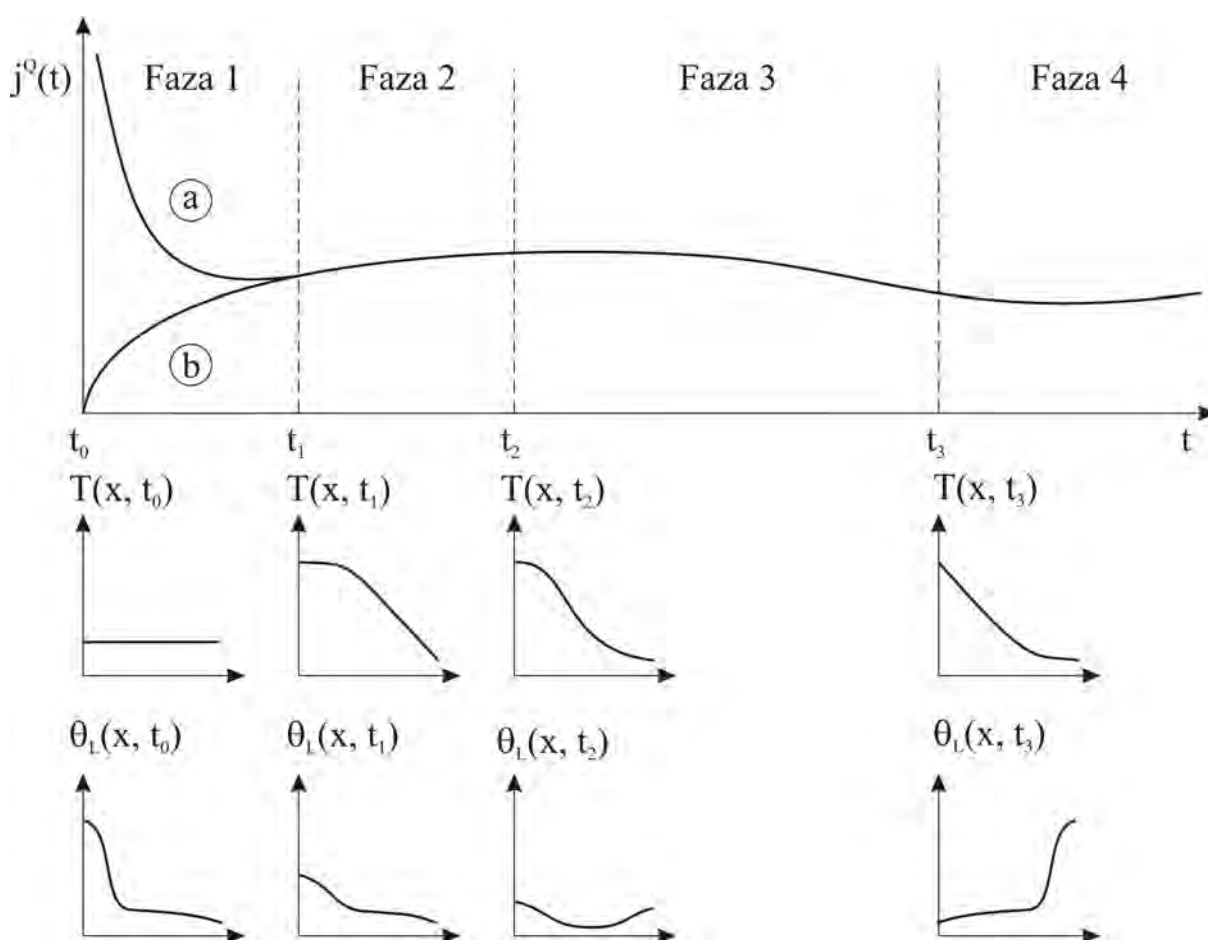
Współczynnik przewodzenia ciepła λ łączy w sobie adwekcję energii wewnętrznej, źródłem której jest strumień energii wewnętrznej wywołany adwekcją strumienia masy. Strumień ciepła mieści w sobie następujące składniki:

- przenoszenie ciepła w szkielecie, fazie ciekłej i fazie gazowej środowiska porowatego;
- promieniowanie wewnętrzne w porach;
- adwekcyjny strumień energii w porach zamkniętych;
- parowanie i kondensacja w porach zamkniętych.

Współczynnik przewodzenia ciepła najbardziej jest zależny od wilgotności środowiska [77]:

$$\lambda(\theta_L) = \lambda_{dry} + (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) \left(\frac{\theta_L}{\theta_{sat}} \right)^{k_\lambda} \quad (3.17)$$

gdzie λ_{dry} , λ_{sat} – odpowiednie współczynniki przewodzenia ciepła w suchym i w nasyconym materiale budowlanym, k_λ – parametr aproksymacji współczynnika przewodności cieplnej.



Rys. 3.3. Temperatura i profil wilgotności podczas mierzenia współczynnika przewodzenia ciepła: faza 1a) – strumień ciepła (strona wewnętrzna), faza 1b) - strumień ciepła (strona zewnętrzna), faza 2 – równość parowania i współczynnika kondensacji, faza 3 – jednorodny profil wilgotności, faza 4 – osiągnięty stan równowagi [35]

Na rys. 3.3 przedstawiono kolejne fazy podczas procesu pomiaru λ wilgotnych materiałów. Faza 1. Temperatura początkowa materiału przyjmowana równej temperaturze strony zewnętrznej (zimnej), wilgotność początkowa odpowiada maksymalnej wilgotności strony wewnętrznej (cieplej). Strumień ciepła bardzo szybko zmienia się z czasem. Szybkość parowania jest większa niż współczynnik kondensacji. Ilość ciepła wzrasta w środku materiału. Faza 2. Parowanie i współczynnik kondensacji są równe. Wilgoć przemieszcza się wskutek dyfuzji pary ze strony ciepłej. Ilość ciepła wciąż wzrasta. Profil wilgoci jest bliski do równoważnego. Kiedy nastąpi moment równowagi wilgoci (koniec fazy 2) – strumień ciepła będzie miał wartość maksymalną. Czas równowagi zależy od właściwości materiału i od warunków brzegowych eksperymentu. W rezultacie, źródłem ciepła jest energia wewnętrzna materiału, funkcja którą maleje z czasem. Faza 3. Strumień ciepła zmniejsza się. Wilgoć

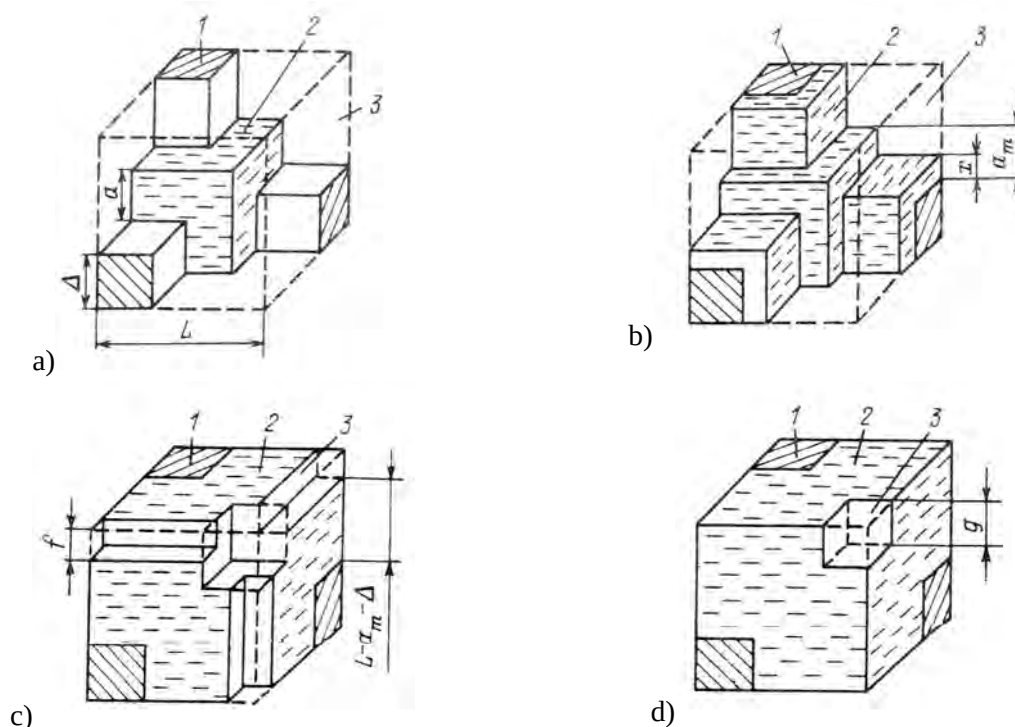
maksymalna zatrzymana jest na stronie chłodnej materiału. Na końcu fazy 3 strumień masy równy jest zeru. Osiągnięta zostaje równowaga wilgoci i ciepła.

Analiza istniejących metodyk pomiarowych współczynnika przewodzenia ciepła przedstawiona w dalszej części pracy.

3.3. Modele złożonego przenoszenia ciepła i wilgoci

Dla analizy przewodności cieplnej materiałów wilgotnych stosowano metody modelowania, które uwzględniają i strukturę środowiska, i zachodzące w nią procesy przenoszenia ciepła i masy [10, 11, 32, 35, 36, 54, 56, 72, 76, 83, 88, 101, 136, 137, 148, 150]. Jedną z pierwszych prób modelowania takich procesów była zrobiona przez Krishera. Krishner zaproponował model, który uwzględnia wyjątkowość materiałów wilgotnych – istnienie elementów suchych i wilgotnych w porach szkieletu stałego, i również wpływ dyfuzji pary na przenoszenie ciepła. Strumień ciepła przemieszcza się przez szkielet oraz pory fazy stałej, które wypełnione cieczą lub suchym powietrzem, a także jest przenoszony przez mieszaninę pary wodnej i powietrza suchego w porach ośrodka. Powyższe procesy mogą zachodzić równolegle i szeregowo, co było rozpatrywane w modelu. Zależność między ilością porów wilgotnych i zawartością wilgoci według Krishera można opisać równaniem:

$$b = 1 - \exp(-7\theta) \quad (3.18)$$



Rys. 3.4. Modele wilgotnych materiałów porowatych [148]

Rozpatrywany model zakłada, że materiał składa się z 3 faz – faza stała 1, faza ciekła 2 i faza gazowa 3 (rys. 3.4). Kiedy wilgotność materiału θ jest niewielka – faza ciekła obejmuje wtrącenia izolowane (rys. 3.4 a), które przy zwiększeniu wilgotności rosną i gdy wilgotność będzie równa wilgotności krytycznej $\theta=\theta'$ połączą się między sobą (rys. 3.4 b). Jeżeli wilgotność nadal wzrasta (rys. 3.4 c) i w momencie gdy $\theta=\theta''$ – zniknie część fazy gazowej (rys. 3.4 d).

Dla systemu niejednorodnego złożonego z dwóch faz (powietrze i ciecz), gdy kąt zwilżania $\nu=0^\circ$, efektywny współczynnik przewodności cieplnej można zapisać takim wyrażeniem:

$$\frac{\lambda_{LG}}{\lambda_L} = \bar{S}_1 + \nu \left[\frac{\bar{\Delta S}}{1-(1-\nu)\bar{l}_2} + \frac{2\bar{S}_3}{1-(1-\nu)\bar{l}_1} + \bar{S}_4 \right] \quad (3.19)$$

gdzie

$$\bar{S}_1 = \begin{cases} \left(\frac{\theta - \theta_c}{1 - \theta_c} \right)^{1,6}, & \theta \leq 0,5 \\ \left(\frac{\theta_c - \theta}{\theta_c} \right)^{1,6}, & \theta > 0,5 \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\theta_c = \begin{cases} \theta', & \theta \leq 0,5 \\ \theta'', & \theta > 0,5 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\bar{l}_1 = \sqrt{\bar{S}_1}; \quad \bar{l}_2 = \sqrt[3]{\bar{\omega}_c}; \quad \bar{S}_2 = \bar{l}_2^2; \quad \bar{S}_3 = (1 - \bar{l}_2)\bar{l}_1; \quad (3.22)$$

$$\bar{S}_4 = 1 - \bar{S}_2 - 2\bar{S}_3; \quad \bar{\Delta S} = \bar{S}_2 - \bar{S}_1; \quad \nu = \lambda_G / \lambda_L$$

Współczynnik przewodności cieplnej fazy gazowej można obliczyć za pomocą równania:

$$\lambda_G = \lambda_a + \lambda_v \quad (3.23)$$

gdzie λ_a , λ_v – współczynniki przewodności cieplnej odpowiednie w suchej części powietrza i w parze wodnej.

$$\lambda_v = \frac{DM}{RT} \frac{p}{p - p_p} \frac{dp_p}{dT} r \quad (3.24)$$

gdzie D – współczynnik dyfuzji pary w powietrzu, M – masa molekularna pary, p – ciśnienie sumaryczne pary i powietrza, p_p – ciśnienie parcjale pary, r – ciepło parowania cieczy. W materiałach dyspersyjnych przenoszenie wskutek dyfuzji będzie niższe ze względu na krętość porów. Współczynnik oporu dyfuzyjnego określa się:

$$\mu = D / K_p \quad (3.25)$$

gdzie D – współczynnik dyfuzji pary w powietrzu, K_p – współczynnik dyfuzji pary przez środowisko porowate.

Rozwiązano również metodę zmiennych przekrojów dla składników wzajemnie przenikających się. Wtedy efektywny współczynnik przewodności cieplnej:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_s} = c^2 + \nu(1-c)^2 + \frac{2\nu(1-c)c}{1-c+\nu c} \quad (3.26)$$

gdzie

$$\nu = \frac{\lambda_{LG}}{\lambda_s} \quad (3.27)$$

Parametr c znajduje się ze wzoru:

$$2c^3 - 3c^2 + 1 = m \quad (3.28)$$

gdzie m – porowatość materiału.

Dla danego schematu obliczeń konieczna jest wiedza o wielkościach krytycznych wilgotności θ' i θ'' , a także o współczynniku oporu dyfuzyjnego μ .

Podczas badań sprzężonego przepływu ciepła i wilgoci wykorzystuje się współczynnik Luikov'a (Lu) [139, 162]:

$$Lu = \frac{k_m}{k_q} \quad (3.29)$$

gdzie k_m – współczynnik dyfuzji wilgoci, k_q – współczynnik dyfuzji ciepła.

Dla wilgotnych materiałów budowlanych kryterium Luikov'a opisuje trzy możliwe mechanizmy przepływu:

- $Lu \gg 1$ – szybkość rozpowszechniania pola wilgotnościowego jest większa od kształtowania pola temperaturowego;
- $Lu = 1$ – szybkość kształtowania pól wilgoci i temperatury jest równa;
- $Lu \ll 1$ – szybkość rozpowszechniania pola wilgotnościowego jest mniejsza od kształtowania pola temperaturowego [161, 162].

Z uwagi na złożoną i nieuporządkowaną (nieciągłą) strukturę materiału porowatego opis procesów fizycznych w nim zachodzących jest zagadnieniem trudnym. Aby taki opis uprościć, możemy wykorzystać możliwość zastąpienia ośrodka porowatego makroskopowo ekwiwalentnym ośrodkiem ciągłym, którą to możliwość zapewniają metody teorii homogenizacji (uśrednienia) [110, 147]. Metody te pozwalają na przejście drogą teoretyczną od lokalnego opisu ośrodka porowatego w skali mikroskopowej (najmniejszej) do jego opisu w skali mezoskopowej (pośredniej). Konieczność takiego przejścia jest konsekwencją faktu, iż skala mikroskopowa, z powodzeniem wykorzystywana przy opisie ośrodków jednofazowych (ciągłych), jest za mała i zbyt szczegółowa, aby być użyteczna w przypadku ośrodków wielofazowych (nieciągłych).

Wiadomo, że większość procesów fizycznych opisana jest równaniem [148]:

$$A = \Lambda B \quad (3.30)$$

gdzie A , B – wielkości wektorowe, a Λ – współczynnik przenoszenia lub inny parametr fizyczny materiału. Za [148] współczynniki przenoszenia w różnych skali pokazano w tab. 3.1.

Tab. 3.1. Wyznaczanie współczynników przenoszenia

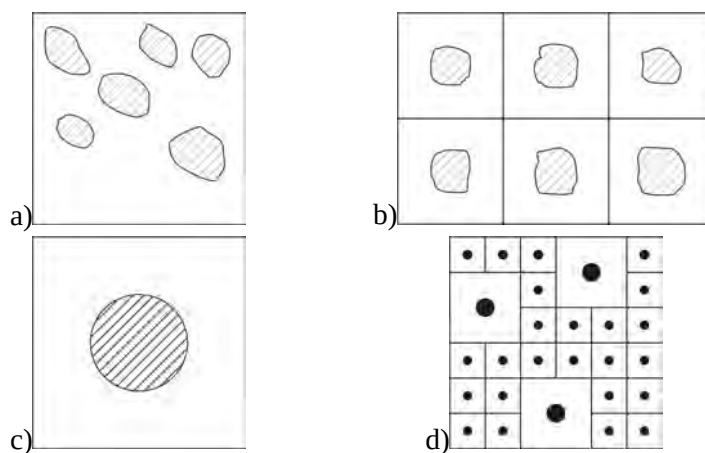
Fizyczna właściwość materiału	Równania w mikroskali	Warunki brzegowe na powierzchni rozdziału faz	Równania w makroskali
Współczynnik przenoszenia ciepła λ	$j_{qi} = -\lambda_i \nabla T_i$ $\text{div } j_{qi} = 0$	$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} = \lambda_{i-1} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial n}$	$\langle j_q \rangle = -\lambda \langle \nabla T \rangle$ $\text{div } \langle j_q \rangle = 0$
Przewodność elektryczna σ	$j_{ei} = -\sigma_i \nabla \varphi_i$ $\text{div } j_{ei} = 0$	$\sigma_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} = \sigma_{i-1} \frac{\partial \varphi_{i-1}}{\partial n}$	$\langle j_e \rangle = -\sigma \langle \nabla \varphi \rangle$ $\text{div } \langle j_e \rangle = 0$
Stała dielektryczna ε	$D_i = -\varepsilon_i \nabla \varphi_i$ $\text{div } D_i = 0$	$\varepsilon_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} = \varepsilon_{i-1} \frac{\partial \varphi_{i-1}}{\partial n}$	$\langle D \rangle = -\varepsilon \langle \nabla \varphi \rangle$ $\text{div } \langle D \rangle = 0$
Przenikalność magnetyczna μ	$B_i = \mu_i H_i$ $\text{div } B_i = 0$	$\mu_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} = \mu_{i-1} \frac{\partial \varphi_{i-1}}{\partial n}$	$\langle B \rangle = -\mu \langle \nabla \varphi \rangle$ $\text{div } \langle B \rangle = 0$
Dyfuzja D_i	$j_{im} = -D_i \nabla C_i$ $\text{div } j_{im} = 0$	$D_i \frac{\partial C_i}{\partial n} = D_{i-1} \frac{\partial C_{i-1}}{\partial n}$	$j_m = -D \langle \nabla C \rangle$ $\text{div } \langle j_m \rangle = 0$

Wyznaczanie właściwości fizycznych, które wchodzi do tab. 3.1 polega na znalezieniu ogólnego współczynnika przenoszenia Λ . Istnieje wiele algorytmów dla rozwiązania tego problemu:

- wykorzystanie danych eksperymentalnych (metoda półempiryczna);
- metoda środowiska efektywnego i całkowania;
- metoda asymptotyczna;
- modelowanie geometrii struktury środowiska niejednorodnego.

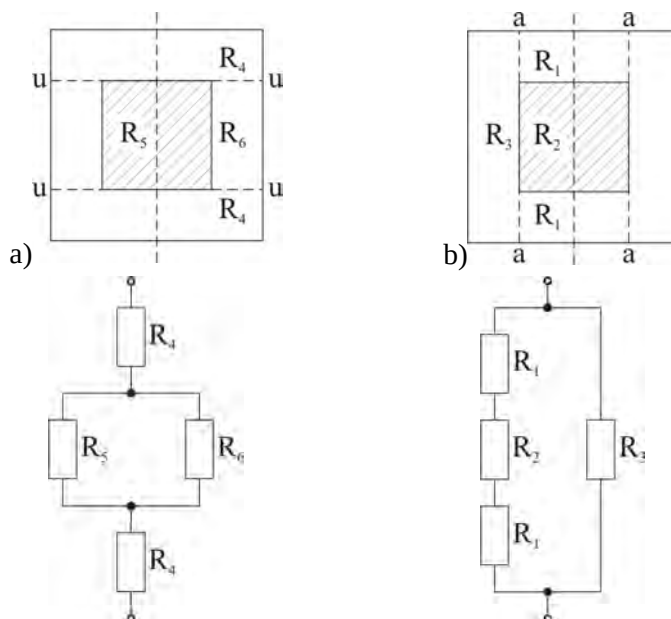
Ostatni algorytm można osiągnąć za pomocą (rys. 3.5-3.9):

- metody komórki elementarnej, a w niej:



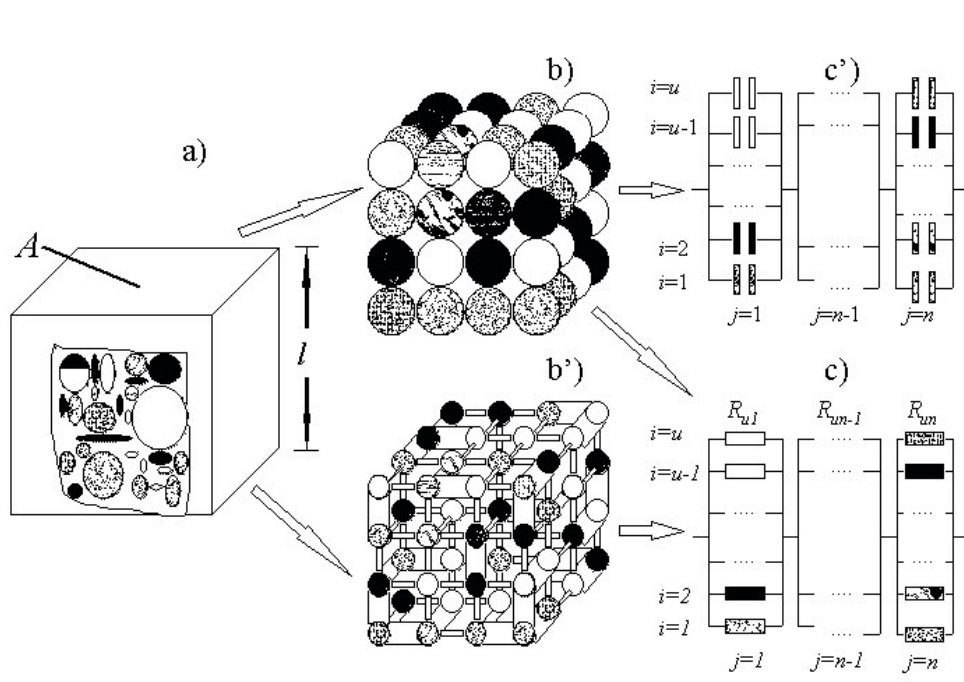
Rys. 3.5. Struktura materiału z wtrąceniami izolowanymi: a,b – chaotyczna i odpowiednia do niej struktura uporządkowana; c – komórka elementarna; d – wtrącenia różnych wymiarów [148]

o metoda cięcia Rele dla składników izolowanych,



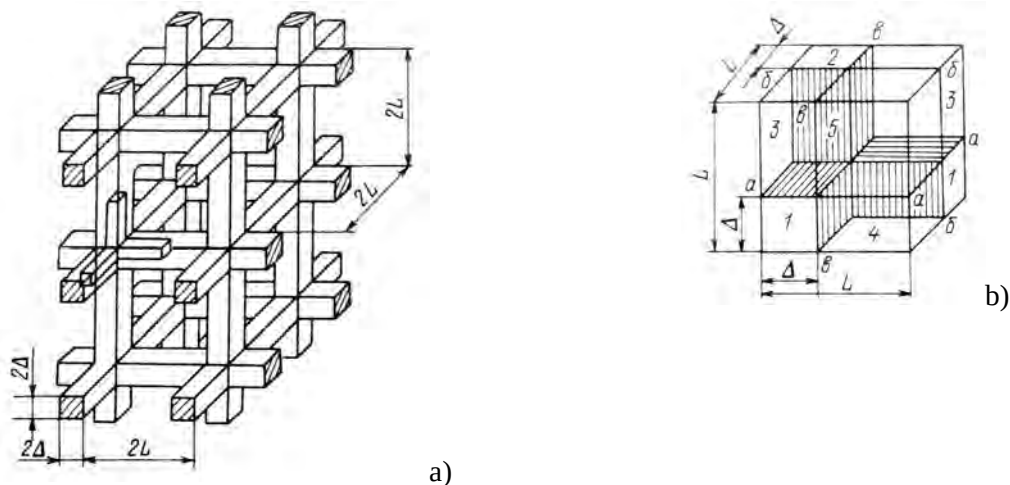
Rys. 3.6. Komórka elementarna środowiska z wtrąceniami kształtu sześciianu i schematy oporów połowy komórki: a) – cięcie izotermiczne; b) – cięcie adiabatyczne [116]

Taka metoda była zastosowana w pracach [116]. Schematycznie opracowany model pokazany na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Schemat konstrukcji modelu statycznego: a) jednostkowa objętość ośrodka, b) układ składający się z kul, które tworzą warstwy nakładające się na siebie; b') układ kapilar obrazujących pory powstałe między cząsteczkami, c) połączenia równoległe oporników w warstwie i szeregowo między warstwami, c') połączenia kondensatorów równoległe w warstwie i szeregowo między warstwami [148]

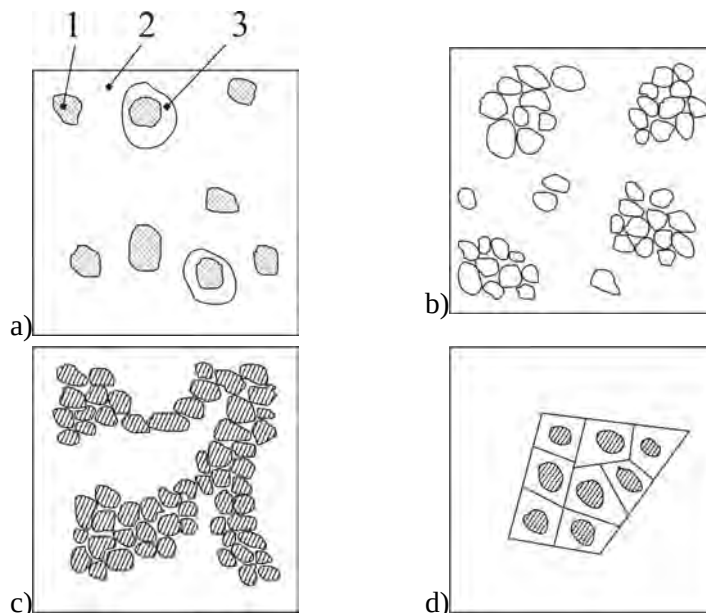
o metoda przecięcia stałego belek dla składników wzajemnie przenikalnych,



Rys. 3.8. Ośrodek z komponentami wzajemnie przenikalnymi (a) i 1/8 część jego komórki elementarnej [148]

o metoda cięcia zmiennego brusów dla składników wzajemnie przenikalnych.

- metody uśredniania elementu.



Rys. 3.9. Struktura zapelnionego polimeru: a) – odrębne cząsteczki, b) – izolowany klaster, c) – nieskończony klaster, d) – wielokąt z cząsteczką nieskończonego klasteru, 1- cząsteczka napełniacza, 2 – polimer, 3 – warstwa międzyfazowa [148]

W Polsce, w latach siedemdziesiątych, wprowadzono metodykę obliczeń przyrostu zawilgocenia przegród według modelu Fokina-Glasera [33], gdzie wartości liczbowe zestawiono na podstawie badań prowadzonych w latach sześćdziesiątych. Zjawiska związane z ruchem wody w materiałach budowlanych rozpatrywali później inni polskie badacze: Płoński [89] – procesy nawilgacania i wysychania przegród, Leśniewska i Pogorzelski [69] – kapilarny ruch wody, Klemm [57] – przemiany fazowe, Witakowski [123] – wpływ wilgoci na straty ciepła, Kubik [64] – pojęcie efektywnego współczynnika dyfuzji, Wyrwał [129] – eksperymentalne wyznaczania współczynników materiałowych, Wójcik [125] – sprzężone przepływy ciepła i wilgoci, Kasperkiewicz [52] – rozkład wilgotności podczas wysychania przegród, Garbalińska [29] – izotermiczny proces wysychania zapraw cementowych.

Poza Polską trzeba zaznaczyć pracę Luikov'a [161, 162] – model matematyczny przenoszenia ciepła i masy, Kiessla [55] – określenie potencjału przenoszenia wody, Gertisa i Wernera [119] – wpływ struktury materiału porowatego na procesy migracji wody, Pihlajavaare [85] – eksperymentalne wyznaczanie współczynnika dyfuzji na kulach betonowych.

Przez wielu lat badaniami sprężonego przepływu ciepła i wilgoci w materiałach porowatych zajmują się naukowcy Politechniki Łódzkiej. Autory omówionego niżej modelu są P. Klemm i D. Gawin [56]. Podstawowe równania modelu:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(k_m \nabla \theta + k_t \nabla T) \quad (3.31)$$

$$C_{ap} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{ap} \nabla T) + r \rho_o \nabla(k_{m1} \nabla u) \quad (3.32)$$

$$\lambda_{ap} = \lambda + \rho_o r k_{t1} \quad (3.33)$$

gdzie k_m , k_t – współczynniki transportu wilgoci i termodyfuzji, C_{ap} – pozorna pojemność kapilarna, λ_{ap} – pozorny współczynnik przewodzenia ciepła.

Model wykorzystuje zasady termodynamiki procesów nieodwracalnych. Zmiennymi stanu są temperatura, całkowite ciśnienie powietrza i masowa koncentracja wilgoci. Założenia modelu są następujące:

- ośrodek wielofazowy
- lokalna równowaga termodynamiczna
- para wodna i powietrze są gazami doskonałymi
- brak histerezy w krzywej retencji wilgoci
- w porach materiału ciśnienie jest stałe, równe ciśnieniu atmosferycznemu
- w ośrodku nie występują źródła ciepła
- ośrodek nie jest w pełni nasycony (brak przepływów wody, spowodowanych wzrostem jej objętości podczas zamarzania)
- w wodzie porowej nie występują rozpuszczone sole
- ośrodek jest nieodkształcalny
- temperatury wszystkich faz są jednakowe
- ciągłość wilgoci we wszystkich fazach

Warunki brzegowe stosowane pod czas modelowania:

- na zewnętrznej powierzchni przegrody:

- konwekcyjna wymiana ciepła między powierzchnią przegrody a otoczeniem
- dany jest strumień ciepła docierający do powierzchni przegrody na drodze promieniowania
- konwekcyjna wymiana pary wodnej między powierzchnią przegrody a otoczeniem

- na powierzchniach rozdzielających warstwy dwóch różnych materiałów:

Przypadek idealnego kontaktu higrotermicznego

- ciągłość temperatury
- ciągłość potencjału kapilarnego
- ciągłość strumieni masy i energii

Przypadek niedoskonałego kontaktu higrotermicznego (występują opory powierzchniowe dla przepływu wilgoci i ciepła)

- ciągłość strumieni masy i energii.

Rozwiązania modelu wykonane za pomocy jednowymiarowej nieliniowej metody różnic skończonych. Dla modelowania został stworzony program CHEAMOT (Coupled Heat And Moisture Transfer).

Wśród opracowanych w Polsce modeli matematycznych zjawisk ciepło-wilgotnościowych należy wymienić m.in. pracę J. Wyrwała [127]. Model ten i jego rozwiązania uwzględniają wielofazową strukturę materiałów porowatych. Podstawowe równania modelu:

$$\left(\langle \rho \rangle c + L_{vl} B \right) \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \rho_l L_{vl} A \frac{\partial \theta_l}{\partial t} = c_l (\rho_l D_{lw} \nabla \theta_l + D_{IT} \nabla \langle T \rangle - \rho_l D_l g) \cdot \nabla \langle T \rangle + \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla \langle T \rangle) + L_{vl} \nabla \cdot (\rho_l D_{vw} \nabla \theta_l + D_{vT} \nabla \langle T \rangle - \rho_l D_l g) \quad (3.34)$$

$$\rho_l (1 + A) \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + B \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_l D_w \nabla \theta_l + D_T \nabla \langle T \rangle - \rho_l D_l g) \quad (3.35)$$

gdzie D_{lw} – izotermiczny współczynnik przepływu wody, D_{IT} – termiczny współczynnik przepływu wody, D_{vw} – izotermiczny współczynnik dyfuzji pary wodnej, D_{vT} – termiczny współczynnik dyfuzji pary wodnej, D_w – izotermiczny współczynnik przepływu wilgoci, D_T – termiczny współczynnik przepływu wilgoci; A , B – współczynniki modelu.

Wszystkie współczynniki są nieliniowymi funkcjami, zależą głównie od zawartości wilgoci w materiale i jego temperatury. Doświadczalne wyznaczenie współczynników jest skomplikowane. Aby obliczyć wartości wymienionych współczynników należy wyznaczyć doświadczalnie krzywą retencji wilgoci w całym zakresie wilgotności materiału, współczynnik przepuszczalności wody przez materiał, współczynnik przepuszczalności pary wodnej przez materiał, wilgotność krytyczną i pojemność kapilarną badanego ośrodka. Założenia modelu są następujące:

- faza stała czyli szkielet materiału porowatego jest to jednoskładnikowa, stanowi jednorodne i izotropowe ciało stałe, które spoczywa w inertym układzie odniesienia. Gęstość fazy jest stała, znajduje się ona w równowadze mechanicznej

oraz prędkość zmian energii wewnętrznej zależy od przepływu ciepła drogą przewodzenia

- faza ciekła czyli pory wypełnione cieczą jest jednoskładnikową nieściśliwą cieczą newtonowską. Gęstość fazy jest stała, prędkość zmian entalpii fazy zależy od sumy konwekcyjnego i kondukcyjnego przepływu ciepła
- faza gazowa czyli pory wypełnione wilgotnym powietrzem jest dwuskładnikową mieszaniną pary wodnej i suchego powietrza traktowanego jako gaz inertyjny. Faza gazowa jest płynem newtonowskim, znajduje się w równowadze mechanicznej, prędkość zmian entalpii fazy zależy od sumy konwekcyjnego i kondukcyjnego przepływu ciepła. Gęstość wilgotnego powietrza wypełniającego pory jest stała i równa gęstości suchego powietrza
- w materiale nie zachodzą reakcje chemiczne
- ciśnienie wilgotnego powietrza w porach materiału jest stałe i równe ciśnieniu atmosferycznemu
- pozorna stała gazowa jest równa stałej gazowej suchego powietrza.

Rozwiązania modelu wykonane dla pewnych przypadków szczególnych za pomocą półanalitycznej metody elementów skończonych, metody elementów brzegowych i metody analitycznej.

J. Świrski i J. Wyrwał pracowali dalej w tym kierunku i dziesięć lat później wydana została praca [129], w której model matematyczny bazuje na poprzednim modelu, uwzględnia wszystkie jego założenia i warunki brzegowe oraz przyjmuje następujące założenia upraszczające.

- unoszenie ciepła przez migrującą w przepływie kapilarnym wilgoć i przepływ wilgoci pod wpływem siły ciężkości i różnicy temperatur w procesie kondensacji mają małe znaczenie
- udział ciepła kondensacji w bilansie energii jest pomijany jako minimalny w porównaniu z ciepłem przewodzoną przez materiał
- przewodzenie ciepła, przepływ kapilarny wody, dyfuzja pary wodnej w przegrodzie zachodzą w warunkach ustalonych.

Opracowany został model kondensacji pary wodnej w wielowarstwowej przegrodzie budowlanej, w której obszar przegrody dzieli się na dwie strefy zawilgocenia: suchą – strefa wilgotności higroskopijnej i wilgotną - strefa wilgotności ponadhigroskopijnej (obszar kondensacji). Wilgotność materiału wyznacza się w pierwszej strefie na podstawie ciśnienia cząstkowego pary wodnej wykorzystując zlinearyzowane izotermy sorpcji, a w strefie kondensacji oblicza się z zależności gęstości strumieni wilgoci w poszczególnych warstwach

przegrody oraz w/w warunków brzegowych. Zjawiska wiązania i ruchu fazy ciekłej wilgoci ujęto całościowo korzystając ze współczynnika przepływu wody kapilarnej. Szerokość obszaru kondensacji w danej strefie materiału wyznacza się korzystając z krzywych ciśnienia pary wodnej nasyconej zlinearyzowanych w poszczególnych warstwach. Także zostało przyjęto wyidealizowane (prostoliniowe) krzywe wilgotności równowagowych w przypadku stykających się warstw materiałów.

Równania modelu dla obszarów zawilgocenia:

- strefa sucha

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \text{const.} \quad (3.36)$$

$$j = j_p = -\frac{D'}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \text{const.} \quad (3.37)$$

$$\theta = \frac{p}{p^s} \theta^h \quad (3.38)$$

- strefa mokra

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \text{const.} \quad (3.39)$$

$$j = j_p + j_w = -\frac{D'}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_w K(\theta - \theta^h) \frac{\partial \theta}{\partial x} = \text{const.} \quad (3.40)$$

$$p \cong p^s(T) \quad (3.41)$$

Dodatkowe założenia modelu.

Warunki brzegowe na powierzchni przegrody:

- dana jest temperatura na powierzchni przegrody $T = T^*$
- konwekcyjna wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią przegrody a otoczeniem $q = \alpha(T - T^\circ)$
- dany jest strumień ciepła docierający do powierzchni przegrody na drodze promieniowania $q = a_s J_{\text{rad}} - J_{\text{em}}$,
- znana jest prężność pary wodnej na powierzchni przegrody $p = p^*$
- konwekcyjna wymiana pary wodnej pomiędzy powierzchnią przegrody a otoczeniem $j_p = \beta(p - p^\circ)$
- wilgotność na powierzchni przegrody równa się pojemności kapilarnej $\theta = \theta^s$

Warunki brzegowe określające ciągłość na stykach warstw przegrody:

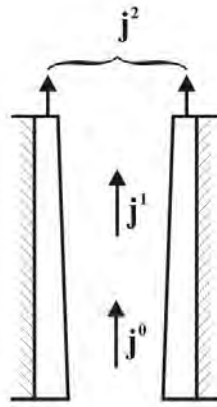
Przypadek idealnego kontaktu higrotermicznego

- gęstości całkowitego strumienia ciepła $q_j = q_k$

- temperatury $T_j = T_k$
- gęstości całkowitego strumienia wilgoci $j_j = j_k$
- potencjału przenoszenia wilgoci jako wilgotności materiału $\theta_k = k(\theta_k) \theta_j$.

Dla modelowania był stworzony program Humidity napisany w języku Fortran. Wczytuje się temperatury i wilgotności względne powietrza po obu stronach przegrody oraz grubości warstw. Program zawiera w bazie danych dla 18 materiałów parametry materiałowe warstw oraz opory przejmowania ciepła przez powierzchnię przegrody.

Model zaproponowany przez J. Kubika [64] wyróżnia oprócz dyfuzji objętościowej również dyfuzję powierzchniową oraz przepływ konwekcyjny. Przypisuje następnie poszczególnym strumieniom równania fizyczne, które uzależniają ich wartości od gradientów stężeń, rys. 3.10.



Rys. 3.10. Współdział różnych mechanizmów transportu w globalnym przepływie wody na podstawie Kubika [64]

$$\begin{aligned}
 j^1 &= -D^1 \text{grad } c^1 \\
 j^2 &= -D^2 \text{grad } c^2 = D^2 \text{grad } c^1 \\
 j^0 &= -D^0 \text{grad } c^1
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

Kubik oprócz przepływów zachodzących w objętości porów, które ogólnie mogą odnosić się zarówno do fazy gazowej, jak i ciekłej — wyróżnia dodatkowy przepływ fazy ciekłej zachodzący na powierzchni kapilar. Równanie transportu przyjęte zostało [4] w następującej postaci:

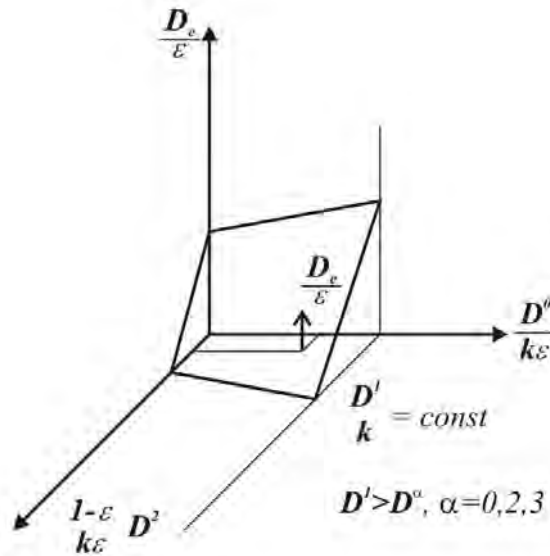
$$\frac{\partial \rho c^1}{\partial t} + \text{div}(-D_e \text{grad } c^1) = 0 \tag{3.43}$$

gdzie

$$D_e = \frac{1}{k} [D^0 + \varepsilon D^1 - (1 - \varepsilon) D^2] \tag{3.44}$$

$$k = \left(1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho^2}{\rho^1} \right) > 1, \quad \varepsilon \ll 1 \quad (3.45)$$

Zaproponowane równanie, opisujące złożone procesy przepływu wody w materiale kapilarno-porowatym, przyjęło postać równania niestacjonarnej dyfuzji. Natomiast występujący w nim tzw. efektywny współczynnik dyfuzji D_e stanowi liniową kombinację współczynników dyfuzji objętościowej D^1 , powierzchniowej D^2 oraz przepływu konwekcyjnego D^0 . Zależności przy przyjętej stałej wartości współczynnika dyfuzji objętościowej D^1 pary wodnej w powietrzu ($D^1=0,220 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ w $T=273 \text{ K}$) zilustrowano na rys. 3.11.



Rys. 3.11. Zależność współczynnika D_e od mechanizmów transportu wody według Kubika [64]

W ostatnich latach model ten rozwijano, starając się uwzględnić sprzężenia między procesami higrotermicznymi, kinetyką procesu hydratacji (dehydratacji) i stanem odkształceń ośrodka. Przy formułowaniu równań modelu korzystano z teorii uśredniania przestrzennego.

Z modeli zagranicznych można wyróżnić pracę [81], w której równania matematyczne są:

-dla ruchu wody:

$$\frac{q_L}{\rho_L} = -K \frac{\psi_m}{dT} \nabla T - K \frac{d\psi_m}{d\theta} \nabla \theta - K \frac{d\psi_o}{dC} \nabla C - \frac{d\psi_o}{dT} \nabla T - K \vec{k} \quad (3.46)$$

-dla pary wodnej:

$$\frac{q_v}{\rho_L} = -D_{TV} \nabla T - D_{\theta v} \nabla \theta + D_{CV} \nabla C \quad (3.47)$$

-dla ruchu ciepła:

$$K_1 \frac{\partial T}{\partial t} + K_2 \frac{\partial \theta}{\partial t} + K_3 \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla [\lambda \nabla + K_4 \nabla \psi_m + K_5 \nabla \psi_o - C_L (T - T_0)(q_v + q_l)] \quad (3.48)$$

gdzie q_L – przepływ cieczy, ψ_t – potencjał całkowity wody, K – współczynnik przewodnictwa wodnego (stała Darcy) w funkcji zawartości wody $K(\theta)$, ψ_m – potencjał kapilarny w funkcji zawartości wody oraz temperatury, ψ_o – potencjał osmotyczny w funkcji stężenia soli w ośrodku oraz temperatury, $\vec{k}$ – wektor jednostkowy skierowany w kierunku pionowym, D_{TV} – termiczny współczynnik dyfuzji pary wodnej, $D_{\theta V}$ – izotermiczny współczynnik dyfuzji pary wodnej, D_{CV} – współczynnik dyfuzji wody w zależności od stężenia roztworu, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – współczynniki fenomenologiczne uwzględniające zależności temperaturowe, potencjał ciśnieniowy, potencjał osmotyczny, ciepło utajone (parowania oraz topnienia).

Dużo prac na temat przenoszenia energii i masy w ośrodkach prowadzono na Uniwersytecie Technicznym Tambowa w Rosji. Wyróżnić można pracy [154], [179].

W pracy [154] rozwiązania dotyczą równań:

Dla przenoszenia ciepła:

$$\lambda_e \frac{\partial T(l, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_e [T_{se} - T(l, \tau)] \quad (3.49)$$

Dla przenoszenia masy:

$$D_e \frac{\partial C\{l, \tau\}}{\partial x} = \beta [C_{nas}(T(l, \tau)) - C_s] \quad (3.50)$$

Rozwiązanie wykonane przez metody analityczne – rozdzielania zmiennych, metodę Fouriera i Simpsona. Otrzymane zostały algorytmy rozwiązań dla procesów wysychania materiałów o małej grubości, gdy istnieje założenie, że temperatura powierzchniowa ciała równa temperaturze średniej ciała.

W pracy [179] model matematyczny opisany jest równaniami:

$$\rho_0 c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + Q_F \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + k_t \frac{\partial t}{\partial x} \right) \right] \quad (3.52)$$

Warunki początkowe i brzegowe danego modelu są następujące:

$$t|_{\tau=0} = t_{in}, \quad w_{\tau=0} = w_{in}, \quad (3.53)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{g,ins} - t_0) \quad (3.54)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_w (t_{g,e} - t_w) \quad (3.55)$$

$$-\rho k \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + k_t \frac{\partial t}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = \beta_0 (p_{ins} - p_0) \quad (3.56)$$

$$-\rho k \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + k_t \frac{\partial t}{\partial x} \right) \Big|_{x=\delta} = \beta_w (p_e - p_w) \quad (3.57)$$

$$Q_F = \chi \rho_0 r_{w,l} \frac{\partial(\theta - \theta_z)}{\partial \tau} \quad (3.58)$$

$$\chi = 0 \text{ przy } \theta < \theta_z; \chi = 1 \text{ przy } t < t_z; \theta > \theta_z \quad (3.59)$$

$$\chi = -1 \text{ przy } t \geq t_z; \theta > \theta_z \quad (3.60)$$

gdzie $r_{w,l}$ – ciepło właściwe przemian fazowych woda-lód, θ_z - ilość niezamarzłej związanej wilgoci, k – współczynnik przewodzenia wilgoci, χ – parametr liczący ciepło przemian fazowych, Q_F – ciepło przemian fazowych. Obliczenia zostały wykonane dla pięciu lat eksploatacji przegrody z drewna dla danych pogodowych m.Tomsk (Rosja).

Fedyaev [177] proponuje rozwiązać podobny do poprzednich kształt równań. U niego spotykany szereg równań różniczkowych:

$$C\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot r \cdot \rho_0 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a_m \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right) \right] \quad (3.62)$$

gdzie a_m , λ , δ – odpowiednio współczynniki przewodzenia potencjału, ciepła i współczynnik termogradientny; C , r , ε – ciepło właściwe, ciepło przemiany fazowej i kryterium przemiany fazowej. Algorytm rozwiązania tych równań autor [177] przedstawia za pomocy programu „Fields”, napisanego w języku Pascal. Część graficzna wyników robiona za pomocy programu „Picture”. Dane otrzymane drogą programowania zostały porównywane z wynikami eksperymentów i autorzy świadczą o trafności zastosowanej metody obliczeniowej.

Inni rosyjskie naukowcy [140] Gagarin i Kozlov na bazie niedokładności modeli Fokina i Glasera proponują uwzględnienie przenoszenia wilgoci w strefie ponad sorpcyjnej za pomocą wyznaczania potencjału wilgoci F . Równanie gęstości strumienia wilgoci:

$$j = -\mu \frac{\partial F}{\partial x} = -\mu \frac{\partial e}{\partial x} - \beta(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.63)$$

Metodyka obliczeń przedstawiona dla ściany jednowarstwowej w warunkach stacjonarnych przenoszenia ciepła i wilgoci i polega na wyznaczaniu funkcji zależności temperatury i potencjału F po grubości i wyznaczaniu wilgotności graficznie po zgodnie z funkcją $F(\theta, t)$ przy różnych temperaturach.

Nizovcev [166] proponuje w oprócz podstawowych równań swojego modelu następujące:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + h \nabla(\mu \nabla(\varphi p_{nas})) \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \nabla(D_{\varphi} \nabla \theta) + \mu \nabla(\theta \nabla(\varphi p_{nas})) \quad (3.65)$$

gdzie H – entalpia wilgotnego materiału, τ – czas, λ – współczynnik przewodzenia ciepła wilgotnego materiału, T – temperatura, θ – wilgotność, h – ciepło przejścia fazowego ciecz – para wodna, μ – współczynnik paroprzenikania materiału, p_{nas} – ciśnienie nasycenia pary przy danej temperaturze, Θ – wilgotność objętościowa, D_{φ} – współczynnik dyfuzji wilgoci.

Rozwiązanie obliczone za pomocy metody analitycznej a wyniki są porównywane z otrzymanymi drogą eksperymentalną – metodą pochłaniania γ -promieniowania dla badań procesów przenoszenia wilgoci i metodą gorącego drutu dla wyznaczania parametrów cieplnych materiału.

W [171] użyto wektorowo macierzowego zapisu równania przenikania ciepła i wilgoci:

$$C \frac{\partial \vec{P}}{\partial \tau} = \text{div}(L \text{grad} \vec{P}) + \vec{I} \quad (3.66)$$

gdzie $\vec{P}$ – n-wymiarowy wektor potencjałów przenoszenia, L – macierz współczynników kinematycznych, C – macierz przekątna współczynników pojemnościowych, $\vec{I}$ – wektor mocy źródeł.

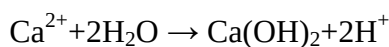
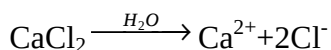
3.4. Zawartość soli w materiałach budowlanych

Zależnie od stężeń i higroskopijności rozpuszczanych soli jak i wartości wilgotności względnej powietrza, materiał budowlany jest w stanie pochłaniać znaczne ilości wody. Może to doprowadzić do nawet całkowitego zawilgocenia, w którym materiał pozostaje jednak nadal w stanie równowagi z powietrzem otoczenia. Przyczyną tego zjawiska jest higroskopijność materiału, rozpuszczalność zawartych w nim soli, będących dla samej budowli szkodliwymi, do których najczęściej występującymi należą [100]:

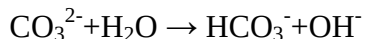
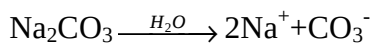
- siarczany: sól gorzka, siarczan magnezu, gips, siarczan wapnia, sól glauberska, siarczan azotowy;
- azotany: azotan magnezu, azotan wapnia, saletra wapniowa;
- chlorki: chlorek wapnia, chlorek sodowy, sól kuchenna;
- węglany: węglan sodowy, soda, wapno, węglan potasowy, węglan wapnia.

Dla przykładu przedstawiono reakcji hydrolizy niektórych soli:

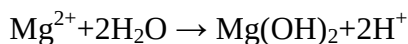
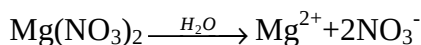
1. Chlorek wapna



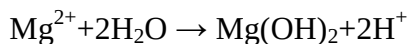
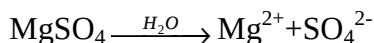
2. Węglan sodowy



3. Azotan magnezu



4. Siarczan magnezu



Sole zawarte w murach pochłaniają i wiążą duże ilości wody: np. przy wilgotności powietrza 90 % zawartość pochłoniętej pary wodnej może być nawet trzykrotnie większa niż w przypadku murów "czystych".

Zasolenie ośrodka porowatego definiowane jest poprzez sumaryczną koncentrację soli w wodzie znajdującej się w tym ośrodku. Wyrażane ono jest w gramach soli na litr wody lub w gramach soli na gram ośrodka [19, 77].

Niszczące działanie soli budowlanych działa w kilku kierunkach i jest zawsze związane z zawilgoceniem przegród. Dostają się one do przegrody razem z wodą na różne sposoby, np. z wodą opadową lub podciąganą kapilarnie. Przy wysychaniu muru w strefie odparowania wilgoci odbywa się proces krystalizacji soli. Zwiększenie objętości soli przy krystalizacji powoduje tak duże naprężenia, że nawet materiały o dużej wytrzymałości mechanicznej ulegają zniszczeniu, szczególnie że proces ten jest powtarzalny. Do tego dochodzą powtarzające się w okresie zimowym cykle zamarzania i odmarzania zawilgoconego muru, a higroskopijne sole dodatkowo wchłaniają wilgoć z powietrza, co jeszcze bardziej zwiększa zawilgocenie muru, sprzyjając z kolei korozji biologicznej.

Naprężenia związane z procesem tworzenia się kryształów soli można wyrazić następującym wzorem matematycznym:

$$P_k = \frac{RT}{V} \times \ln \frac{C}{C_s} \quad (3.67)$$

gdzie P_k – ciśnienie krystalizacyjne, atm; R – stała gazowa, T – temperatura, K, V – molowa objętość soli, dm^3/mol , C/C_s – stosunek stężenia soli w stanie przesylenia do stężenia soli w stanie nasycenia.

Znane jest także zjawisko ciśnienia hydratacyjnego [102], które można wyrazić następująco:

$$P = \frac{RT}{V} \times \ln \frac{P_0}{P} \quad (3.68)$$

gdzie P – ciśnienie hydratacyjne, atm, P_0/P – stosunek prężności pary wodnej w powietrzu do prężności pary wodnej soli uwodnionej. Może ono sięgać rzędu 240 atm i powodować niszczący strukturę kamienia nacisk na ścianki kapilar.

Oznaczenie rodzaju występujących w murze soli umożliwia, albo przynajmniej znacznie ułatwia, określenie źródeł zawilgocenia obiektu:

- duże ilości chlorków i/lub azotanów mogą świadczyć o wilgoci pochodzącej z gruntu,
- wysokie stężenia siarczanów wskazują na wilgoć pochodzącą z kwaśnych deszczy (związki siarki),
- azotany, azotyny oraz związki amonu mogą świadczyć o problemach z korozją biologiczną (mikroorganizmy),
- przy destrukcji betonu i zapraw analiza może wykazać duże ilości związków sodu i magnezu oraz węglanów,
- jeżeli źródłem zawilgocenia będą tylko wody opadowe to, pomijając problem kwaśnych deszczy, stopień zasolenia będzie nieznaczny,
- w przypadku zanieczyszczeń pochodzących z pomieszczeń gospodarskich lub uszkodzonej kanalizacji sanitarnej, charakterystyczna jest obecność związków amonu, azotu oraz siarczanów.

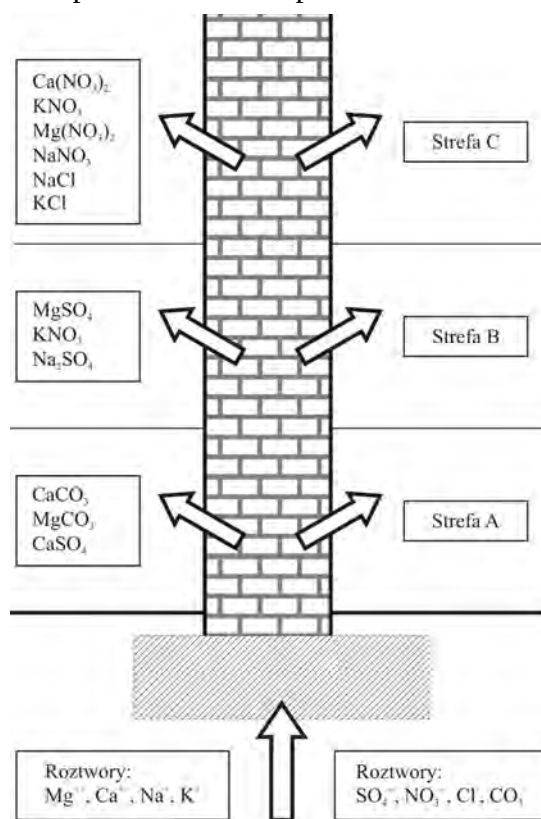
Kolejność krystalizacji soli jest uzależniona od ich rozpuszczalności (rys. 3.10). Natomiast na skutek hydratacji i rekrytalizacji mogą tworzyć się zupełnie inne sole.

Szkodliwe sole budowlane, znajdujące się w badanym materiale tworzą pewne problemy pod czas określania właściwości cieplnych i wilgotnościowych materiałów budowlanych. Prace w tym kierunku prowadzone są przez naukowców Politechniki Białostockiej. Udowodniono [49] zostało, że wpływ soli jest złożony i niejednoznaczny, tzn. obserwuje się efekty podwyższenia współczynnika λ , jak również efekty obniżenia jego wartości.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano statystyczną zależność współczynnika λ materiału ściennego od wilgotności i zawartości soli, pozwalającą obliczyć współczynnik przewodzenia ciepła zasolonego muru ceglanego z uwzględnieniem składu fazowego substancji w porach materiału:

$$\lambda = \lambda_0 + \beta\theta + \gamma(C - \xi\theta) \quad (3.69)$$

gdzie λ_0 – współczynnik przewodzenia ciepła materiału w stanie suchym;



Rys. 3.12. Kolejność krystalizacji soli jest uzależniona od ich rozpuszczalności [99]

β – współczynnik przyrostu przewodności przy wzroście wilgotności o 1 %; γ – współczynnik przyrostu przewodności przy wzroście zasolenia o 1 %; ξ – współczynnik przesunięcia początkowej wartości zasolenia przy zmianie wilgotności o 1 %, θ – wilgotność materiału, C – zawartość soli.

Autorzy [49] zaznaczają, że zaproponowana zależność (3.69) ma bardzo ograniczone zastosowanie. Dla każdego materiału ściennego i wybranego rodzaju soli należało, poprzez specjalne badanie, określić wielkości β , γ i ξ .

Wpływ zawartości soli na właściwości sorpcyjne materiałów budowlanych (szczególnie na beton komórkowy i cegłę ceramiczną) też został określony przez wspomniane wyżej badaczy. Przy wilgotności powietrza 90-98% i $C=5\%$ dla betonów komórkowych zawierających sole NaCl, właściwości sorpcyjne są zwiększone 4,3 – 3,9 razy; KCl – 4,1 - 3,5

razy; MgCl_2 –3,1 – 2,8 razy. Przy wilgotności powietrza 90-98% i $C=4\%$ dla cegły ceramicznej zawierającej sole Na_2CO_3 , właściwości sorpcyjne są zwiększone 4,3 – 7 razy; Na_3PO_4 –3,7 – 6,2 razy; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ –1,3 – 2,2 razy.

3.5. Modele komputerowe przenoszenia masy i energii w ośrodku porowatym

Współczesne metody normowych obliczeń ciepłno-wilgotnościowych stosowane podczas projektowania przegród budowlanych bazują najczęściej na uproszczonym modelu Glasera [46, 66, 151, 153, 176]. Jest on stosowany już od ponad 25 lat, a ostatnio, po pewnych udoskonaleniach, został także przyjęty w normie europejskiej EN-ISO13788. Model ten nie opisuje w pełni przebiegu zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w elementach konstrukcji budowlanych, dlatego też norma EN-ISO 13788 w załączniku G dopuszcza stosowanie programów komputerowych opartych na bardziej złożonych modelach procesów ciepłno-wilgotnościowych w materiałach budowlanych.

W ostatnim dwudziestoleciu opublikowano wiele prac teoretycznych i eksperymentalnych z tego zakresu, dlatego też Międzynarodowa Agencja Energii pod koniec lat 90-tych zainicjowała program badawczy „Annex 24”, w ramach którego wszechstronnie porównano kilkanaście różnych modeli matematycznych zjawisk higro-termicznych w konstrukcjach budowlanych. Przedmiotem porównań były nie tylko podstawy fizyczne i teoretyczne tych modeli, ale także metody wyznaczania ich parametrów i funkcji materiałowych, a także ich weryfikacja eksperymentalna [43, 40].

Także w Polsce od ponad 40 lat są prowadzone badania z tego zakresu [14, 23]. Jednak podstawowym brakiem polskich badań jest stosunkowo skąpa, z praktycznego punktu widzenia, baza danych materiałowych, co wynika głównie z przyczyn ekonomicznych i braku odpowiedniego zaplecza badawczego.

Współczesne programy komputerowe do obliczeń symulacyjnych wymiany energii w budynkach, np. DOE, ESP-r [103], Energy-10, Energy-Plus, nie pozwalają na bezpośrednie uwzględnienie wpływu zjawisk wilgotnościowych na procesy termiczne [30-32]. Wynika to głównie z faktu, że programy te do obliczeń wymiany ciepła przez przegrody budowlane stosują Metodę Jednostkowej Funkcji Odpowiedzi (ang. Unit Response Function Method), która jest bardzo szybka i skuteczna jedynie w przypadku stałych parametrów termicznych materiałów budowlanych. Są one zwykle przyjmowane dla stanu suchego lub dla warunków obliczeniowych, które podawane są w bazach danych programów lub w stosowanych normach.

Z drugiej strony, programy do analiz procesów ciepłno-wilgotnościowych w elementach budowlanych na ogół przyjmują warunki brzegowe na wewnętrznych powierzchniach przegród budowlanych zwykle w postaci stałych wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza, bez uwzględnienia rzeczywistego bilansu masy i energii poszczególnych pomieszczeń budynku [103]. Obecnie pojawiają się prace, w których podejmuje się próby pełnej symulacji zjawisk cieplnych i wilgotnościowych w elementach obudowy oraz budynku jako całości, ale na aktualnym poziomie ich rozwoju procesy wymiany masy i energii w budynku opisywane są przy pomocy bardzo uproszczonych modeli.

Można wymienić program HUMIDITY, który wczytuje temperatury i wilgotności względne powietrza po obu stronach przegrody oraz grubości warstw. Program zawiera w bazie danych dane dla 18 materiałów, parametry materiałowe warstw oraz opory przejmowania ciepła przez powierzchnię przegrody [29].

Należy wymienić także program do modelowania przewodzenia ciepła, powietrza, wody i soli w porowatych materiałach budowlanych DIM3.1 (DELPHIN) opracowany w „Instytucie klimatologii budowli” Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie [28, 35]. DIM3.1 rozwiązuje system sprzężonych równań różniczkowych cząstkowych z numerycznym całkowaniem w czasie. Duża ilość zmiennych (zawartość wilgoci, ciśnienie powietrza, stężenie soli, temperatura, dyfuzyjne i adwekcyjne strumienie cieczy, pary wodnej, powietrza, soli, temperatura i ciepło), które charakteryzują ciepłno-wilgotnościowy stan budowy, może być otrzymana jako funkcja miejsca i czasu. O elastyczności modelowania programem świadczy możliwość badania wielu rodzajów budowli, różnych materiałów i różnych obciążeń klimatycznych. Można podkreślić tylko znaczną komplikację tego programu co utrudnia jego praktyczne wykorzystanie.

Osobno należy wyróżnić niemiecki program WUFI, opracowany w Instytucie Fizyki Budowli Fraunhofera w Holzkirchen. Model obliczeniowy przepływu ciepła i wilgoci przez przegrody zewnętrzne wykorzystuje metodykę opracowaną przez Künzla [71]. Ten program został przyjęty do modelowania w danej rozprawie i będzie opisany w dalszej części pracy.

3.6. Wnioski

-
- korzystając z teoretycznych podstaw fizycznych dokonano analizy procesów przenoszenia ciepła w ośrodkach niejednorodnych;

- określono czynniki, które mają wpływ na przewodzenie ciepła. Jednym z najważniejszych parametrów jest współczynnik przewodności cieplnej λ , zależny od parametrów materiałowych, warunków temperaturowych i wilgotnościowych;
- analiza wpływu czynników na proces przewodzenia ciepła pokazała potrzebę badania jednoczesnego przenoszenia ciepła i wilgoci;
- do opisu wpływu wzajemnego procesów przenoszenia ciepła i wilgoci w aspekcie teoretycznym stosowano kryteria podobieństwa – Prandtla, Knudsen’a i Luikov’a, lecz w stosowaniu praktycznym niezbędne są badania mające za celu określenie przebiegu procesu;
- zostały opisane metody matematyczne zjawisk cieplno-wilgotnościowych w materiałach budowlanych, opracowane w Polsce i na świecie w ostatnich latach;
- jednym z czynników wpływających na proces przenoszenia ciepła jest stężenie soli w materiałach budowlanych – zwiększenie zawartości soli sprzyja wiązaniu wody, w wyniku czego wzrasta współczynnik przewodności cieplnej materiału;
- przeprowadzona analiza programów komputerowych dotyczących modelowania procesów przenoszenia ciepła i wilgoci pokazała ciągły rozwój w tej dziedzinie. Dla modelowania sprzężonych procesów wymiany ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych został przyjęty niemiecki program WUFI.

4. METODYKA BADAŃ, MATERIAŁY I URZĄDZENIA

Badania własne obejmowały rozważania teoretyczne dotyczące przepływu masy i energii w ośrodku porowatym. Ten problem został rozpatrzony pod kątem zarówno fizyko-matematycznym i termodynamicznym, oraz pod kątem inżynierskim, od strony inżynierii środowiska. Ze strony fizycznej określono mechanizmy przepływu ciepła, wilgoci, powietrza i soli w środowisku porowatym. Strona matematyczna problemu mieści w sobie analizę stanu zagadnienia, tworzoną przez wiele badaczy. Część termodynamiczna obejmuje rozważania na temat jednoczesnego przepływu masy i energii, a także problemu homogenizacji ośrodka porowatego, a mianowicie – przejścia ze skali mikro do skali mezo i makro. W podejściu inżynierskim zostały opisane mechanizmy powstawania wilgoci w ścianach i wymagania do cieplnego i wilgotnościowego stanu budowli.

Badania własne obejmowały również część praktyczną. W tym celu zaprojektowano i zbudowano, w zespole, zestaw pomiarowy do określenia własności cieplnych i wilgotnościowych materiałów budowlanych o strukturze porowatej. Zestaw służy do uzyskania danych do weryfikacji modelu numerycznego a następnie do prowadzenia rutynowych pomiarów. Pomiary są wykonane za pomocą metody TDR, którą w Polsce w laboratorium Politechniki Lubelskiej wykorzystuje się po raz pierwszy do badań materiałów budowlanych.

4.1. Materiały budowlane

Badania wykonano dla betonu komórkowego, cegły ceramicznej pełnej, styropianu i silikatu wapiennego. Te materiały wybrano z powodu ich szerokiego zastosowania w budownictwie [88].

Beton komórkowy (rys. 4.1) powstaje w wyniku autoklawizacji kruszywa, spoiwa, wody i środków porotwórczych. Do produkcji betonu komórkowego używa się cementu, wapna, drobnego kruszywa takiego jak mielony piasek, popioły lotne, wody oraz dodatków porotwórczych.



Rys. 4.1. Bloczki betonu komórkowego

Proces technologiczny polega na wymieszaniu składników tworzących masę, która zwiększa swoją objętość. Po wyrośnięciu i wstępnym związaniu z powstałej masy wykrajane są bloki, które poddawane są autoklawizacji. Proces ten polega na oddziaływaniu wysokiego ciśnienia (11-13 atmosfer) i wysokiej temperatury (ok. 190 °C) na materiał, w wyniku czego uzyskuje on swoje ostateczne właściwości.

Beton komórkowy charakteryzuje jego gęstość objętościowa, która zależy od ilości porów w betonie. Wraz ze wzrostem porowatości rośnie izolacyjność cieplna, lecz zmniejsza się wytrzymałość na ściskanie, czyli zdolność przenoszenia obciążeń.

Podstawowe właściwości betonu komórkowego: gęstość objętościowa w stanie suchym - od 351 do 750 kg/m³; średnia wytrzymałość na ściskanie w stanie suchym - od 1,5 do 7,0 Mpa; obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła - od 0,125 do 0,20 W/mK.

Główne cechy betonu komórkowego to: dobre parametry cieplne, duża mrozoodporność, odporność na działanie pleśni i bakterii, duża wytrzymałość na ściskanie, łatwość w obróbce - można go ciąć np. piłką od drewna, duża odporność ogniowa - cztery godziny, krótki czas budowy. Negatywne cechy betonu komórkowego to: znaczna nasiąkliwość - wprawdzie jest bardziej odporny na zawilgocenie niż cegła, ale jeżeli nasiąknie, traci swoją wytrzymałość, schnie długo i jest nieodporny na przemarzanie; kruchość.

Drugim materiałem poddanym badaniom była cegła ceramiczna pełna (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Cegła ceramiczna pełna

Pozytywne cechy cegieł to: trwałość, powszechność stosowania, stabilna temperatura wnętrza (w ceglany domu wewnętrzna warstwa konstrukcyjna ze względu na dużą masę akumuluje i "zatrzymuje" dużo ciepła z ogrzewanego wnętrza budynku, a warstwa izolacyjna (zewnątrzna) jest skuteczną barierą dla jego odpływu. Charakteryzowana dużą ognioodpornością.

Nasiąkliwość cegły zgodnie z normami nie powinna być wyższa niż 24 %. Wytrzymałość na ściskanie 10 MPa. Gęstość pozorna 1700-1900 kg/m³. Współczynnik przewodności cieplnej 0,52-0,56 W/mK. Odporność na działanie mrozu po 25 cyklach zamrażania do -15 °C i odmrażania – brak uszkodzeń po badaniu.

Materiałem izolacyjnym poddanym badaniu był styropian (rys.4.3) czyli spieniony polistyren. Produktem wyjściowym do jego produkcji są perełki polistyrenu spienialnego. Pod wpływem temperatury perełki pęcznieją i skleją się ze sobą, tworząc strukturę komórkową. Podczas spieniania objętość styropianu powiększa się około 40-krotnie, a w porach materiału gromadzi się duża ilość gazu, (aż do 98 %), które jest najlepszym naturalnym izolatorem ciepła. Jednym z głównych atutów styropianu jest jego mała przewodność cieplna. Współczynnik przewodzenia ciepła zależy głównie od gęstości styropianu, temperatury i wilgotności. Im wyższa gęstość, tym mniejsza przewodność cieplna. Współczynnik przewodzenia ciepła dla styropianu waha się w granicach od 0,031 do 0,042 W/mK.



Rys. 4.3. Płyty styropianowe

Cechą pozytywną styropianu jest szeroka możliwość zastosowania recyklingu. Także istnieje bezpieczeństwo oraz łatwość obróbki i montażu, mała nasiąkliwość i stabilność wymiarowa.

Cechami negatywnymi styropianu jest to, że materiał nie jest odporny na działanie rozpuszczalników organicznych (benzen, toluen, aceton itp.). Także ma małą odporność na działanie wysokich temperatur.

Na końcu badań do obserwowanych materiałów budowlanych zostały dołączone płyty produkowane z silikatu wapiennego na bazie mineralnej. Kryształki silikatu tworzą mikroporowaty szkielet, co umożliwia uzyskanie wysokich właściwości kapilaryzacyjnych materiału. Materiał ten jest niepalny, bezemisyjny, a dzięki $\text{pH}=10$ ma właściwości antygrzybiczne. Produkcja i właściwości płyt są następujące. Piasek i wapno są naturalnymi surowcami używanymi do produkcji płyt klimatycznych. Podczas rozmulania ich w wodzie zachodzi reakcja, w wyniku której stają się one produktem wyjściowym silikatu wapiennego. Po nadaniu formy płyt i poddaniu ich procesowi autoklawizacji, drobne kryształki silikatu wapiennego poddane działaniu przegrzanej pary wodnej i wysokiego ciśnienia rosną, tworząc otwartą strukturę o bardzo drobnych i delikatnych porach. Powstaje przez to bardzo wysoka kapilaryzacyjna właściwość chłonna i ogromna zdolność przyjmowania wody, a także doskonała właściwość termoizolacyjna. Płyty są stabilne i samonośne.



Rys. 4.4. Silikat wapienny

Charakterystyki materiału są następujące: gęstość objętościowa 200-240 kg/m³, porowatość >90 %, współczynnik przewodzenia ciepła w stanie suchym 0,065 W/mK, wytrzymałość na ściskanie >1 MPa.

4.2. Opis technik pomiarowych stosowanych do badań cieplno-wilgotnościowych w porowatych materiałach budowlanych

Metoda grawimetryczna (susząrkowa) stosowana od wielu lat i już wprawie nazywać się metodą klasyczną. Polega na suszeniu materiału i mierzeniu ubytku masy. Jest to najbardziej rozpowszechniona metoda pomiaru wilgotności. W literaturze nie określono od kiedy jest stosowana, ale na dziś stosowana w różnych sferach, tj. energetyka, górnictwo, medycyna i in. Często korzystano jako metodę odniesienia do kalibracji i sprawdzania innych metod pomiarowych. Jest to metoda laboratoryjna, wymaga stacjonarnego oprzyrządowania, ale obserwuje dużą precyzję pomiarową. Jak wadę metody susząrkowej można wyodrębnić to, że jest ona niszcząca. Wymaga ona dużego pobierania próbek badanych materiałów. Oprócz tego jest niemięlna stacjonarna, trudno określić zmiany parametrów w czasie, to znaczy dynamikę procesów przenoszenia wilgoci w środku materiału [71].

Metody chemiczne umożliwiają oznaczenie całkowitej ilości wody, zarówno wolnej jak i związanej, charakteryzują się dość dobrą dokładnością i powtarzalnością wyników. Istnieje wiele chemicznych metod oznaczania wody, ale przy badaniach stosuje się głównie metodę Karla Fishera oraz metodę z węglikiem wapnia.

Metoda miareczkowania Karla Fischera oznaczania wody jest metodą chemiczną, w której wykorzystuje się reakcje zachodzącą pomiędzy wodą zawartą w próbce badanego

materiału, a niektórymi substancjami celowo do niej dodawanymi np. odczynnik Karla Fischera (metanолоwy roztwór jodu, dwutlenku siarki i pirydyny). Powstałe w wyniku tej reakcji związki oznacza się następnie ilościowo i przelicza na procentową zawartość wody w badanych materiałach. Jąką zaletę tej metody można określić to, że dla prowadzenia eksperymentu wystarcza małej ilości badanego materiału. Oprócz tego wśród chemików wyznana ona jaką bardzo dokładna metoda. Wadą jednak jest określona zawartość wody w próbce – do 10 mg i wielki wpływ warunków otoczenia na przepływ reakcji chemicznej [90].

Metoda karbidowa (w skrócie CM) wykorzystuje dobrze znany rozpad węgliku wapnia (karbidu) w wodzie. W wyniku reakcji powstaje acetylen, który powoduje wzrost ciśnienia w butli stalowej. Na podstawie zmierzonego ciśnienia i próbki testowanego materiału, odczytuje się zawartość wody w próbce z tabeli lub bezpośrednio z manometru. Główne zalety tej metody to prosta obsługa i możliwość przeprowadzenia szybkiego pomiaru. Metoda jest często stosowana w praktyce na placu budowy i zapewnia wiarygodne wyniki. Jest ona uznawana nawet przez rzeczoznawców, w przypadku spornych spraw [67]. Ale w zastosowaniach ta metoda jest stosunkowo droga, ze względu na duży koszt fiolek z karbidem. Oprócz tego, pod czas niskiej wilgotności próbek, metoda karbidowa wykazuje znaczne odbiegi w porównywaniu z metodą grawimetryczną [48].

Metoda papierków wskaźnikowych polega na zmianie zabarwienia papierka wskaźnikowego pod wpływem zawilgocenia materiału [48]. W literaturze budowlanej rzadko wspomina o tej metodzie, z czego robię wynik o niewielkim jej zastosowaniu.

W przypadku metody neutronowej pomiar jest realizowany w oparciu o zjawisko spowalniania szybkich neutronów przez atomy wodoru, tworzące cząsteczki wody w mierzonym produkcie. Koncentracja spowolnionych neutronów jest zależna tylko od ilości atomów wodoru i jest proporcjonalna do zawartości wody w produkcie. Układ pomiarowy składa się zawsze z jednostki sterującej, detektora He3 spowolnionych neutronów oraz źródła szybkich neutronów Be-Am. Źródło neutronowe i detektor są umieszczone w jednej obudowie i tworzą sondę pomiarową. Najczęściej stosowany jest układ pomiarowy z sondą zainstalowaną wewnątrz zbiornika, w rurze osłonowej. Warunkiem prawidłowego pomiaru jest zachowanie minimalnej ilości materiału w zbiorniku tak, aby sonda pomiarowa przez cały czas była otoczona produktem. Metoda neutronowa nadaje się do pomiaru produktów, które w swoim składzie chemicznym nie zawierają atomów wodoru lub cząstek wody. Metoda ta jest łatwa w użyciu i jest stosowana na placach budowlanych, na przykład korzystają z nią pod czas wykrywania nieszczelności hydroizolacji dachów płaskich. Ponadto, wadą tej metody jest czasochłonne wykonywanie pomiarów i opracowanie wniosków końcowych [1].

Metoda prześwietlania promieniowaniem γ polega na zmianie natężenia promieniowania γ po przejściu przez badany materiał. Jest ona bardzo popularną metodą badań „nieniszczących”. Wykorzystuje ona promieniowanie gamma i rentgenowskie. Oprócz

przenikliwości i zależności pochłaniania promieniowania od grubości materiału wykorzystuje się tu jeszcze jedno zjawisko fizyczne – zaczernienie błony fotograficznej pod wpływem promieniowania. Badany element umieszcza się między źródłem promieniowania a detektorem – błoną fotograficzną. Jeżeli jest on jednorodny, promieniowanie jest w nim pochłaniane w jednakowym stopniu i błona zostanie równomiernie zaczerniona. Jeżeli jest niejednorodny – promieniowanie jest pochłaniane w różnym stopniu i w różnym stopniu będzie zaczerniona błona fotograficzna. Metody jądrowe rozwijane w Polsce z lat 50-ch w dziedzinie geofizyki. W roku 1958 z inicjatywy prof. B. Rosińskiego z Instytutu Budownictwa PAN grupa pracowników Katedry Fizyki zajęła się tą nową dziedziną, doprowadzając w krótkim czasie do powstania radiometrycznych przyrządów pomiarowych własnej konstrukcji, pozwalających na pomiar ciężaru objętościowego gruntów sypkich w stanie nienaruszonym oraz ich wilgotności. Równocześnie na Politechnice Łódzkiej powstała Pracownia mająca za zadanie kalibrację sond geofizycznych do pomiarów ciężaru objętościowego i wilgotności gruntów dla celów geologii inżynierskiej. Szczególne zalety metody pomiaru są szybkość i wysoka precyzja pomiaru, niezależność wyniku od temperatury otoczenia. Do mankamentów należy zaliczyć spore koszty badań [13].

Magnetyczny rezonans jądrowy (MRJ) jest zjawiskiem fizycznym bazującym na magnetycznych właściwościach jader atomów. Polega na absorpcji fal elektromagnetycznych radiowej częstości w silnym zewnętrznym polu magnetycznym poprzez jadra posiadające niezerowy moment magnetyczny. Badanie odpowiedzi jader na wzbudzenie falami elektromagnetycznymi wykorzystywane jest w obrazowaniu MRI (Magnetic Resonance Imaging) oraz spektroskopii NMR (Nuclear Magnetic Resonance).

W warunkach praktycznych do najczęściej stosowanych należy zaliczyć metody elektryczne polegające na pomiarze rezystancji lub pojemności elektrycznej próbki wilgotnego materiału. Do zalet tych metod można zaliczyć odporność na działanie warunków środowiska. Ponadto cena układu pomiarowego jest względnie niska. Metody elektryczne pomiaru wilgotności materiałów opisane przez autorów [71] dają możliwość konstruowania tanich przyrządów przenośnych, dzięki którym jest możliwy pomiar wilgotności materiałów w naturalnym, pierwotnym miejscu bez potrzeby pobierania próbek i transportu ich do laboratorium.

Jedną z metod, którą można zaliczyć do metod elektrycznych jest powszechnie stosowana np. w medycynie metoda, o nazwie spektrometria impedancyjna. Spektrometria impedancyjna polega na pomiarze impedancji badanego obiektu. W przypadku gdy mierzony obiekt posiada właściwości charakterystyczne dla czynnej rezystancji (reaktancji), jego impedancja będzie zmieniała się wraz ze zmianą częstotliwości napięcia przyłożonego do mierzonego obiektu. Badania polegające na pomiarze zmian impedancji obiektu dla wybranego zakresu częstotliwości nazywamy spektrometrią impedancyjną. Otrzymane w

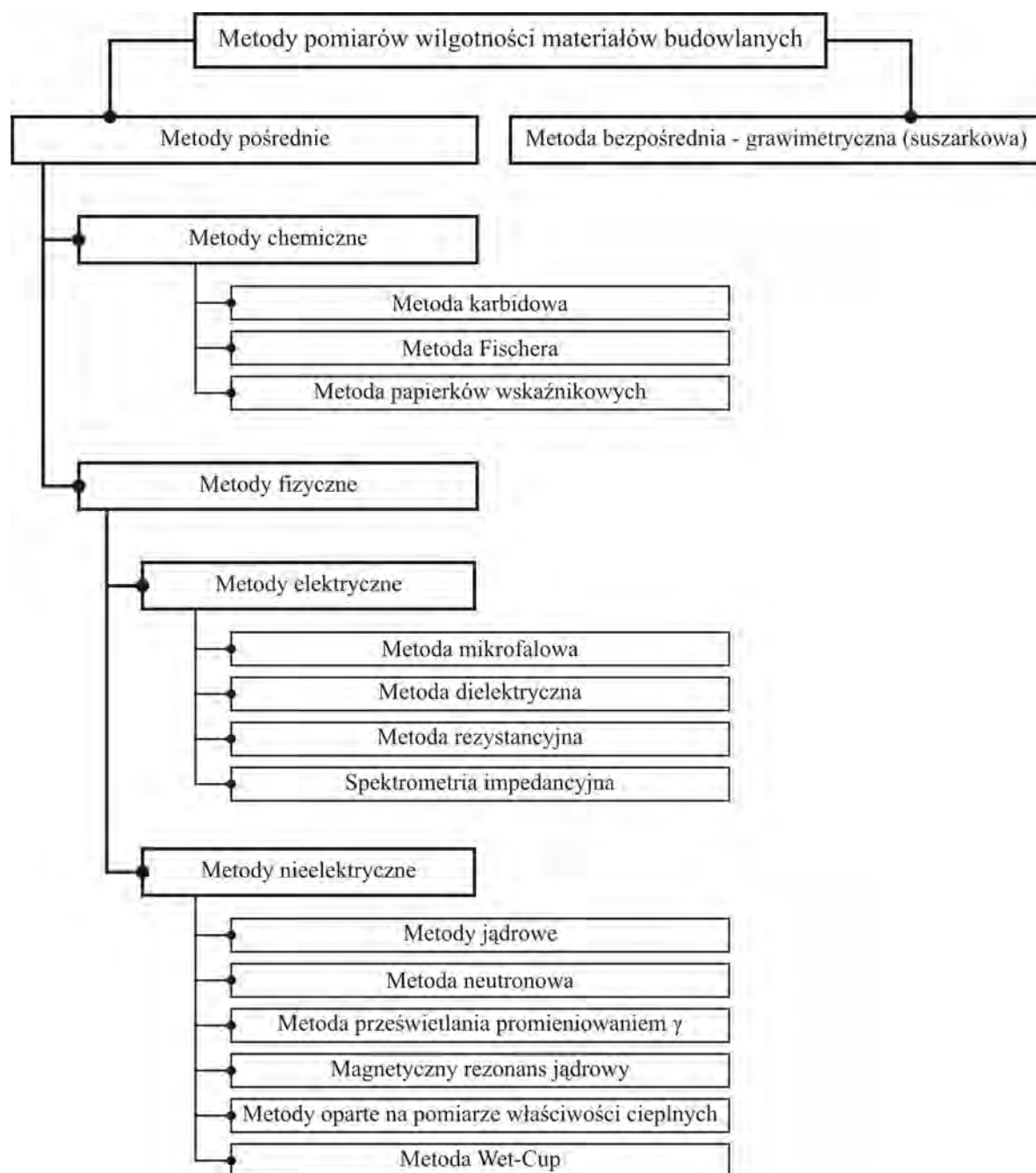
pracy [114] wyniki pokazują pomiar wilgotności na poziomie dokładności 1,6 % wilgotności względnej.

Pomiar mikrofalowy oparty jest na tym, że mierzona grubość materiału jest przenikana przez mikrofałe. Mikrofałe wprawiają swobodne molekuly wody, (nie związane z suchą substancją) w rotacje lub drgania, w zależności od polaryzacji pola elektromagnetycznego. Prędkość rozprzestrzeniania się mikrofal maleje, a ich natężenie spada. Zasada pomiaru jest oparta na efekcie fizycznym: przesunięcia fazowego (redukuje się prędkość propagacji w przypadku wysokiej stałej dielektrycznej) oraz tłumienia (zmniejsza się natężenie fali poprzez straty dielektryczne) fal elektromagnetycznych przechodzących przez wilgotny materiał. Metoda mikrofalowego przesunięcia fazowego jest bardziej dokładna niż metoda tłumienia. W przeciwieństwie do pomiaru tłumienia, pomiar fazowy jest mniej wrażliwy na takie czynniki jak temperatura materiału, zawartość soli (przewodzenie elektrolityczne) oraz wielkość granulacji. Ponadto pomiar fazowy jest mniej podatny na zakłócenia oraz mniej narażony na zakłócenia związane z odbiciami. Ograniczenia tej metody: słabo związana woda może być wykryta w zależności od siły wiązania. Tak więc efekt pomiaru może być zależny od rozkładu granulacji oraz od właściwości chemicznych produktu poddanego pomiarowi, zakładając, że zmieniają one wiązanie wody ze stałym materiałem. Ściany wykonane z plastiku, gumy lub materiałów izolujących o małej stałej dielektrycznej prawie wcale nie wywierają efektu na pomiar, jednak że są one kalibrowane na stałym poziomie. Lód oraz zmrożona woda nie mogą podlegać pomiarowi, gdyż molekuly wody nie mają swobody poruszania się; materiały przewodzące takie jak grafit lub koks nie mogą być przenikane przez mikrofałe, podobnie jak metalowe ściany [45].

Metoda rezystancyjna opiera się na pomiarze rezystancji materiału, która uzależniona jest od zawartości wody w materiale. Woda zawarta w materiale w połączeniu z elektrolitami przewodzi prąd elektryczny. W zależności od ilości wody w materiale różna jest rezystancja i na tej podstawie można określać wilgotność materiału. Niestety rezystancja materiału zależy również od składu chemicznego wody jaka znajduje się w materiale, co zawęża zakres pomiarowy od góry oraz wpływa na błędy pomiaru np. w przypadku nadmiernego zasolenia materiału. Metoda rezystancyjna bardzo dobrze sprawdza się w pomiarze wilgotności drewna i materiałów drewnopochodnych. W dość szerokim zakresie pomiarowym wilgotność drewna zależy prawie liniowo od logarytmu z rezystancji. Trudnością elektroniczną jest w tym przypadku pomiar bardzo dużych rezystancji np. aby osiągnąć zakres 5 % wilgotności potrzeba mierzenia rezystancji na poziomie 100GΩ. Dla wielu materiałów metoda rezystancyjna dobrze nadaje się do stwierdzania stanu suchości – nawet materiał, który zawiera w sobie wodę silnie przewodzącą staje się izolatorem po wysuszeniu [71].

Metoda dielektryczna polega na pomiarze przenikalności dielektrycznej materiału, która zależy od zawartości wody w materiale. Dipolowa budowa cząsteczek wody powoduje, że jej przenikalność dielektryczna ma znacznie większą wartość niż pozostałych składników materiału (w temperaturze pokojowej przenikalność dielektryczna wody wynosi około 81, a np. dla drewna 2-7). Mierząc przenikalność materiału w sposób pośredni możemy ocenić ilość wody w materiale. Są dwa zasadnicze sposoby pomiaru stałej dielektrycznej – w dziedzinie czasu – metoda TDR (ang: *Time Domain Reflectometry*) oraz w dziedzinie częstotliwości FD (ang: *Frequency Domain*). W metodzie TDR przenikalność dielektryczna wyliczana jest na podstawie pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu utworzonego z elektrod przewodzących prąd elektryczny, tworzących sondę pomiarową umieszczoną w badanym materiale. Przenikalność dielektryczna warunkuje prędkość propagacji w takim falowodzie. Na podstawie pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego można ocenić wilgotność materiału. W metodach FD przewodzące elektrody umieszczone w materiale traktuje się jako okładki kondensatora, którego dielektrykiem jest mierzony materiał. Wartość przenikalności dielektrycznej materiału wpływa na pojemność tak utworzonego kondensatora. Pomiar tej pojemności pozwala na ocenę wilgotności materiału (rozdz. 4.3).

Metoda Wet-Cup jest rozpowszechnianą technikę do wyznaczenia współczynnika dyfuzji pary wodnej [75], która pozwala określić ten parametr w przypadku stacjonarnym. Pomiar polega tu na określeniu strumienia pary wodnej, przepływającego przez próbkę badanego materiału umieszczoną wraz z naczyniem z wodą w komorze klimatycznej. W czasie badania pomiarowi podlegają ubytki masy zestawu, na skutek odparowywania wody z naczynia, odczytywane w określonych przedziałach czasowych. Współczynnik dyfuzji wyznaczany jest w tej metodzie za pomocy prawa Ficka.



Rys. 4.5. Metody pomiarów wilgotności materiałów budowlanych

Istotę pomiarów wartości cieplnych opisać można na dwa różne sposoby, które wzajemnie się uzupełniają. Z jednej strony pomiary polegają na możliwie ścisłym zdefiniowaniu rozpatrywanego ośrodka i warunków w jakich się on znajduje oraz określeniu wartości współczynnika λ z określonym błędem pomiaru. Z drugiej strony można stwierdzić, iż eksperymentalne wyznaczanie wartości cieplnych polegają w ogólności na rozwiązaniu zagadnienia brzegowego dla badanej próbki, a następnie w oparciu o temperatury zmierzone w ściśle określonych punktach rozpatrywanej próbki, obliczeniu współczynnika λ . W

badanym ośrodku wprowadza się zaburzenie termiczne i obserwuje się pole temperatury. Wyznaczanie przewodności cieplnej polega więc na rozwiązaniu zagadnienia inwersyjnego przewodzenia ciepła – znane jest pole temperatury i warunki brzegowe, a wyznacza się własności ośrodka w którym odbywa się przewodzenie. Jeśli rozważane zagadnienie brzegowe dotyczy stanu ustalonego, mówimy wtedy o stacjonarnych metodach pomiarowych. W przypadku, gdy podczas pomiarów rozpatruje się nieustalone zagadnienie brzegowe, mamy wtedy do czynienia z metodami niestacjonarnymi (dynamicznymi).

Metody stacjonarne charakteryzują się stosunkowo wysoką dokładnością, jednak posiadają jedną bardzo istotną wadę. Jest nią mianowicie bardzo długi czas pomiarów, dochodzący nawet do kilkunastu godzin. Jednak, pomimo tego, są to metody wzorcowe. Główne trudności przy stosowaniu tych metod sprowadzają się do utrzymania założonych warunków brzegowych na powierzchniach próbki.

Metody dynamiczne charakteryzują się krótkimi czasami badań, jednak dokładność uzyskiwanych wyników nie jest zbyt wysoka. Należy jednak podkreślić, że istnieje możliwość wielokrotnego obliczania wartości współczynnika λ na podstawie jednego pomiaru niestacjonarnego. Wymaga to jednak bardziej rozbudowanego aparatu matematycznego.

Najstarszą metodą pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła jest zaproponowana przez Poensgena metoda płyty, polegająca na umieszczeniu badanego materiału w formie płyty pomiędzy powierzchniowym źródłem ciepła i powierzchnią chłodzącą. Zasada działania przyrządu polega na przepuszczaniu przez próbkę określonego strumienia ciepła, zmierzeniu różnic temperatur powstałych przy ustalonym przepływie ciepła na powierzchniach doprowadzenia i odprowadzenia ciepła. Powstało wiele różnych typów i odmian aparatu Poensgena. Rozwiązania te różnią się sposobami zapewnienia przechodzenia przez badaną próbkę całej energii cieplnej wydzielanej w grzejniku oraz sposobem zapewnienia jednowymiarowego przewodzenia ciepła.

W przypadku pomiarów metodą osłoniętej płyty grzejnej wartość oporności cieplnej R mierzy się z zastosowaniem aparatu dwupróbkowego, składającego się z elementów grzejnych i chłodzących. Element grzejny umieszczony jest między dwiema próbkami. Ciepło przepływa przez próbki do elementów chłodzących. Mierzymy moc dostarczaną do centralnej części elementu grzejnego.

Oddzielnie można wynieść metody porównawcze, na przykład metodę Christiansena. Jest to metoda, w której porównuje się współczynniki przewodzenia ciepła badanego materiału ze współczynnikiem innego (wzorcowego) materiału, dla którego wartość λ jest znana. Tym samym mierzenie ilości ciepła nie jest konieczne. Zasada tej metody jest następująca: dwie płytki zrobione z materiałów o współczynnikach λ (znany) i λ (nieznany) umieszcza się między równoległymi ściankami o różnych temperaturach, które nie ulegają

zmianie w czasie doświadczenia. Jeśli grubości płytek są małe (w porównaniu z ich powierzchnią), to w ich środkowej części strumień cieplny jest prostopadły do powierzchni i nie zależy od obecności bocznych granic (brzegów płytek). Dla cienkich płytek powierzchnia obszaru niezakłóconego strumienia bliska jest całkowitej powierzchni płytki i z dużą dokładnością może być do niej przyrównywana.

Metoda lambda kalorymetru polega na tym, że próbka materiału umieszczona jest w kalorymetrze, który po uprzednim nagraniu poddaje się chłodzeniu. Bada się tempo chłodzenia kalorymetru mierząc w określonych przedziałach czasowych różnicę pomiędzy chłodzonym ciałem a powietrzem. Stąd otrzymuje się tempo chłodzenia i na bazie teorii uporządkowanego przepływu ciepła wyznacza się współczynnik przewodzenia ciepła. Metoda ta wymaga znajomości dyfuzyjności cieplnej i ciepła właściwego materiału lub współczynnika wnikania ciepła. Wielkości te wyznacza się w odrębnym badaniu umieszczając ten sam kalorymetr w cieczy.

Metoda gorącego drutu polega na tym, że w próbce badanego materiału umieszcza się drut o określonej oporności przez który przepuszcza się prąd stały o znanym natężeniu. Przepływ prądu powoduje wzrost temperatury w drucie, który staje się liniowym źródłem ciepła w badanym materiale. Przyrost temperatury w czasie mierzy się w zależności od przyjętej odmiany tej metody badawczej albo na samym drucie albo w dobrze określonej od niego odległości.

Za pomocą metody fali cieplnej bezpośrednio mierzy się dyfuzyjność cieplną. Znając ten parametr oraz gęstość i ciepło właściwe badanego ośrodka można wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła. W badanej próbce posiadającej kształt długiego pręta generuje się falę cieplną przez cykliczne zmiany temperatury na brzegu. Poprzez zmierzenie temperatury przynajmniej w dwóch punktach próbki, określa się charakterystyczne parametry fali oscylacji temperatury: intensywność jej tłumienia oraz przesunięcie fazowe sygnałów.

Metoda impulsu laserowego jest odmianą metody fali cieplnej, która znajduje zastosowanie dla materiałów o dużym współczynniku przewodności cieplnej oraz gdy wymagane są niewielkie rozmiary próbek i szybki czas pomiaru. Badany materiał w kształcie płyty doprowadza się do temperatury pomiaru, a następnie na górę płyty skierowuje się krótki impuls świetlny o określonej energii z lasera bądź z lampy błyskowej. Ciepło rozchodzi się w materiale powodując wzrost temperatury po drugiej stronie powierzchni płyty, gdzie jest ona mierzona za pomocą czujnika podczerwieni. Dzięki znajomości zależności wzrostu temperatury w czasie, wyznacza się dyfuzyjność cieplna materiału.

Spotykana także w literaturze [58] dynamiczna metoda pomiaru właściwości cieplnych na podstawie mierzenia siły termoelektromotorycznej. Ogranicza ona jednak współczynnik przewodzenia ciepła o rzędzie 0,1 W/mK.



Rys. 4.6. Metody pomiarów cieplnych materiałów budowlanych

W ostatnich latach w Polsce wielu naukowców zajmują się badaniami materiałów budowlanych w kierunku ich charakterystyk cieplno-wilgotnościowych. Dużo prac laboratoryjnych wykonano w temacie badań obiektów zabytkowych. W tym kierunku wyodrębniano niektóre właściwości materiałów budowlanych i określano ich wpływ na długotrwałość konstrukcji, wykonanie przez nich funkcji ochrony cieplno-wilgotnościowej i in. W 2006 r. we Wrocławiu wydany został zbiór prac pod tytułem „Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych”. Można wymienić pracę [120], w której badano zależność wytrzymałości na ściskanie od wpływu cyklicznych procesów nawilgacania i wysychania w obecności NaCl dla budowlanych materiałów ceramicznych. Do znalezienia wartości wilgotnościowych wykorzystano metodę grawimetryczną. W pracy [12] wykonane badania stopnia zawilgocenia kamienia metodą grawimetryczną oraz zasolenia przy pomocy testów Merck dla określenia skuteczności powłoki hydrofobizacyjnej, która ma spełniać funkcję ochrony wilgotnościowej murów. Były zrobione zdjęcia mikroskopowe materiałów, charakteryzowana ich struktura, wykonane obliczenia porozymetryczne. Inne badania w tym kierunku [12] obejmują analizę ilościową i jakościową mikroflory pleśniowej w zależności od różnych źródeł zawilgocenia „starych” murów. Parametry wilgotnościowe zmierzone nie były, lecz wymienione zostały cztery rodzaje zawilgocenia ścian w różne pory roku i ich wpływ na zagrzybienie przegród. Praca [9] pokazuje próby odnalezienia parametrów wilgotnościowych murów ceglanych metodą impedancji tomograficznej. Był zaproponowany skomplikowany układ pomiarowy i otrzymane wzory rozkładu potencjałów na powierzchni przegrody. Jest to metoda nieniszcząca, ale wymagająca wzorcowania dla każdego obiektu pomiarów.

4.3. Metodyka badań

W pracy zawartość wody w materiałach budowlanych wyznaczano przy użyciu laboratoryjnego zestawu TDR (Time Domain Reflectometry) do pomiaru wilgotności, potencjału wody, temperatury i zasolenia, stosując metodę profili chwilowych (Instantaneous Profile Method - IPM) [4, 7, 17, 22, 25, 42, 43, 68, 70, 78–80, 84, 92, 98, 109, 113, 115, 117, 126]. Metoda TDR znalazła bardzo szerokie zastosowanie przy modelowaniu właściwości gleb, a także przy diagnostyce i poszukiwaniu uszkodzeń kabli. W świecie badania materiałów budowlanych za pomocą metody TDR są prowadzone w Niemczech przez zespół pod kierownictwem J. Grunewalda [35, 36, 77] i w Czechach przez zespół R. Cerny [72]. W Polsce metoda TDR stosowana była do badania przenoszenia masy i energii w środowisku glebowym (Usowicz [116], Sławiński [105], Sobczuk [106], Walczak [118]). Z powodu specyfiki i różnorodności materiałów budowlanych metoda ta jest rozwijana w zastosowaniu do ich badania.

Aparat TDR mierzy odstęp czasu między impulsem wysłanym a jego echem, czyli odbiciem sygnału od nieciągłości struktury ośrodka. Elektromagnetyczny impuls jest wysyłany wzdłuż sondy (pojedynczej lub podwójnej) z prędkością światła w danym ośrodku i z częstotliwością ok. jednego miliona mikro-impulsów na sekundę. W momencie, kiedy impuls dotrze do powierzchni próbki, następuje jego częściowe odbicie i powrót do przetwornika. Ponieważ fala rozchodzi się w powietrzu ze znaną prędkością, czas jej przelotu podzielony przez 2 dokładnie odpowiada odległości kołnierza przetwornika od powierzchni medium. Amplituda odbitego impulsu zmienia się proporcjonalnie do zmian stałej dielektrycznej mierzonego medium. Im wyższa stała dielektryczna medium, tym silniejsze będzie odbicie fali od jego powierzchni. Ponieważ technika TDR korzysta wyłącznie z czasu przelotu, a nie z amplitudy impulsu, dlatego zmiany stałej dielektrycznej nie mają wpływu na dokładność pomiaru. Jest to bardzo ważna cecha przy pomiarze w materiałach o zmieniającej stałej dielektrycznej.

To, że stała dielektryczna wody równa się $\epsilon \approx 80$, a dla innych komponentów materiału budowlanego - dla powietrza $\epsilon \approx 1$, dla fazy stałej $\epsilon \approx 3 \div 5$ powoduje, że pomiar stałej dielektrycznej jest dobrą podstawą do wyliczania zawartości wody w materiale.

Właściwości materiału budowlanego, wpływające na rozprzestrzenianie się fal elektromagnetycznych to prędkość v i tłumienie impulsu α [115]:

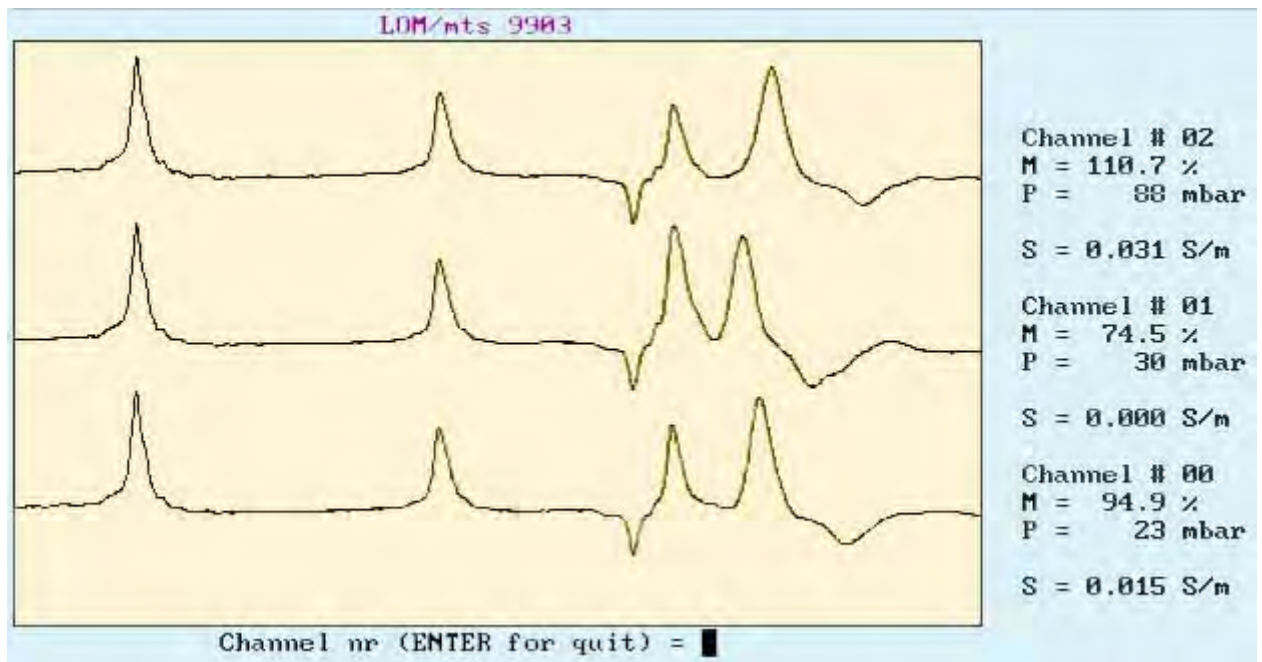
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{2L}{t} \quad (4.1)$$

Skąd:

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{ct}{2L} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{60\pi(\omega\varepsilon_0\varepsilon' + \sigma_0)}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (4.3)$$

gdzie c – prędkość fal EM w przestrzeni wolnej (próżnia), ε – względna stała dielektryczna, otrzymana przez TDR, L – długość linii transmisyjnej w próbce, t – czas przelotu fali EM w materiale, ω – częstotliwość fali, ε' – urojona składowa względnej stałej dielektrycznej, σ_0 – niezależna od częstotliwości składowa przewodnictwa elektrycznego w objętości materiału, ε_0 – stała dielektryczna w próżni. Stosując równania (4.1), (4.2) i (4.3) zawartość wody i objętościowe elektroprzewodnictwo można znaleźć za pomocą analizy reflektogramu TDR (rys. 4.7). Prowadząc pomiary TDR w materiale budowlanym wielkość ε' można pominąć jako nie wpływającą na wynik.



Rys. 4.7. Reflektogram TDR

Na rys. 4.7 przedstawiono reflektogram w przypadku użycia impulsu szpilkowego (needle pulse). Tak, można kontrolować przejście impulsu w miejscu zainstalowania czujki. Na rys. 4.7 obserwujemy wykresy kanałów 0, 1 i 2 reflektogramu TDR.

Czas przebiegu impulsu odczytany z przebiegu sygnału składa się z dwóch części:

- czasu martwego sondy (rys. 4.8) t_0 , gdy impuls przebiega przez wewnętrzne elementy sondy;
- czasu przelotu impulsu przez badany ośrodek t_w , czyli:

$$t = t_0 + t_w \quad (4.4)$$

Czas przelotu impulsu do końca czujnika i z powrotem dla sondy o długości L wynosi:

$$t_w = \frac{2L}{v} = \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon} \quad (4.5)$$

$$t = t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon} \quad (4.6)$$

Zawartość wody można wyznaczać z czasu pomiędzy odbiciami na reflektogramie ze wzoru [115]:

$$\theta = 0,115 \frac{t_s}{t_{air}} - 0,176 \quad (4.7)$$

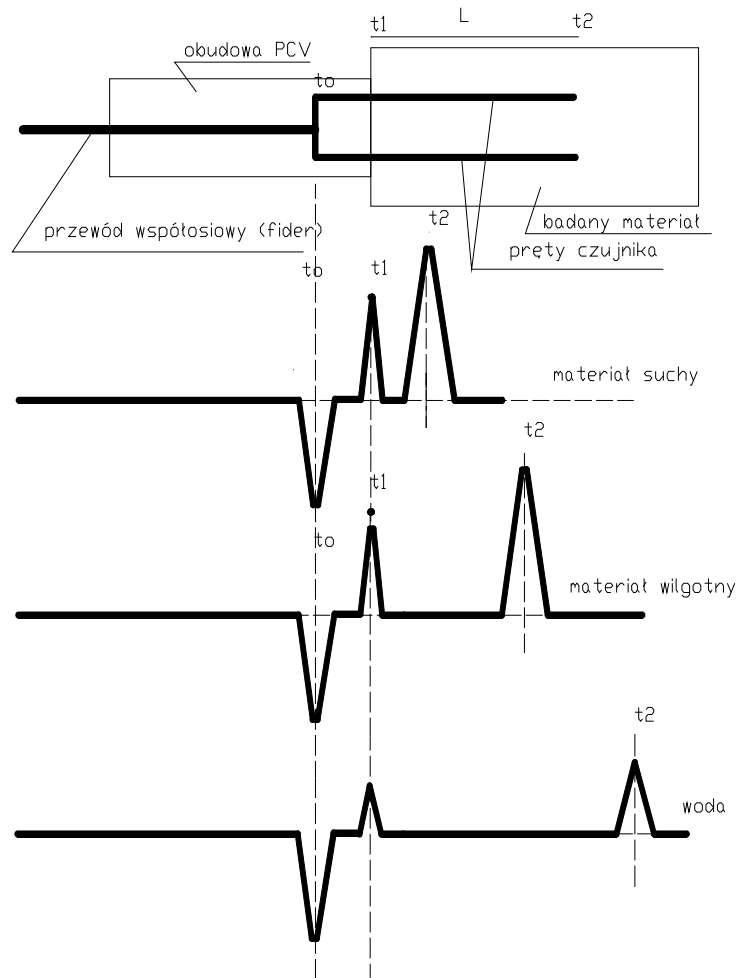
Objętościowe przewodnictwo:

$$\sigma_0 = \frac{\epsilon_0 c}{L} \frac{Z_0}{Z_i} \left(\frac{2V_0}{V_f} - 1 \right), \text{ Sm}^{-1} \quad (4.8)$$

Wyniki badań i analizy pokazały, że $\sqrt{\epsilon}$ jest często funkcją liniową zawartości wody.

Aparat TDR użyty do pomiarów wykorzystuje impuls szpilkowy (needle pulse) i wyświetla informację graficznie w formie wykresu. Odczyt czasu następuje automatycznie w wyniku analizy przebiegu krzywej TDR a wynik wyświetlany jest na ekranie i przekazywany do komputera zewnętrznego. Rys. 4.8 przedstawia uzyskiwane, prawidłowe reflektogramy dla próbek materiału o różnej wilgotności, widać, jak różni się charakter tych wykresów.

Na rys. 4.8 przedstawiono reflektogramy TDR dla trzech ośrodków o różnej zawartości wody. Górny reflektogram przedstawia przebieg impulsu dla ośrodka całkowicie suchego. Pierwsze dwa piki, które pojawiają się na reflektogramie są zawsze stałe. Są to piki kontrolne, służące do kalibracji przyrządu i są rezultatem zmian impedancji na skutek celowego umieszczenia przewodu kontrolnego o określonej charakterystyce i długości. W rzeczywistości te dwa odbicia stanowią miarę czasu, która jest niewrażliwa na zmiany temperatury otoczenia i własności przyrządu. Kolejne dwa piki to rezultat zmian impedancji układu na skutek wejścia przewodu do ośrodka porowatego (początek sondy), oraz wyjścia z tego ośrodka (powrót do aparatu). W materiale całkowicie suchym, którego stała dielektryczna jest bardzo niska, czas przemieszczania się impulsu jest bardzo krótki, czego skutkiem jest niewielka odległość pomiędzy szczytami pików.



Rys. 4.8. Przykłady reflektogramów TDR dla materiału o różnej wilgotności: 1 – suchy materiał budowlany, 2 – wilgotny materiał budowlany, 3 – woda

Środkowy reflektogram reprezentuje materiały częściowo nasycone wodą. Stałą dielektryczną materiałów wilgotnych można wyrazić za pomocą formuły mieszania, którą wyraża poniższe równanie:

$$\epsilon = \epsilon_s^{\theta_s} \epsilon_p^{\theta_p} \epsilon_w^{\theta_w} \quad (4.9)$$

gdzie ϵ – stała dielektryczna ośrodka trójfazowego, ϵ_s , ϵ_p , ϵ_w – odpowiednio stałe dielektryczne fazy stałej, powietrza i wody, θ_s , θ_p , θ_w – objętościowa zawartość każdej z faz.

Wzrost stałej dielektrycznej ośrodka powoduje spadek prędkości i wydłużenie czasu propagacji impulsu, czego rezultatem jest wydłużenie czasu przejścia impulsu.

Natomiast dolny reflektogram odpowiada wodzie, dla której wartość stałej dielektrycznej jest największa. Czas przejścia impulsu przez taki ośrodek jest największy, stąd największa jest różnica pomiędzy dwoma pikami oznaczającymi przejście impulsu wzdłuż sondy.

Przed badaniami wykonano kalibrację sond [8]. Dla kalibracji zawartości wody zmierzono wilgotność suchego piasku i wody i proporcjonalnie wyliczano przyrost czasu propagacji przypadający na 1 % wilgotności. Po otrzymaniu pierwszych wyników okazało się, że piasek dla tego celu nie może służyć, gdyż wpływ jego stałej dielektrycznej powoduje, że wilgotność wyliczona dla materiału o mniejszej gęstości spada poniżej zera. Zdecydowano, więc użyć do kalibracji mierzonego materiału budowlanego, w tym przypadku suchego belitu.

Dla znalezienia procentowej wilgotności w zależności od gęstości materiału budowlanego można także korzystać ze wzoru Malickiego, który został przetestowany dla gleb mineralnych o różnej gęstości [73]. Ze względu na strukturalne podobieństwo materiałów, wzór ten może być stosowany także do materiałów budowlanych:

$$\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,82 - 0,17\rho - 0,16\rho^2}{7,2 + 1,2\rho} 100\% \quad (4.10)$$

Problemem do obliczeń wilgotności z tego wzoru jest to, że trzeba mierzyć masę próbek dla określenia gęstości materiału, zaletą jest jednak wyższa dokładność.

Wzór, zaproponowany przez Toppa [115] możemy wykorzystać w naszych warunkach bez potrzeby mierzenia masy, rezygnując z wysokiej dokładności metody TDR:

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (4.11)$$

Do mierzenia wilgotności próbek wykorzystano sondę LP/mts (rys. 4.9) o średnicy prętów równej 2,0 mm. W próbkach wykonano pary otworów wiertłami o średnicy 2,2 mm. Sonda, składająca się z dwóch nieizolowanych prętów o długości 10 cm, była instalowana w tych otworach tak, by uniknąć szczeliny powietrznej pomiędzy próbką i sondą. W próbkach jednocześnie zainstalowano po cztery sondy.



Rys. 4.9. Sonda LP/mts (moisture, temperature, salinity) do mierzenia zawartości wody, temperatury i zasolenia materiałów porowatych TDR

Zmierzone wartości były automatycznie rejestrowane przez system komputerowy sterujący urządzeniami.

W pracy przeprowadzono również porównywanie otrzymanych wyników wilgotności. Porównywanie było zrobiono za pomocą metody wagowej.

Wilgotność masowa θ_m materiału wynosi:

$$\theta_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} 100 \quad (4.12)$$

gdzie m_w - masa próbki materiału wilgotnego, m_s – masa próbki materiału suchego.



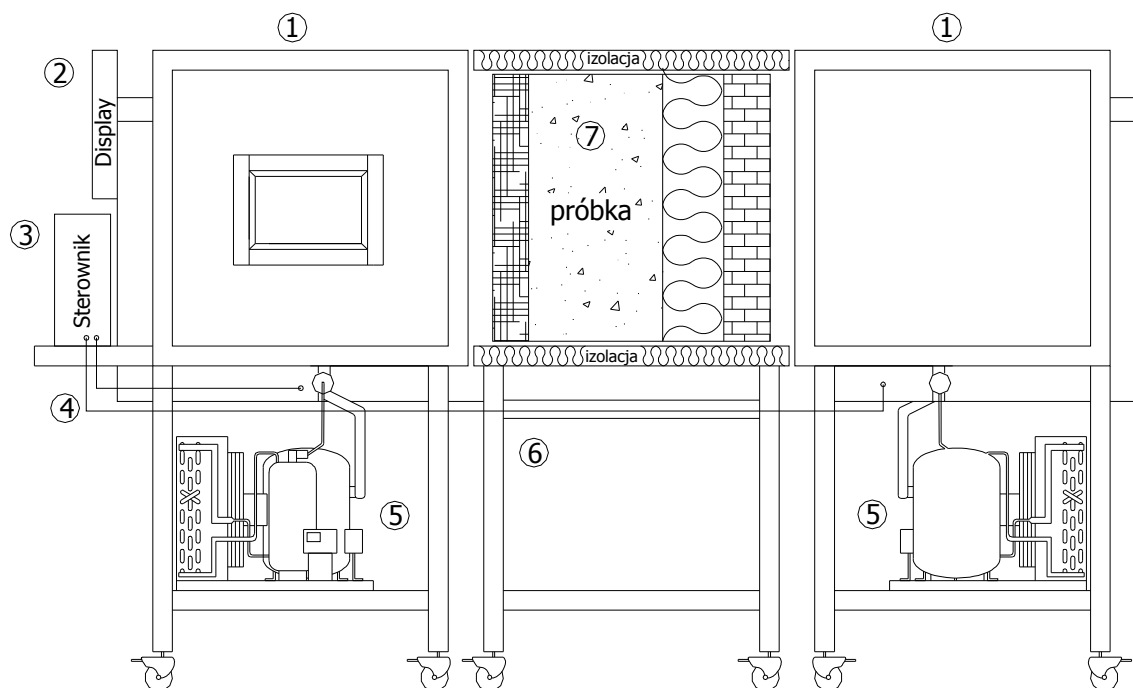
Rys. 4.10. Wyznaczanie wilgotności materiału za pomocą metody wagowej

Wyniki pomiarów wilgotności metodą TDR i wagową (na początku i na końcu badań) (rys. 4.10) nie przekraczają błędu 1 %.

4.3. Zestaw komór klimatycznych

Komora klimatyczna została zaprojektowana w ten sposób, aby możliwe było dwojakie jej użycie: po pierwsze jako urządzenia do wymuszania termicznych i wilgotnościowych warunków brzegowych w doświadczeniach na próbkach materiałów budowlanych i strukturach budowlanych, a po drugie, każda z dwu części komory może być używana niezależnie do realizacji cykli temperaturowych przy badaniu próbek materiałów. Komora składa się z dwu podobnych części, z których jedna posiada sterownik komputerowy a druga jest sterowana zdalnie przez ten sterownik. Poza tym obie części komory mają te same możliwości w zakresie realizacji cyklu temperaturowego. Zakres temperatur obliczeniowych sięga od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$, z niezależnym, ciągłym sterowaniem temperaturą przez sterownik komputerowy, z zadaniem przebiegiem temperatury. Ważnym celem osiągniętym w projekcie jest uzyskanie możliwości symulacji dobowych przebiegów temperatury symulujących zewnętrzne i wewnętrzne zmiany temperatury w budynkach tak, aby próbka badana podlegała zbliżonej do naturalnej zmianie temperatur.

Rys. 4.11-4.12 pokazują schematycznie budowę komory klimatycznej.

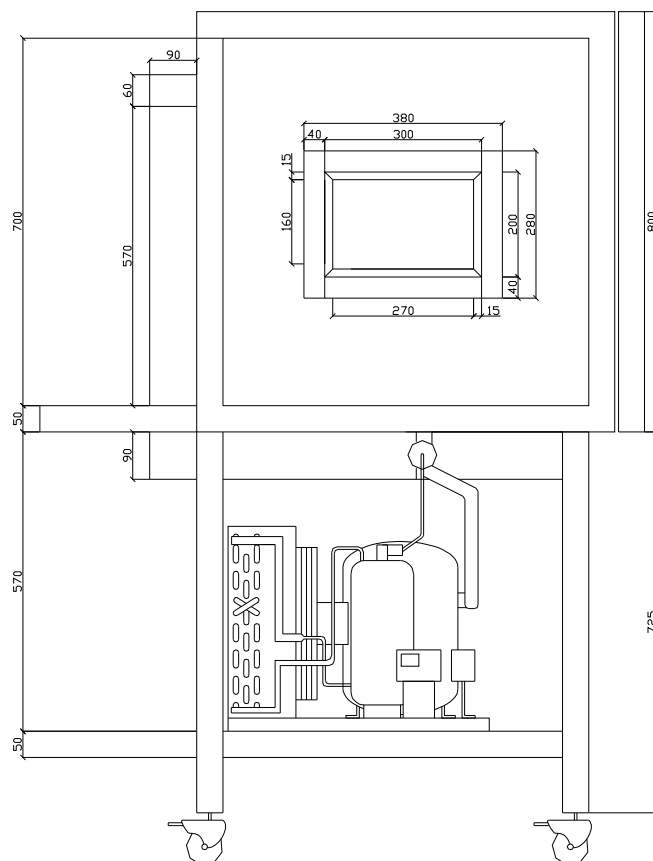


Rys. 4.11. Schemat ideowy zestawu komory klimatycznej z urządzeniami sterującymi [107]

1. Komora klimatyczna z profili aluminiowych skonstruowana w systemie KANYA. Grubość ścianki 5 cm, ścianka wypełniona wełną mineralną o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda=0,035 \text{ W/(m K)}$.
2. Display - wyświetlacz ciekłokrystaliczny Samsung SyncMaster o przekątnej 15”.
3. Sterownik – komputer klasy PC pod kontrolą systemu operacyjnego FreeBSD (UNIX) wyposażony w oprogramowanie sterujące układem chłodniczo-grzewczym oraz urządzeniami pomiarowymi (aparatura TDR, psychrometr, termometry). Komunikacja odbywa się za pomocą trzech portów szeregowych (RS-232), portu równoległego.
4. Przewody sterujące łączące sterownik z poszczególnymi urządzeniami komór klimatycznych.
5. Zestaw chłodniczo-grzewczy firmy Danfoss do generowania warunków klimatycznych panujących wewnątrz komory. Zakres temperatur od -20° C do $+50^{\circ} \text{ C}$.
6. Stolik z profili aluminiowych charakteryzujący się zmienną geometrią (możliwość regulacji szerokości) umożliwiającą umocowanie i ustawienie

próbek przygotowanych do badań wilgotnościowo-ciepłych przegród budowlanych o różnej grubości.

7. Próbkę materiału budowlanego lub fragment rzeczywistej przegrody budowlanej zaizolowana od zewnątrz materiałem izolacyjnym (styropian lub pianka poliuretanowa).



Rys. 4.12. Komora klimatyczna z zestawem chłodniczo-grzejnym (widok z boku od strony wziernika, wraz z wymiarami) [107]

Poniżej przedstawiono zdjęcia (rys. 4.13-4.15) pomieszczenia laboratorium i oddzielnych aparatów pomiarowych.



Rys. 4.13. Zestaw sterujący komory klimatycznej (komputer PC+display)



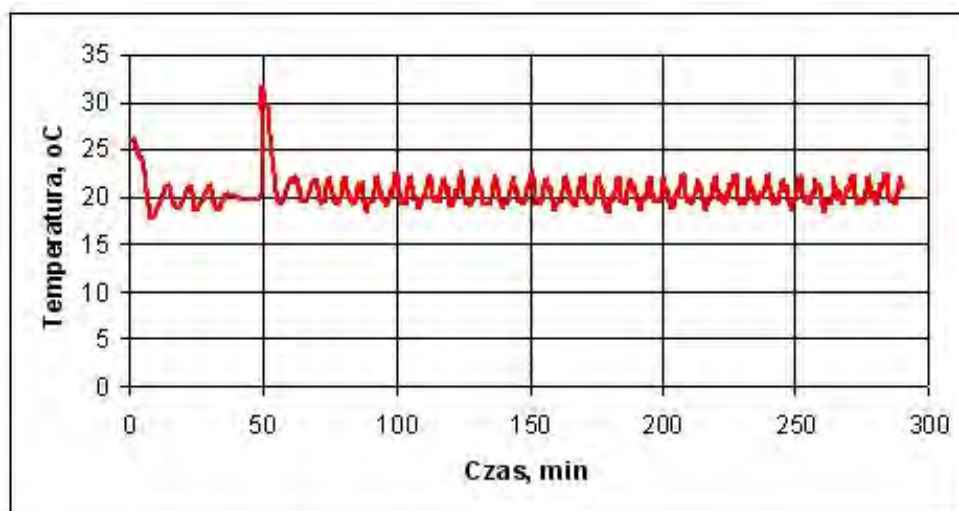
Rys. 4.14. Zestaw chłodniczo-grzewczy (Danfoss)



Rys. 4.15. Zestaw TDR współpracujący z komorą

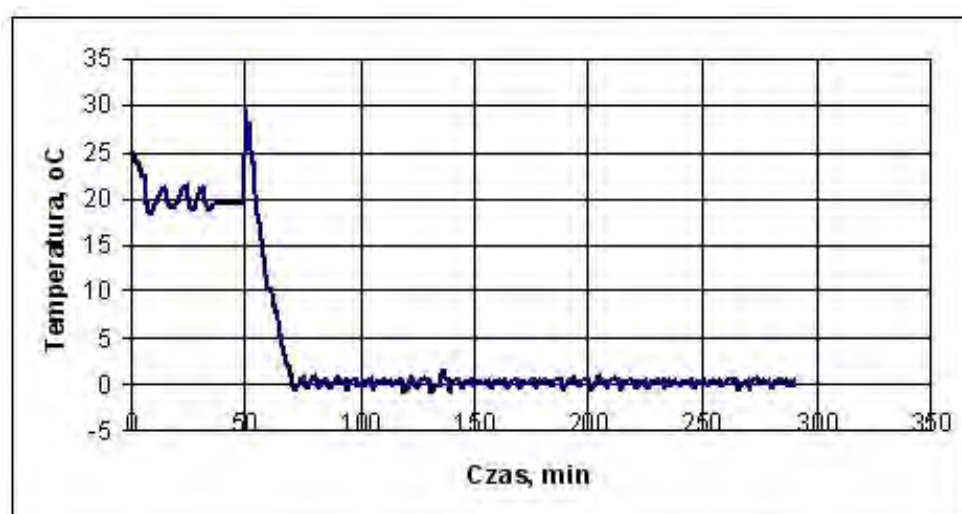
Komora klimatyczna wraz z elementami sterowania przedstawiona jest na powyższych fotografiach. Po środku znajduje się mierzona struktura budowlana zabezpieczona przed wpływem z zewnątrz przez warstwę izolacyjną styropianu.

W części eksperymentalnej zadawano warunki temperaturowe z jednej i drugiej strony przegrody budowlanej.



Rys. 4.16. Przebieg temperatur w komorze 1

Temperaturę w komorze nr 1 ustawiono na 20,5°C, co przedstawia rys. 4.16. Nierównomierny charakter wykresu spowodowany wyłączeniem i włączeniem aparatury komór, podtrzymującej stałą temperaturę.

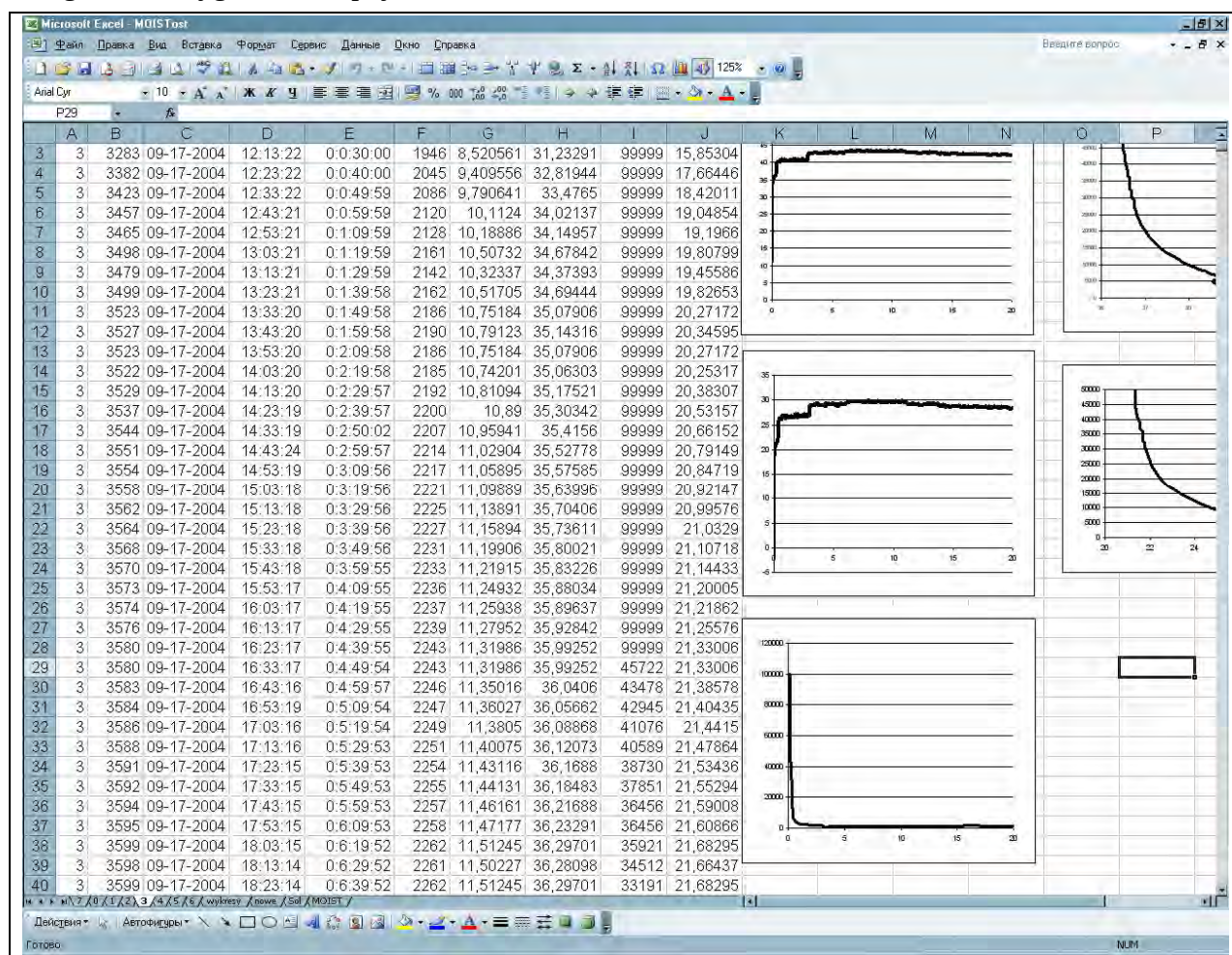


Rys. 4.17. Przebieg temperatur w komorze 2

Na rys. 4.17 przedstawiono przebieg temperatury w komorze 2 przy wartości zadanej równej 0°C. Stabilizacja temperaturowa nastąpiła po upływie jednej godziny.

4.4. Opracowanie danych eksperymentalnych

Dane, otrzymane podczas trwania eksperymentu zostały przetworzone w format *.xls, wygodny dla obliczania i budowania wykresów. Przykładowa strona z pomiarem wilgotności wygląda następująco:



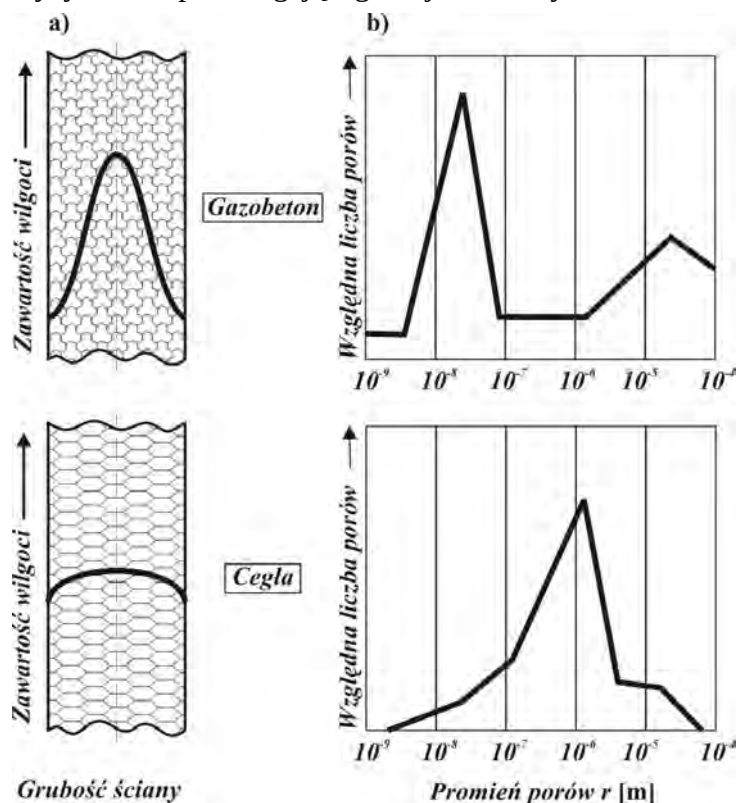
Opis zawartości kolumn następuj:

A – numer sondy; B – czas przelotu impulsu elektromagnetycznego, ps; C, D – czas odczytu danych; E – czas pomiędzy odczytami; F – czas przelotu impulsu w badanym ośrodku (bez czasu martwego sondy); G – obliczeniowa stała dielektryczna; H – obliczeniowa zawartość wilgoci policzona przez wzór Malickiego; I – przeniesione z innego pliku dla zbudowania wykresów oporu elektrycznego; J - obliczeniowa zawartość wilgoci policzona przez wzór Toppa.

5. BADANIA EKSPERYMENTALNE PRZENOSZENIA ENERGII I MASY

5.1. Analiza mikroskopowa struktury badanych materiałów budowlanych

Od struktury porów, ich rodzaju, wielkości i formy zależą wszelkie podstawowe prawidłowości dotyczące zarówno transportu, jak i stopnia związania wody w materiale porowatym. Struktura wywiera ogromny wpływ zarówno na jakościowy, jak i ilościowy przebieg zjawisk wilgotnościowych. Dotyczy ona dwóch różnych materiałów, będących na tym samym etapie wysychania, przebiegającego w jednakowych warunkach brzegowych.

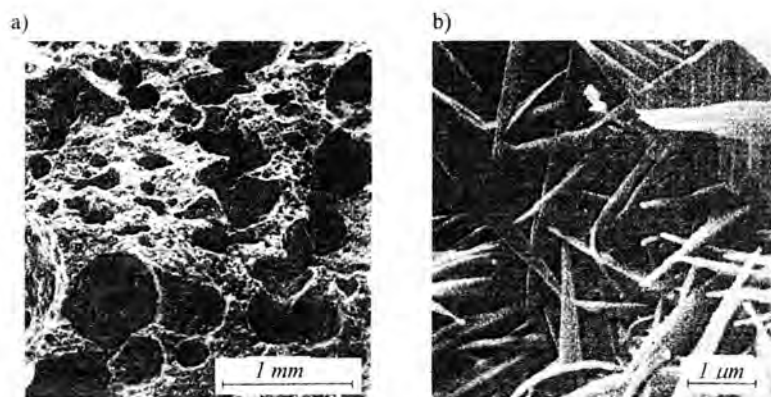


Rys. 5.1. a) Rozkład wilgoci w ścianie z gazobetonu i cegły; b) rozkład wielkości porów w gazobetonie i cegle [119]

Rys. 5.1 a przedstawia uzyskany w izotermicznym procesie wysychania rozkład wilgoci w ścianie z gazobetonu i cegły, który w przekroju poprzecznym przebiega dość

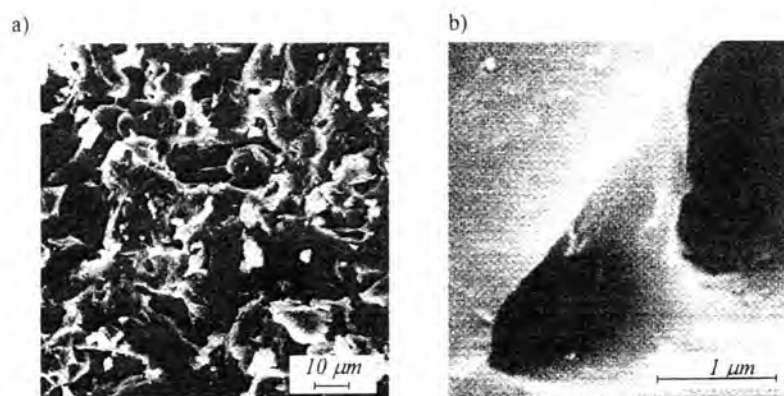
równomiernie, natomiast w środku ściany z gazobetonu wykazuje wyraźne wypiętrzenie. Z uwagi na przyjęcie w obu przypadkach tych samych geometrycznych i fizycznych warunków brzegowych zaobserwowane różnice tłumaczone mogą być jedynie odmiennością własności strukturalnych analizowanych materiałów. Wniosek ten potwierdza wykres rozkładu wielkości porów przedstawiony na rys. 5.1 b. Eksperymentalnie można to wyrazić poprzez zbadanie przebiegów procesów sorpcji i desorpcji wody, które zostaną przedstawione w dalszej części rozdziału.

Do modelowania procesów przenoszenia wody i ciepła wymagana jest jednak nie tylko znajomość rozkładu, ale również rodzaju i formy porów, których udziały w danym materiale są dominujące [29]. Przeprowadzone badania struktury [119, 168] wykazały, że pory dominujące w gazobetonie (rys. 5.2 b) różnią się od siebie. Pory o promieniach w przedziale 10^{-5} - 10^{-4} m mają typową formę kulistą – rys. 1.1 a, zaś pory o promieniach około 10^{-8} m wykazują formę tetragonalną – rys. 5.2 b.



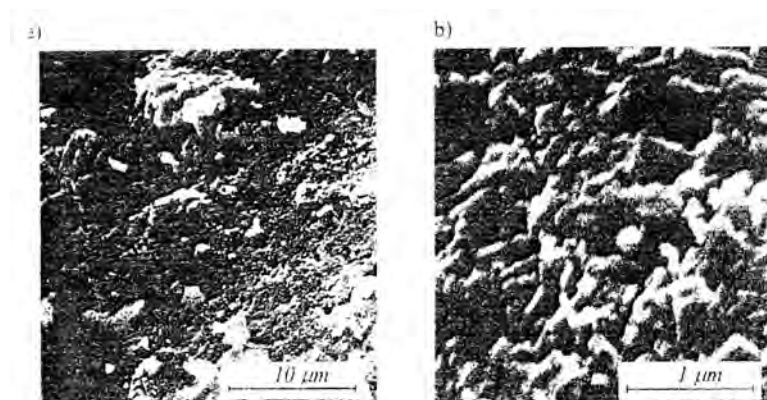
Rys. 5.2. Gazobeton: a) powiększenie 22-krotne; b) powiększenie 11000-krotne [119]

Dla cegły charakterystyczne są stosunkowo licznie występujące wydłużone pory (kapilary) o kształcie rurowym, które wpływają na transport wody, a co za tym idzie, uniemożliwiają wystąpienie lokalnych różnic wilgotności. W przeciwieństwie do gazobetonu cegła pod względem formy wykazuje tylko tę jedną grupę porów, rys. 5.3.



Rys. 5.3. Cegła: a) powiększenie 500-krotne; b) powiększenie 20000-krotne [119]

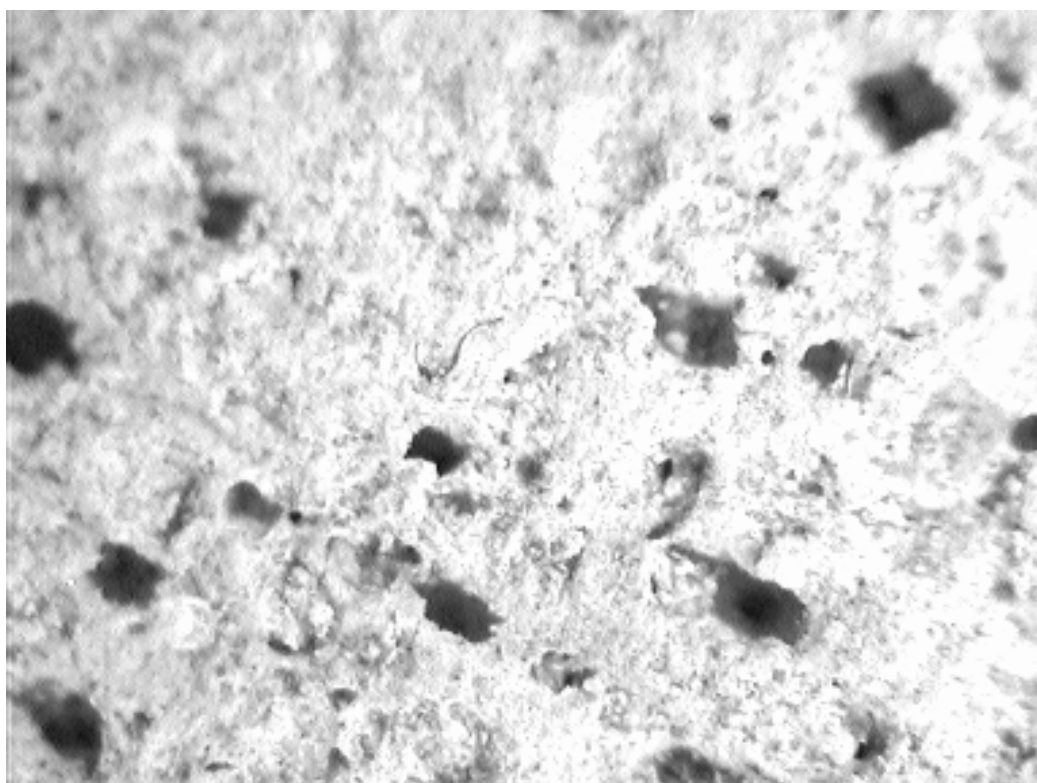
Warto nadmienić, że spośród porowatych materiałów budowlanych najwięcej trudności przy interpretacji struktury przysparzał beton. Z rys. 5.4 wynika, że żadne z dwóch powiększeń nie pozwala na rozpoznanie wyraźnej formy porów. Wygląda to tak, jakby szkielet ciała stałego zbudowany był ze wzajemnie zrośniętych struktur w kształcie igieł i płytek.



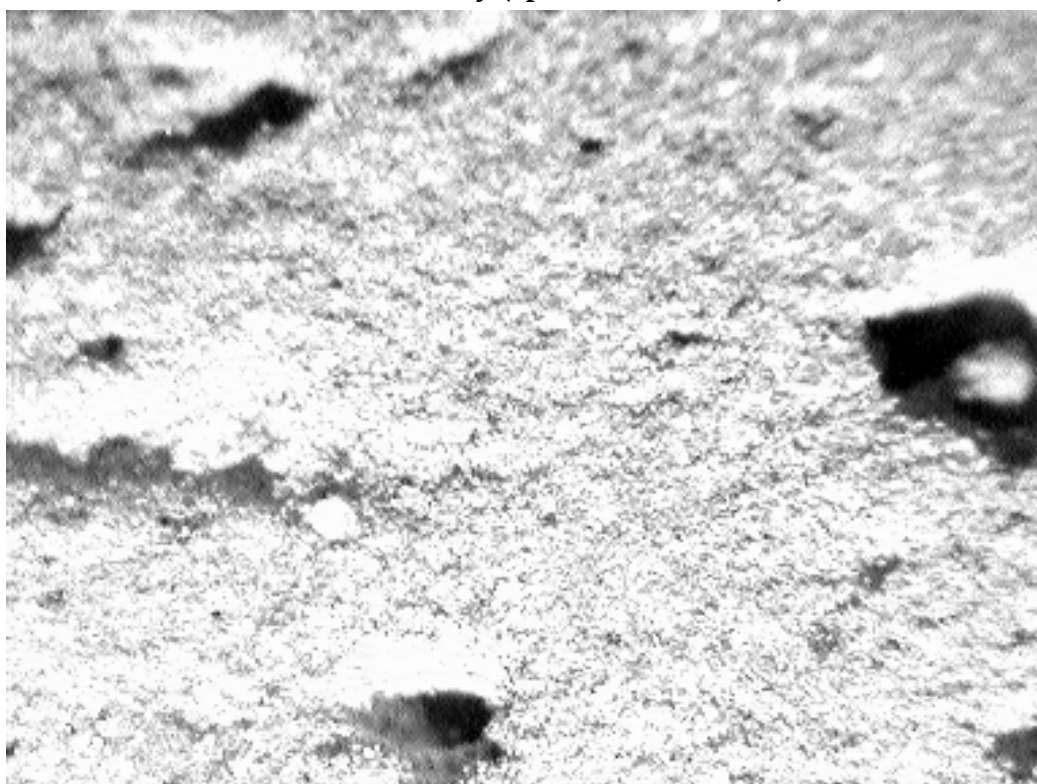
Rys. 5.4. Beton: a) powiększenie 2200-krotne; b) powiększenie 22000-krotne [119]

Badania teoretyczne mikrostruktury materiałów budowlanych [52, 82, 172] i jej wpływu na przenoszenie ciepła i wody udowodniły istotną zależność pomiędzy kształtem, wymiarami, kierunkiem porów i kapilar, z czego wnioskowano o potrzebie pomiaru powyższych czynników w części eksperymentalnej.

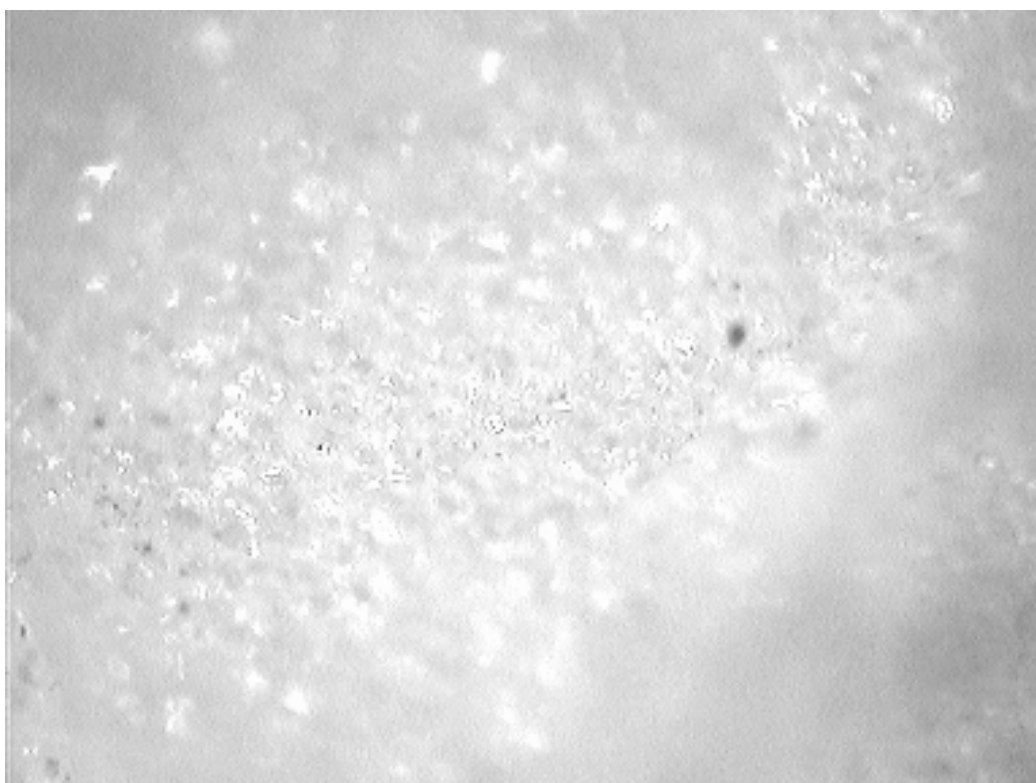
W celu obserwowania mikrostruktury badanych w tej pracy materiałów budowlanych wykonano ich 30-krotne powiększenie (rys. 5.5-5.7) z wykorzystaniem systemu do analizy komputerowej obrazu MicroScan.



Rys. 5.5. 30-krotne powiększenie wykorzystanych w badaniach materiałów budowlanych – beton komórkowy (opracowanie własne)



Rys. 5.6. 30-krotne powiększenie wykorzystanych w badaniach materiałów budowlanych – cegła ceramiczna pełna (opracowanie własne)



Rys. 5.7. 30-krotne powiększenie wykorzystanych w badaniach materiałów budowlanych – styropian (opracowanie własne)

Jak widać na przedstawionych na rys. 5.5–5.7 zdjęciach, beton komórkowy charakteryzuje się porami czworokątnymi. Cegłę charakteryzują pory cylindryczne w kształcie kapilar, więcej kuliste. Z kolei styropian ma bardzo szczelną strukturę z zamkniętymi porami powietrza – co wpływa na jego prawie całkowitą nienasiąkliwość.

5.2. Przeprowadzone badania laboratoryjne

Wybrane materiały budowlane przebadano pod kątem możliwości zastosowania technologii TDR i analizy procesów przepływu masy i energii.

Badania eksperymentalne prowadzono dla wybranych materiałów budowlanych (autklawizowany beton komórkowy, cegła ceramiczna pełna, styropian i silikat wapienny). Zrealizowano badania następujących procesów:

1. Desorpcja wody – proces oddawania wilgoci (pary wodnej) z materiału budowlanego o zwiększonej wilgotności do powietrza otaczającego materiał.

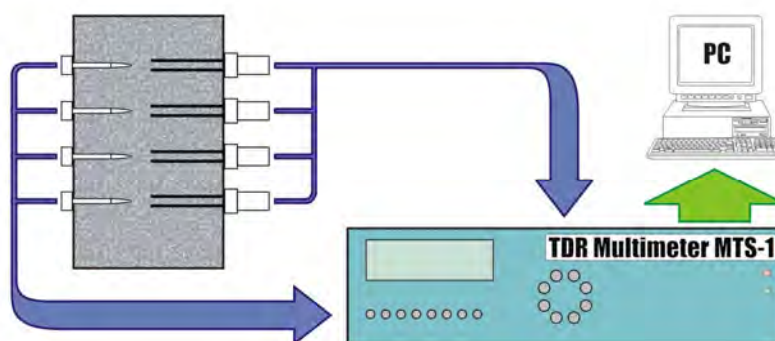
2. Podciąganie kapilarne wody – zdolność materiału do wchłaniania i przenoszenia wody siłami kapilarnymi.
3. Przenoszenie ciepła w wykonanym modelu przegrody budowlanej.
4. Termodyfuzja - transport wody spowodowany różnicą temperatur w materiale.
5. Pomiar ciepła właściwego wybranych materiałów budowlanych.
6. Wyznaczanie strumienia ciepła dla oszacowania współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów i przegród.

5.2.1. Badanie procesu desorpcji wody

Do pomiarów zjawiska desorpcji, jak i podciągania kapilarnego (omówionego w następnym podrozdziale) przygotowano stanowisko pomiarowe (rys. 5.8). Elementami stanowiska były:

- miernik TDR Multimeter MTS-1 (Easy Test, Lublin);
- komputer PC (stacja sterująca);
- sondy TDR LP/mts (Easy Test, Lublin);
- próbki badanych materiałów.

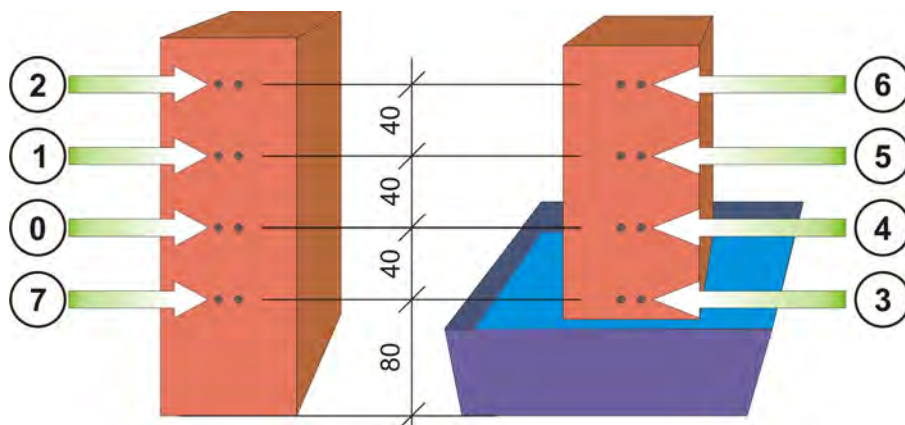
Przygotowane stanowisko (rys. 5.8) umożliwiło pomiar wilgotności, zasolenia i temperatury w materiałach budowlanych. Pozwoliło ono na uzyskanie informacji na temat dynamiki procesu podciągania kapilarnego oraz desorpcji w takich materiałach budowlanych jak beton komórkowy, cegła ceramiczna pełna oraz styropian.



Rys. 5.8. Schemat stanowiska pomiarowego

W próbkach materiałów budowlanych o wymiarach $24 \times 12 \times 12$ cm (belit) i $25 \times 12 \times 6$ cm (cegła ceramiczna pełna) wykonano otwory o średnicy o 0,2 mm większej od średnicy sond. Odległość pomiędzy otworami zawiera się w przedziale 40 mm (rys. 5.9).

Dla pomiarów dynamiki desorpcji próbki zanurzano w wodzie do stanu nasycenia (brak przyrostu masy w badaniach wagowych), a następnie zaizolowano tak, aby zapewnić jednokierunkowy przebieg zjawiska (rys. 5.9 a).



Rys. 5.9. Próbki przygotowane do badań: a) podczas badania procesu desorpcji, b) podczas badania procesu podciągania kapilarnego

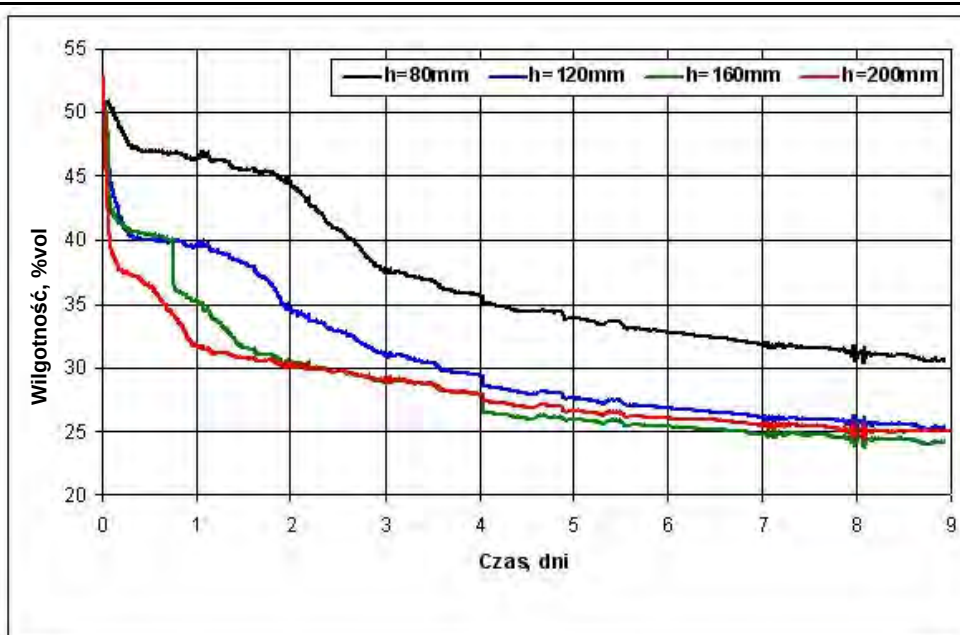
Wielkości elektryczne, otrzymane podczas pomiarów TDR, przeliczono za pomocą wzorów kalibracyjnych (4.10) i (4.11) Malickiego i Toppa na wilgotność objętościową. Pierwotnie obliczenia wykonano w oparciu o wzór Toppa [115], lecz po dokładniejszej analizie, zdecydowano zastosować w obliczeniach formułę Malickiego [73] w którym uwzględnia się gęstość materiału budowlanego w stanie powietrzno-suchym. Krzywe przedstawiające przebieg omawianego zjawiska opisano równaniami matematycznymi, charakteryzującymi zależności tych wielkości między sobą podczas badanych zjawisk fizycznych.

Pomiary wykonano dla 4 punktów pomiarowych umieszczonych na różnych wysokościach próbki. Celem badania było określenie zależności dynamiki procesu desorpcji od odległości od powierzchni wysychania. Podczas suszenia próbek betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej zbadane zostały:

- zależność wilgotności próbek od czasu trwania procesu w warunkach konwekcji naturalnej (rys. 5.10-5.11);
- zależność oporu elektrycznego od czasu trwania procesu (rys. 5.12-5.13);
- zależność oporu elektrycznego od wilgotności próbek (rys. 5.14-5.15);
- zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci (rys. 5.45-5.48).

5.2.1.1. Desorpcja wody w warunkach konwekcji naturalnej

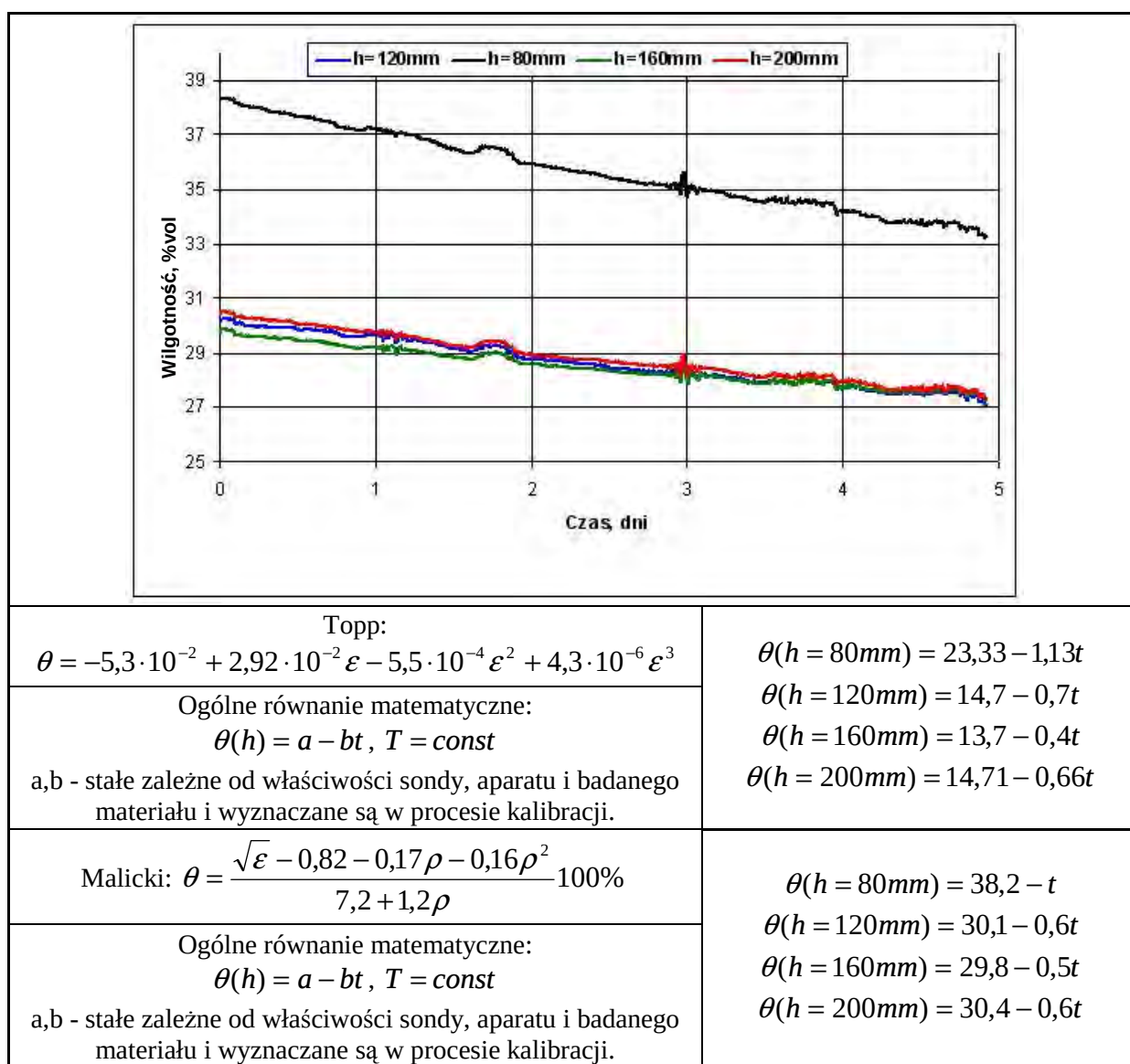
Prowadzone zostały pomiary dla wilgotności objętościowej początkowej około 50 % (dane kalibracyjne przyjęte za Malickim (wzór 4.10.)). W związku z tym, że obróbkę uzyskanych wyników zrealizowano przy pomocy formuł Topp'a i Malickiego, uzyskane wyniki obliczeń przedstawiono dla dwu metod. Zaś przebieg zjawiska w postaci graficznej przedstawiono jedynie dla metody Malickiego, jako bardziej dokładnej.



Topp:	
$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$	$\theta(h = 80\text{mm}) = 37 - 7,4t^{0,44}$
Ogólne równanie matematyczne:	$\theta(h = 120\text{mm}) = 36 - 10,8t^{0,37}$
$\theta(h) = \theta_0 + a(t - t_0)^b, T = \text{const}$	$\theta(h = 160\text{mm}) = 38 - 17,7t^{0,17}$
a, b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczone są w procesie kalibracji.	$\theta(h = 200\text{mm}) = 38,5 - 19t^{0,14}$
Malicki: $\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,82 - 0,17\rho - 0,16\rho^2}{7,2 + 1,2\rho} 100\%$	$\theta(h = 80\text{mm}) = 52 - 9,1t^{0,42}$
Ogólne równanie matematyczne:	$\theta(h = 120\text{mm}) = 50 - 13t^{0,3}$
$\theta(h) = \theta_0 + a(t - t_0)^b, T = \text{const}$	$\theta(h = 160\text{mm}) = 52 - 19,5t^{0,17}$
a, b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczone są w procesie kalibracji.	$\theta(h = 200\text{mm}) = 53 - 20,4t^{0,17}$

Rys. 5.10. Desorpcja wody w betonie komórkowym

Z rys. 5.10 wynika, że zmiana wilgotności w próbce betonu komórkowego w funkcji czasu ma przybliżony charakter do funkcji potęgowej. Szybkość zmian wilgotności jest największa w pobliżu powierzchni odparowania (krzywa czerwona $h=200$ mm). Im dalej analizowany punkt znajduje się od powierzchni zewnętrznej (krzywa czarna $h=80$ mm), tym więcej czasu potrzeba do desorpcji wody – z wykresu wynika, iż jest to 4 doby. Dalsze obserwacje procesu pokazują niewielkie zmiany wilgotności w czasie w porównywaniu z wynikami początkowymi.



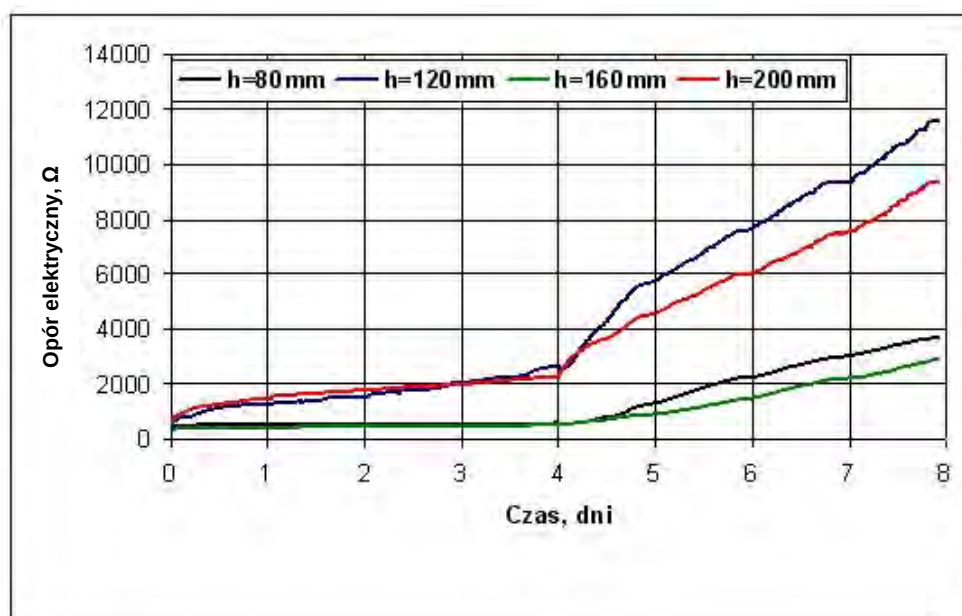
Rys. 5.11. Desorpcja wody w cegle ceramicznej pełnej

Rys. 5.11 pokazuje zależność liniową pomiędzy wilgotnością a czasem trwania eksperymentu: z upływem czasu wilgotność próbki cegły ceramicznej pełnej zmniejsza się. Krzywe otrzymane z danych w różnych punktach pomiarowych są równoległe, co świadczy o

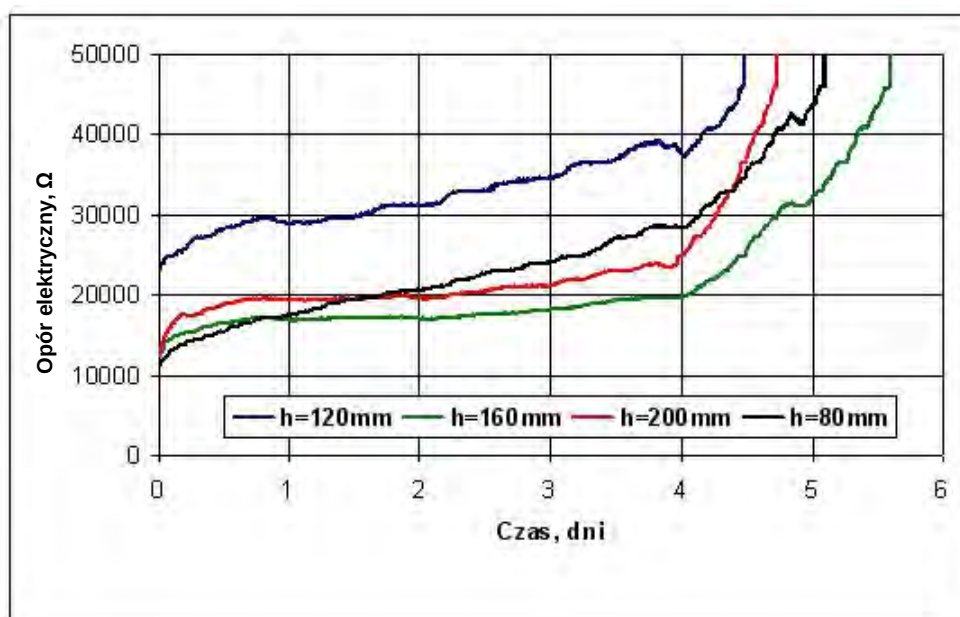
tym, że w różnych przekrojach cegły proces desorpcji odbywa się równomiernie. Widoczna jest różnica w procesach desorpcji dla betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej, co możemy tłumaczyć różnicą w strukturze materiałów, opisaną w rozdz. 5.1.

Próba modelowania procesu desorpcji w styropianie okazała się niemożliwa do wykonania, dlatego że styropianu nie udało się nawilżyć. Oprócz zerowej nasiąkliwości styropian nie przepuszcza pary wodnej. Zastosowanie tego materiału w strukturze przegrody stanowi nieprzenikliwą dla wody barierę. Woda nie będzie dyfundować na zewnątrz, a zatrzymana zwiększa współczynnik przewodzenia ciepła [26].

5.2.1.2. Zmiany oporu elektrycznego ośrodka w procesie desorpcji



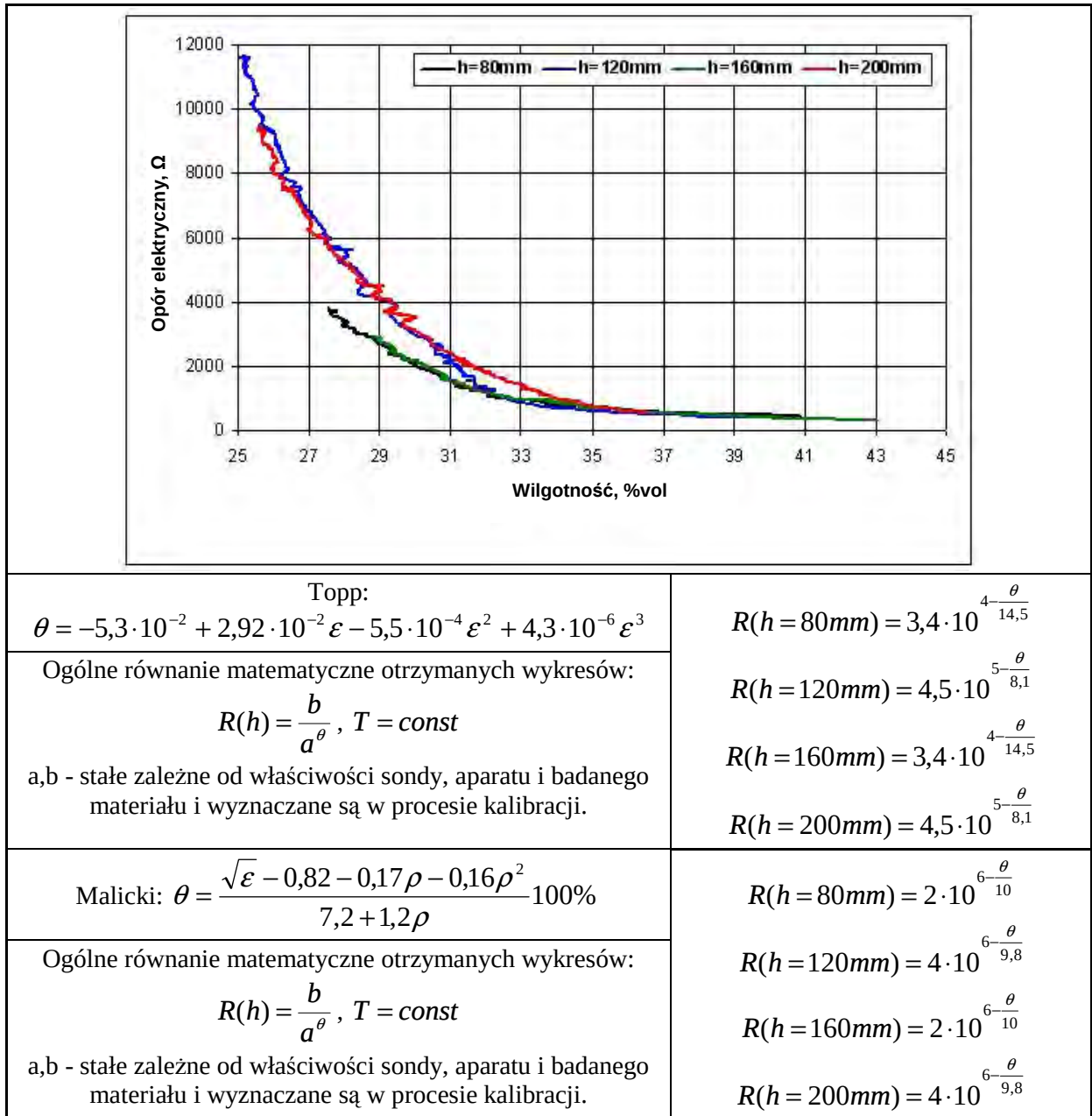
Rys. 5.12. Zmiana oporu elektrycznego w betonie komórkowym na skutek procesu desorpcji



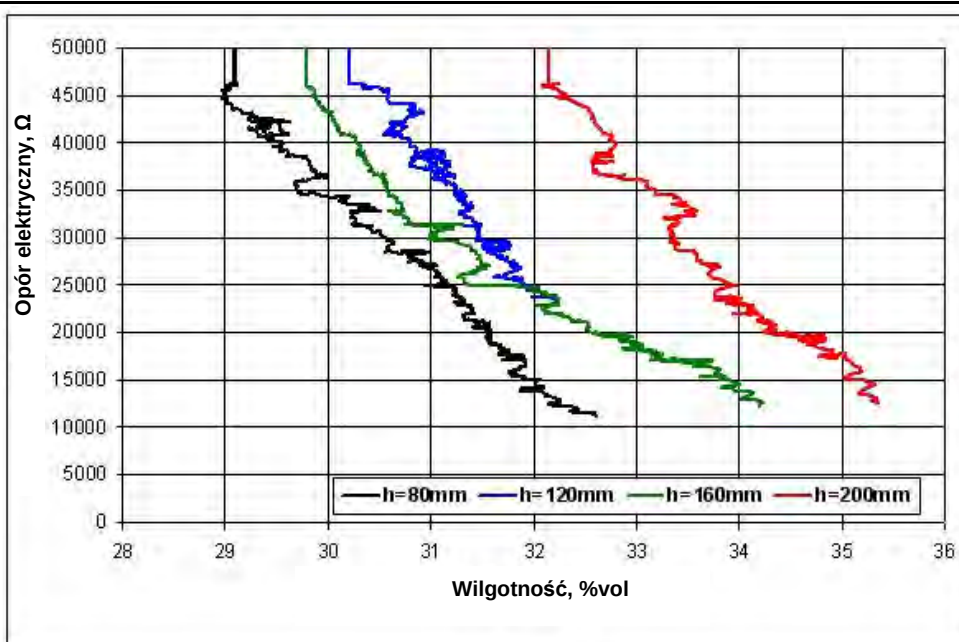
Rys. 5.13. Zmiana oporu elektrycznego w cegle ceramicznej pełnej na skutek procesu desorpcji

Badanie konduktywności betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej potwierdzają otrzymane wyżej zależności zmiany wilgotności w czasie (rys. 5.11-5.12). Opór wzrasta w miarę spadku wilgotności, i dla betonu jest mniejszy ok. 10 razy niż dla cegły ceramicznej pełnej. Świadczy to o tym, że w betonie komórkowym przewodność elektryczna (rezystancja) jest większa.

5.2.1.3. Wpływ zmian wilgotności na zmiany oporu elektrycznego ośrodka



Rys. 5.14. Zależność oporu elektrycznego od wilgotności w betonie komórkowym w procesie desorpcji wody



Topp:	
$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$	$R(h = 80\text{mm}) = 159990 - 8666\theta$
Ogólne równanie matematyczne otrzymanych wykresów: $R(h) = a - b\theta, T = \text{const}$	$R(h = 120\text{mm}) = 220500 - 11700\theta$
a,b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.	$R(h = 160\text{mm}) = 143000 - 7000\theta$
	$R(h = 200\text{mm}) = 202400 - 9300\theta$
Malicki: $\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,82 - 0,17\rho - 0,16\rho^2}{7,2 + 1,2\rho} 100\%$	$R(h = 80\text{mm}) = 335000 - 10000\theta$
Ogólne równanie matematyczne otrzymanych wykresów: $R(h) = a - b\theta, T = \text{const}$	$R(h = 120\text{mm}) = 476950 - 14150\theta$
a,b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.	$R(h = 160\text{mm}) = 276200 - 7800\theta$
	$R(h = 200\text{mm}) = 394155 - 10833\theta$

Rys. 5.15. Zależność oporu elektrycznego od wilgotności w cegle ceramicznej pełnej w procesie desorpcji wody

Dla zależności wilgotność - czas trwania procesu i opór elektryczny – czas trwania procesu w betonie komórkowym i cegle ceramicznej pełnej wykonano przeliczenia i wykonano wykresy zależności zawartości wody od rezystancji materiałów (rys. 5.14-5.15). Wykresy potwierdzają liniową zależność zmian dla cegły ceramicznej pełnej i potęgową dla betonu komórkowego.

Badanie procesu desorpcji w materiałach budowlanych pozwala na prognozowanie czasu, potrzebnego do usunięcia wody z różnych przekrojów materiału do środowiska otaczającego. Informacje na temat czasu usuwania wody z materiałów pozwalają na obliczenie wielkości wilgoci w różnych grubościach ściany. Im bliżej do powierzchni

zewnątrznej znajduje strefa możliwej kondensacji wilgoci, tym łatwiej i dynamiczniej będzie zachodzić desorpcja na zewnątrz.

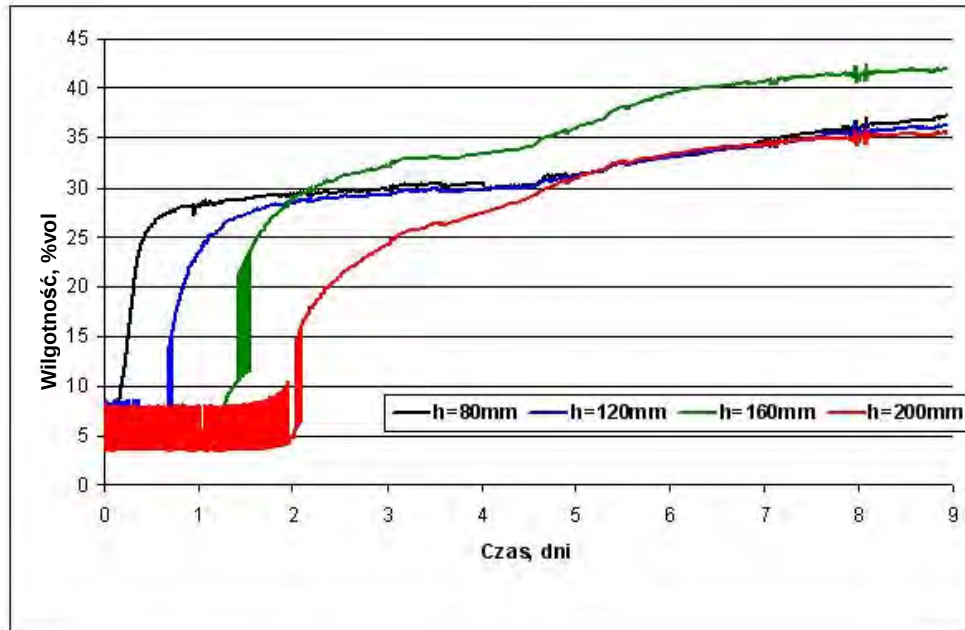
5.2.2. Badanie procesu podciągania kapilarnego w materiałach budowlanych

Kolejnym badanym zjawiskiem zachodzącym w materiałach budowlanych było podciąganie kapilarne. Próbki wysuszono w suszarce w temperaturze 105° C do stałej masy. Następnie zaizolowano, ale już z otwartym dnem i umieszczono w kuwecie z wodą tak, żeby poziom wody wynosił ok. 30 mm od dołu próbki i pozostawał stały w trakcie całego eksperymentu (rys. 5.9 b). W ten sposób umożliwiono podsiąkanie wody od spodu próbki w celu zbadania dynamiki procesu. Badania każdego materiału trwały około 10 dni.

Podczas nawilżania próbek betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej zbadane zostały:

- zależność wilgotności próbek od czasu trwania procesu (rys.5.16-5.17);
- zależność oporu elektrycznego od czasu trwania eksperymentu (rys. 5.18-5.19);
- zależność oporu elektrycznego od wilgotności próbek (rys.5.20-5.21).

5.2.2.1. Podciąganie kapilarne w wybranych materiałach budowlanych



Topp: $\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$

Ogólne równanie matematyczne:
 $\theta(h) = a + b(t - c)^p$, $T = \text{const}$
 a,b,c,p - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.

$$\theta(h = 80\text{mm}) = \begin{cases} 0, & \text{gdy } 0 \leq t < 0,2 \\ 7,5 + 8,7(t - 0,3)^{0,07}, & \text{gdy } 0,2 < t \leq 1 \\ 14,9 + 1,1t, & \text{gdy } t > 1 \end{cases}$$

$$\theta(h = 120\text{mm}) = \begin{cases} -2,5, & \text{gdy } 0 \leq t \leq 0,7 \\ 5 + 10(t - 0,75)^{0,24}, & \text{gdy } t > 0,7 \end{cases}$$

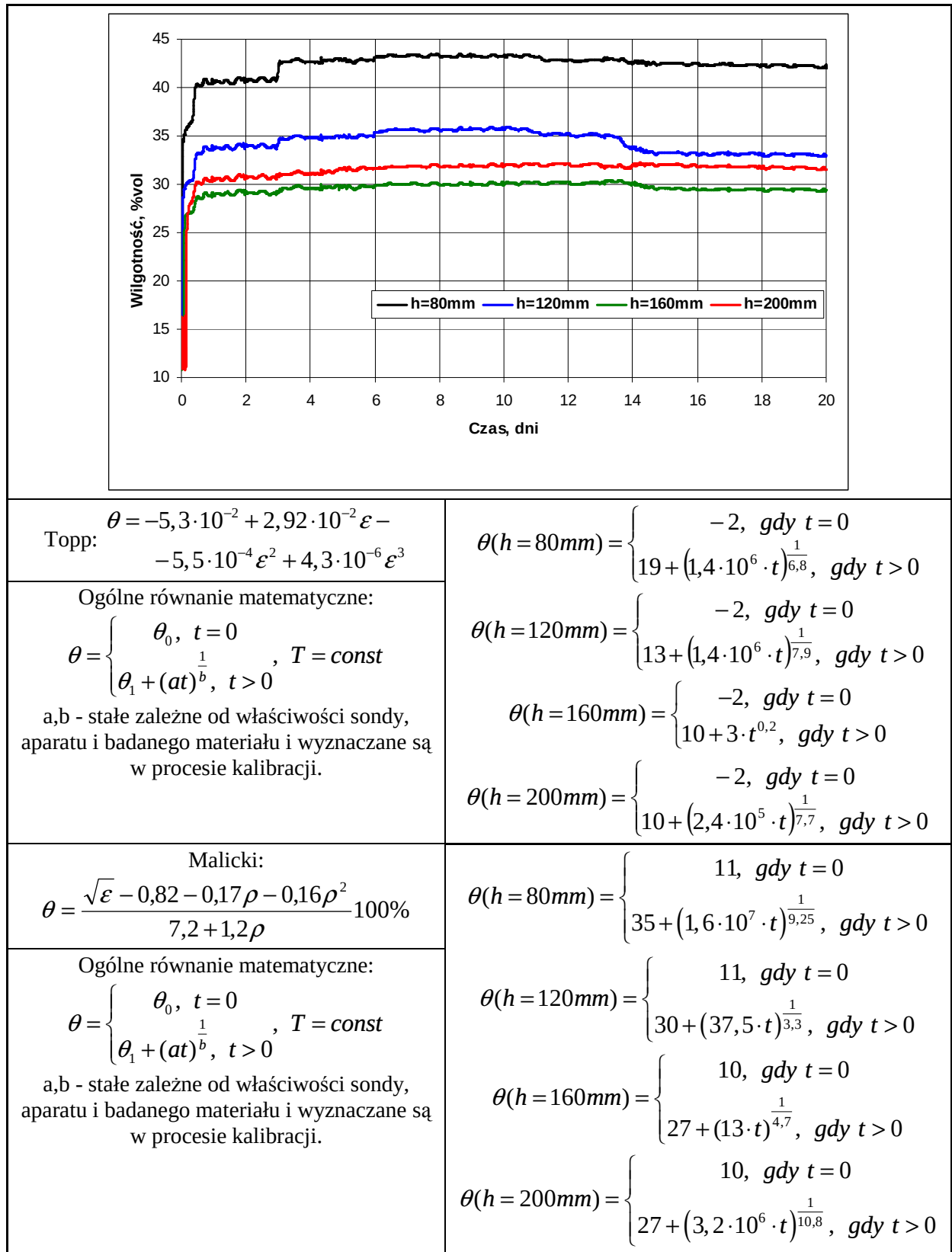
$$\theta(h = 160\text{mm}) = \begin{cases} -2, & \text{gdy } 0 \leq t \leq 1,2 \\ 2 - \sqrt{54(1,4 - t)}, & \text{gdy } 1,2 \leq t < 1,4 \\ 1,5 < \theta < 9,5, & \text{gdy } t = 1,4 \\ 7 + 11,4(t - 1,4)^{0,26}, & \text{gdy } t > 1,4 \end{cases}$$

$$\theta(h = 200\text{mm}) = \begin{cases} -2,6, & \text{gdy } 0 \leq t < 2,1 \\ -2,6 < \theta < 2, & \text{gdy } t = 2,1 \\ 2 + 11(t - 2,1)^{0,4}, & \text{gdy } t > 2,1 \end{cases}$$

Malicki: $\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,82 - 0,17\rho - 0,16\rho^2}{7,2 + 1,2\rho} 100\%$	$\theta(h = 80mm) = \begin{cases} 8, & \text{gdy } 0 \leq t \leq 0,2 \\ 15 + 13,3(t - 0,2)^{0,1}, & \text{gdy } t \geq 0,2 \end{cases}$
Ogólne równanie matematyczne: $\theta(h) = a + b(t - c)^p, \quad T = const$ a,b,c,p - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.	$\theta(h = 120mm) = \begin{cases} 5,1 - \sqrt{-1,3(t - 0,6)}, & \text{gdy } 0 \leq t < 0,6 \\ 5,2 < \theta < 13, & \text{gdy } t = 0,6 \\ 13 + 13,4(t - 0,6)^{0,22}, & \text{gdy } t > 0,6 \end{cases}$
	$\theta(h = 160mm) = \begin{cases} 4, & \text{gdy } 0 \leq t \leq 1 \\ 4 + 43,8(t - 1)^2, & \text{gdy } 1 < t < 1,4 \\ 11 < \theta < 22, & \text{gdy } t = 1,4 \\ 22 + 8(t - 1,4)^{0,48}, & \text{gdy } t > 1,4 \end{cases}$
	$\theta(h = 200mm) = \begin{cases} 3,5, & \text{gdy } 0 \leq t \leq 1,6 \\ 3,5 + 12(t - 1,6)^2, & \text{gdy } 1,6 < t < 2,1 \\ 6,5 < \theta < 15, & \text{gdy } t = 2,1 \\ 15 + 10(t - 2)^{0,4}, & \text{gdy } t > 2,1 \end{cases}$

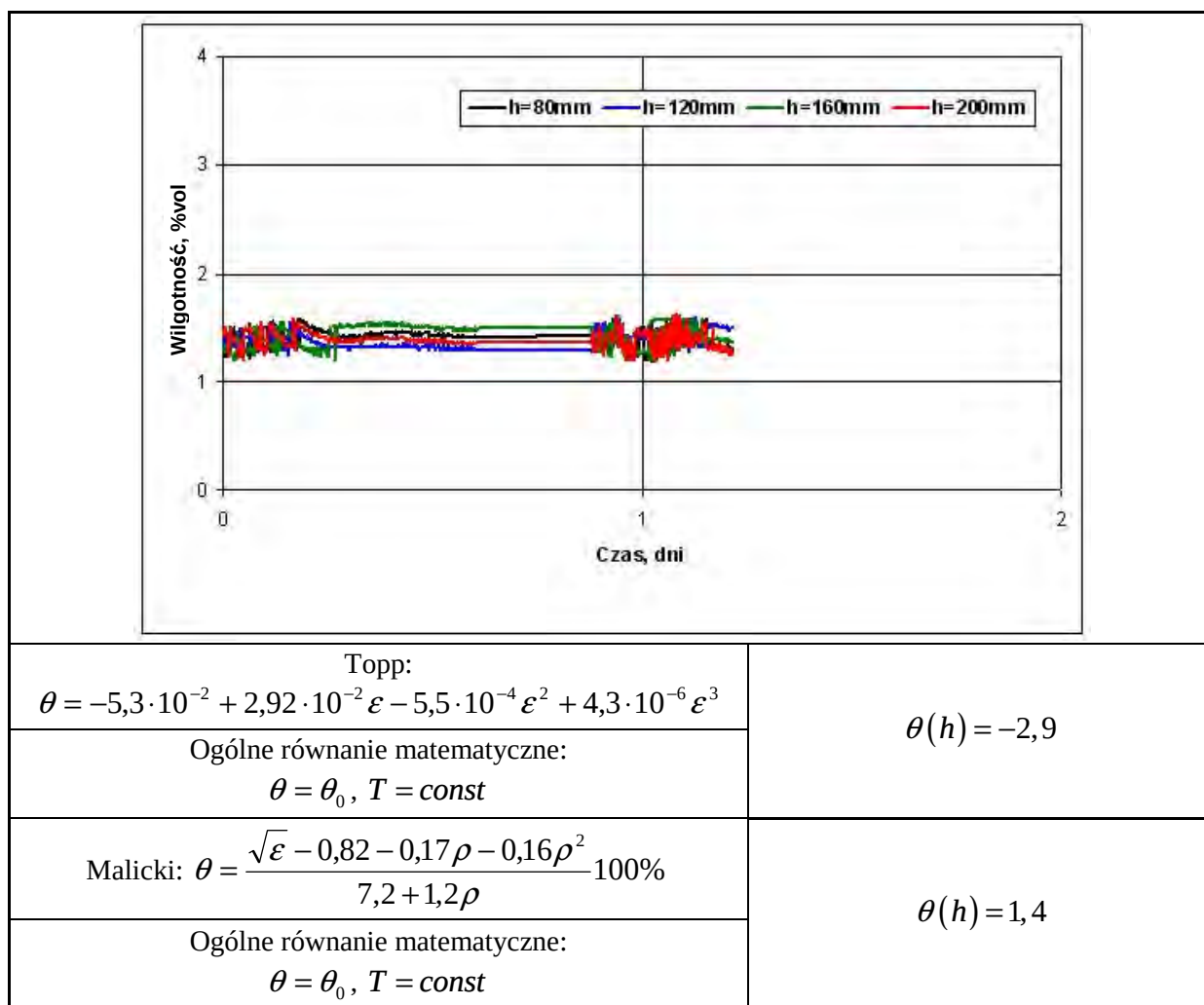
Rys. 5.16. Dynamika procesu podciągania kapilarnego w betonie komórkowym

Czujniki zainstalowane w najniższych punktach (czarna i zielona krzywa na rys. 5.16) już na początku eksperymentu charakteryzują się szybkim pochłanianiem wody, zaś w miejscach wyższych (niebieska i czerwone krzywe) wilgotność wzrasta dopiero po 1 albo nawet 2 dniach trwania pomiaru. 27 % to wartość wilgotności, którą wykazuje najniższy czujnik (czarna krzywa) po połowie doby, najwyższy czujnik (czerwona krzywa) osiągnie tę wielkość za 4-5 dni. Uwagę zwraca fakt, iż w końcowym etapie eksperymentu wilgotność nie osiągnęła i nie przekroczyła wartości 45 %, na podstawie czego można wnioskować o braku możliwości osiągnięcia drogą podciągania kapilarnego takich wartości wilgotności materiału. Dynamika procesu podciągania kapilarnego też zmienia się. Jak widać, wilgotność w punkcie pomiaru zmienia się gwałtownie – w ciągu kilku godzin o 20 %.



Rys. 5.17. Dynamika procesu podciągania kapilarnego w cegle ceramicznej pełnej

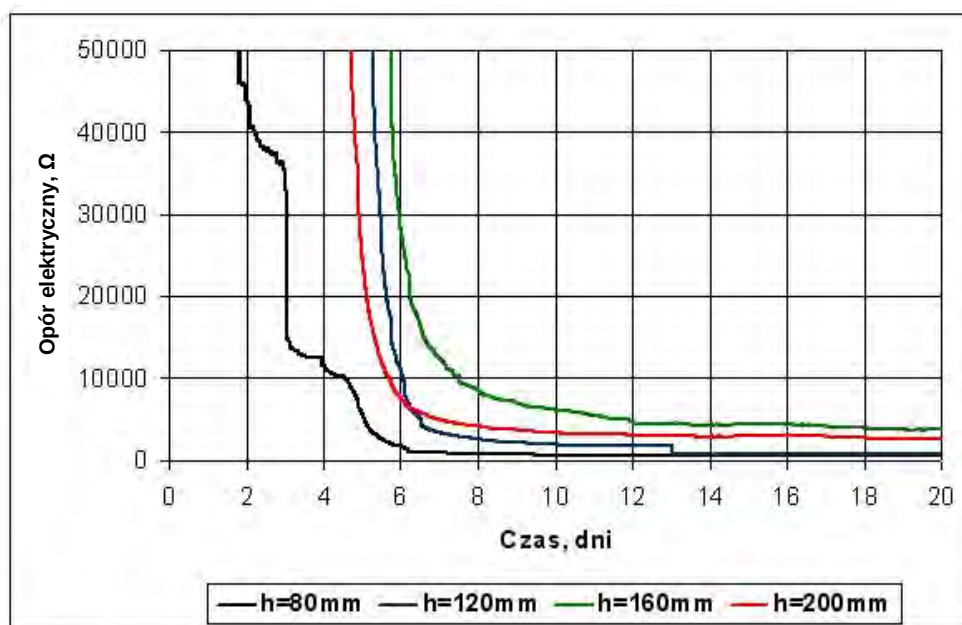
Przebieg eksperymentu dla cegły (rys. 5.17) wykazał nieliniowość i nierównomierność procesu podciągania kapilarnego. Różnica pomiędzy najniższym, a najwyższym punktem (czarna i czerwona krzywa) wynosi 10 % wilgotności. Wielkość wilgotności już w ciągu pierwszej doby osiągnęła wysoką wartość, która potem znacząco się nie zmieniła – w ciągu pierwszej doby wzrosła o 20 %, zaś w ciągu następnych 20 dni – tylko o 2 %. Świadczy to o znacznej dynamice podciągania kapilarnego na początku eksperymentu do stanu „nasylenia”, który w betonie komórkowym nastąpił po 6-8 dniach (rys. 5.16). Wskazuje to na różnicę w strukturze obu badanych materiałów.



Rys. 5.18. Podciąganie kapilarne w styropianie

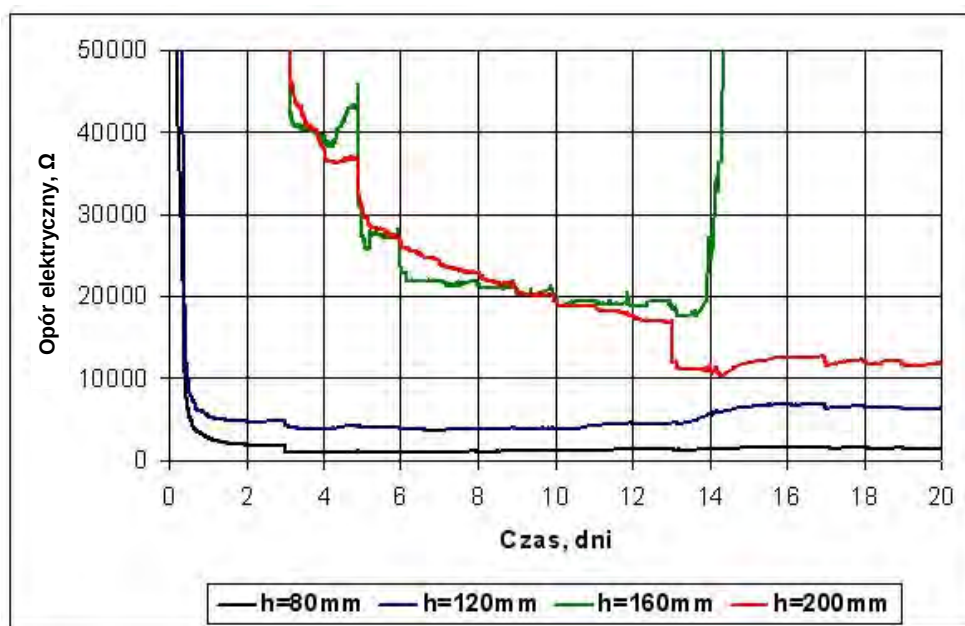
Ekspierymnt przedstawiony na rys. 5.18 po raz kolejny udowodnił, że materiały styropianowe nie są wodochłonne. Oprócz tego, można wysnuć wniosek o dużej dokładności wzoru kalibracyjnego Malickiego (4.10), z którego wynika wilgotność styropianu 1,4 %. Po pełnym czasie trwania badań postanowiono eksperyment przerwać.

5.2.2.2. Opór elektryczny ośrodka w procesie podciągania kapilarnego



Rys. 5.19. Zmiana oporu elektrycznego w betonie komórkowym na skutek procesu podciągania kapilarnego wody

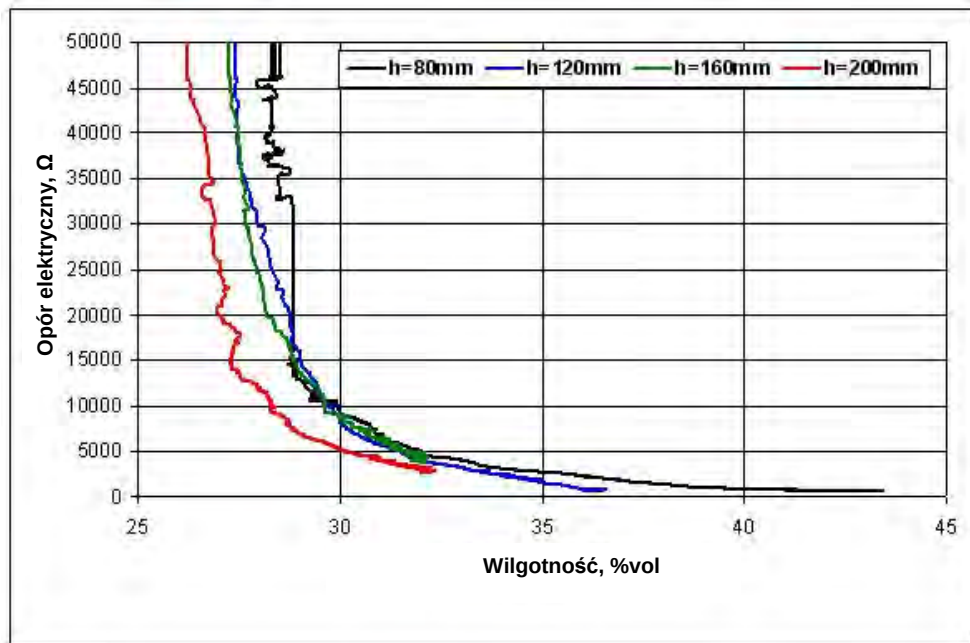
Przebieg zmian wartości oporu elektrycznego podczas podciągania kapilarnego w betonie komórkowym przedstawia rys. 5.19. Nie przedstawia on początkowych wartości oporu, ale wykazuje ogólny charakter procesów. Szybki spadek wielkości oporu w ciągu 6-7 dni do wielkości poniżej 10000 Ohm, a potem dalszy spadek przez kolejne 14 dni.



Rys. 5.20. Zmiana oporu elektrycznego w cegle ceramicznej pełnej na skutek procesu podciągania kapilarnego wody

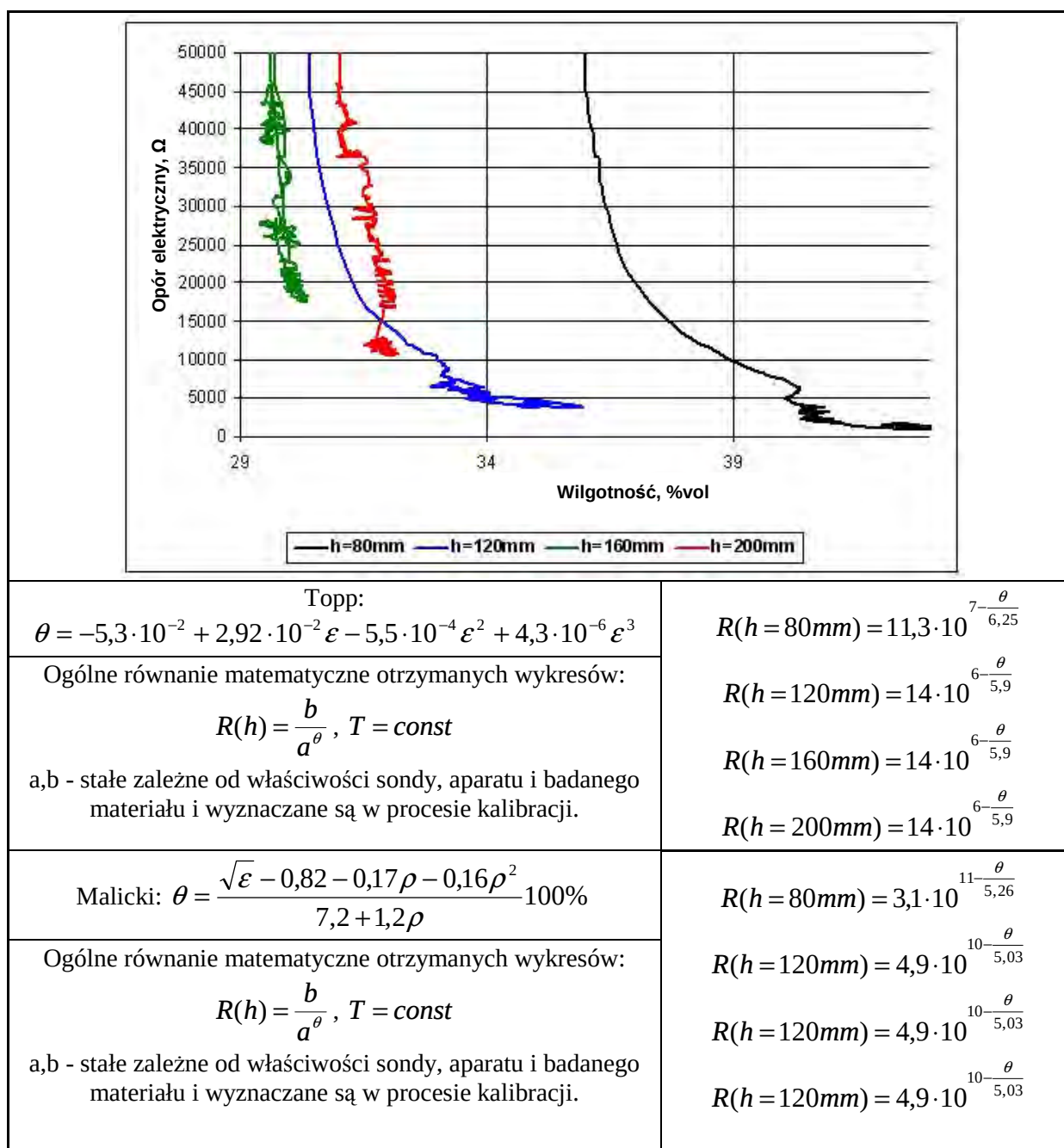
Badania konduktywności betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej (rys. 5.19-5.20) potwierdzają otrzymane wyżej zależności zmiany wilgotności z czasem (5.17-5.18). Obserwujemy gwałtowny spadek krzywych w pierwszym dniu w dolnej części próbki (czarna i zielona linia krzywej). W górnej części badanej próbki (niebieska i czerwona linia) postępowy spadek jest najbardziej wyraźny. Najbardziej regularny przebieg obserwuje się do 14 dni, a dalej zaczyna się znaczny skok krzywych do góry spowodowany nieznaną przyczyną. W tym okresie, końcowe wartości oporu elektrycznego sięgają 2000-4000 Ohm dla dolnych i 12000-18000 Ohm dla górnych punktów pomiarowych.

5.2.2.3. Wpływ zmian wilgotności na opór elektryczny w procesie podciągania kapilarnego



Topp: $\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3$	$R(h = 80mm) = 5 \cdot 10^{\frac{9\frac{1}{3}\theta}{3}} + 10^3$
Ogólne równanie matematyczne otrzymanych wykresów: $R(h) = \frac{b}{a^\theta}, T = const$ a,b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.	$R(h = 120mm) = 5 \cdot 10^{\frac{7\frac{3}{4}\theta}{4}}$ $R(h = 160mm) = 5 \cdot 10^{\frac{7\frac{3}{4}\theta}{4}}$ $R(h = 200mm) = 5 \cdot 10^{\frac{7,5-\theta}{4}}$
Malicki: $\theta = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,82 - 0,17\rho - 0,16\rho^2}{7,2 + 1,2\rho} 100\%$	$R(h = 80mm) = 4,6 \cdot 10^{12,9-0,32\theta} + 10^3$
Ogólne równanie matematyczne otrzymanych wykresów: $R(h) = \frac{b}{a^\theta}, T = const$ a,b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.	$R(h = 120mm) = 10^{11,2-0,24\theta}$ $R(h = 160mm) = 10^{11,2-0,24\theta}$ $R(h = 200mm) = 5 \cdot 10^{\frac{10,5-\theta}{4}}$

Rys. 5.21. Zależność oporu elektrycznego od wilgotności w betonie komórkowym podczas podciągania kapilarnego



Rys. 5.22. Zależność oporu elektrycznego od wilgotności w cegle ceramicznej pełnej podczas podciągania kapilarnego

Podobnie jak w rozdz. 5.2.1. dla zależności wilgotności od czasu i oporu elektrycznego od czasu w betonie komórkowym (rys. 5.21) i cegle ceramicznej pełnej (rys. 5.22), wykonano obliczenia oraz wykresy zależności zawartości wody od rezystancji badanych materiałów. W odróżnieniu od desorpcji wody, wykresy podciągania pokazują zależność potęgową i dla cegły ceramicznej pełnej, i dla betonu komórkowego. Badanie procesu podciągania kapilarnego w materiałach budowlanych pozwala prognozować czas,

potrzebny na nasiąkanie i przejście wody drogą kapilarną różnych przekrojów materiału. To może być wykorzystane podczas projektowania i modelowania zjawisk cieplno-wilgotnościowych w konstrukcjach bliskich do wód gruntowych – piwnicznych albo pierwszej kondygnacji. Im bliżej do miejsca kontaktu z wodą jest strefa obserwacji, tym szybciej nastąpi czas „nasycenia” wodą.

5.2.3. Badania właściwości cieplnych wybranych materiałów budowlanych

5.2.3.1. Wykorzystanie metody TDR do obserwacji zmian temperaturowych w przegrodzie

Stanowisko do pomiarów składało się z następujących elementów:

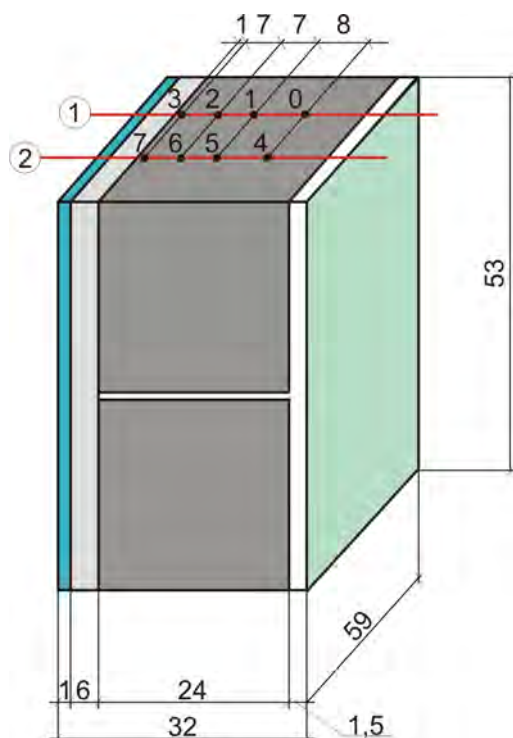
- system komór klimatycznych (z możliwością kontroli temperatury);
- komputer PC będący elementem wyposażenia systemu komór (sterownik, display) funkcjonujący również jako stacja sterująca miernikiem TDR;
- mierniki TDR multimeter (Easy Test, Lublin) funkcjonujące jako mierniki temperatury;
- sondy TDR LP/mts z wbudowanymi analogowymi czujnikami temperatury typu AD592C;
- modelowa ścianka wielowarstwowa w otulinie styropianowej w celu izolacji.

Jako próbkę w komorze klimatycznej wykonano model ściany o wymiarach i materiałach, przedstawionych w tab. 5.1. Schemat ściany pokazano na rys. 5.33.

Przed ostatecznym wyborem materiałów do zastosowania w modelu ściany, przeprowadzono analizę wykorzystania tego czy innego produktu w budownictwie. Konstrukcja ściany powinna była spełniać następujące warunki:

1. Mieć szerokie rozpowszechnianie w budownictwie.
2. Być konstrukcją dwuwarstwową, która składa się z warstwy nośnej oraz warstwy izolacyjnej (celem spełnienia rosnących wymagań europejskich dotyczących energooszczędności).

Z tego powodu zastosowano konstrukcję dwuwarstwową, składającą się z betonu komórkowego jako warstwy nośnej i styropianu jako warstwy izolacyjnej.



Rys. 5.23. Schemat modelu ściany i miejsca zainstalowania sond

Tab. 5.1. Materiały użyte do zbudowania ściany modelowej

Grubość ściany, cm	Warstwy	Współczynnik przewodności cieplnej λ , W/mK	Współczynnik przenikania ciepła U, W/m ² K	Zużycie podstawowych materiałów na 1 m ²		
				Bloczki (szt.)	Styropian (m ³)	Zaprawa (m ³)
32,5	1. Tynk na siatce z włókna szklanego	-	0,31	6,8	0,06	0,026
	2. Styropian	0,04				
	3. Bloczki betonowe komórkowe (24×24×59)	0,143				
	4. Tynk wewnętrzny wapienno-cementowy	0,8				

Na rys. 5.23. przez linie czerwone pokazano miejsce zainstalowania czujników. Sondy (rys. 4.6) były wstawione w beton komórkowy na 1 cm od jego granicy z innym materiałem. Dalej były dwa odstępy po 7 cm i jeden 8 cm (rys. 5.23). Głębokość instalacji czujników odpowiadała długości ich prętów i stanowiła 10 cm.

W celu izolacji ściany od warunków zewnętrznych wykonano obudowę styropianową o grubości 10 cm. Miejsce styków zostało zaizolowane pianką poliuretanową (rys. 5.24).



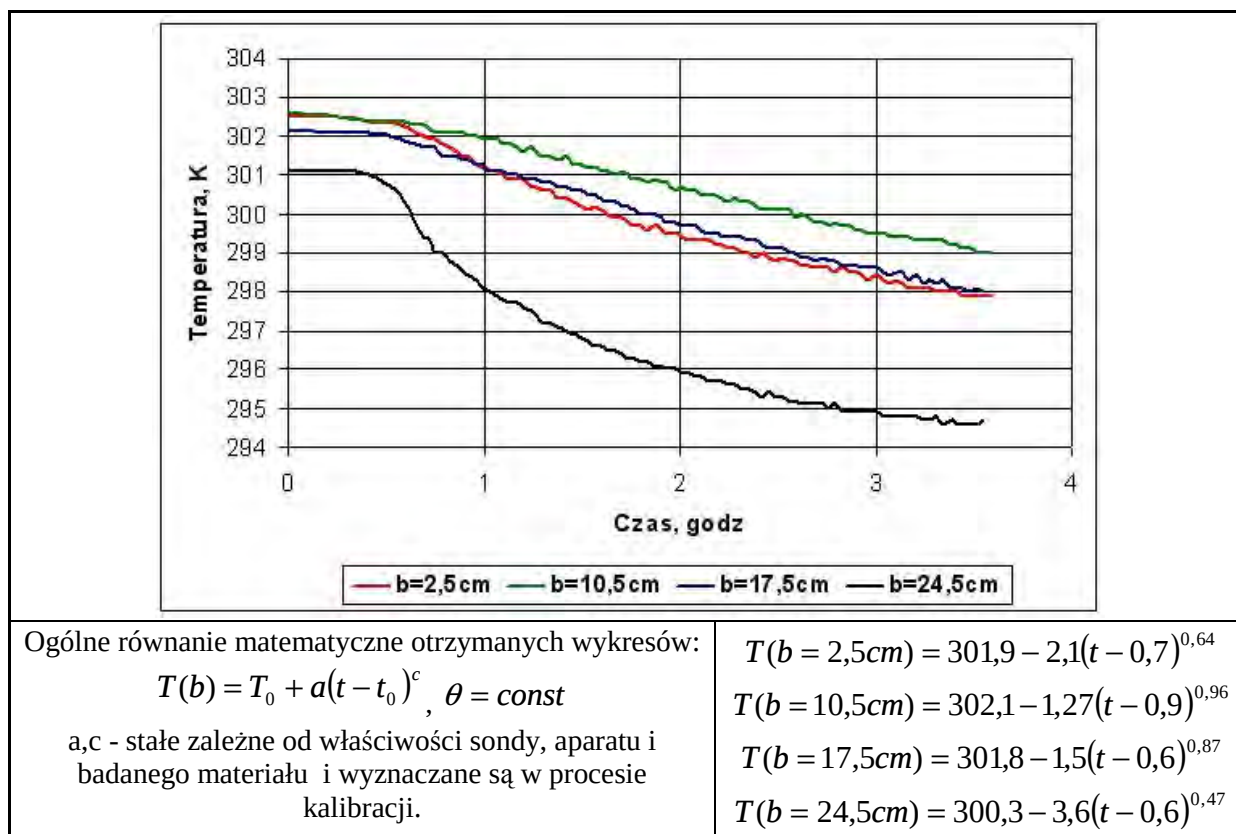
Rys. 5.24. Wygląd próbki i tunelu styropianowego

Wykorzystując system komór klimatycznych odtworzono warunki bliskie rzeczywistym – jedna komora odgrywała rolę środowiska wewnętrznego pomieszczeń i generowała temperaturę 20,5° C, zaś druga funkcjonowała jako strona zewnętrzna i ustalono w niej temperaturę 0° C (rys. 5.25). Czujniki TDR zostały zainstalowane na całej grubości modelowanej przegrody (8 punktów pomiarowych).

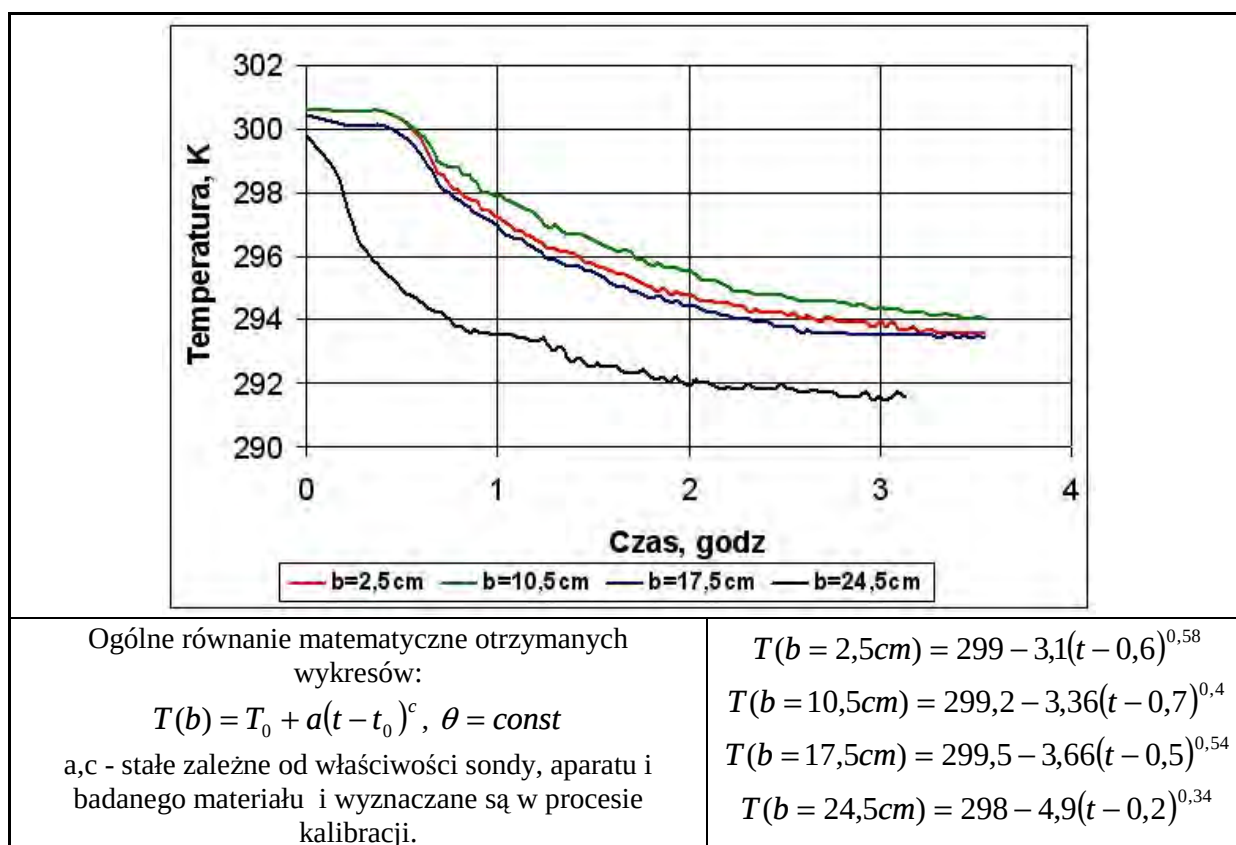


Rys. 5.25. Widok ogólny komory klimatycznej podczas trwania eksperymentu

Badania zmiany temperatur w środku ściany modelowej zostały umieszczone na rys. 5.26-5.29.

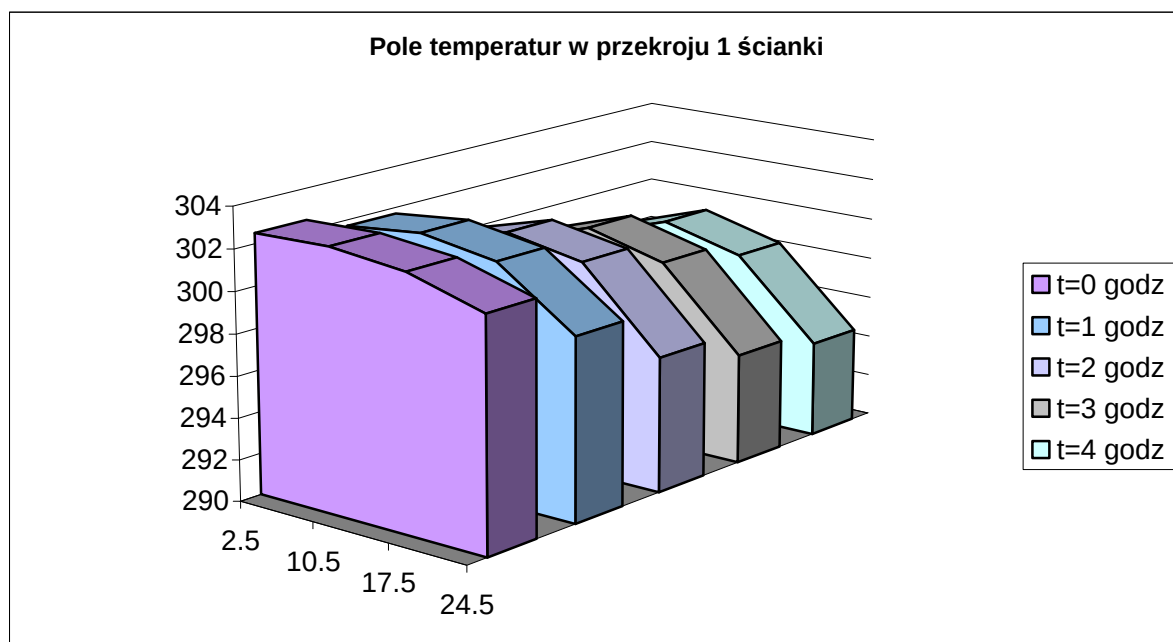


Rys. 5.26. Zmiany temperatury w poszczególnych warstwach próbki w czasie (sondy 0-3)

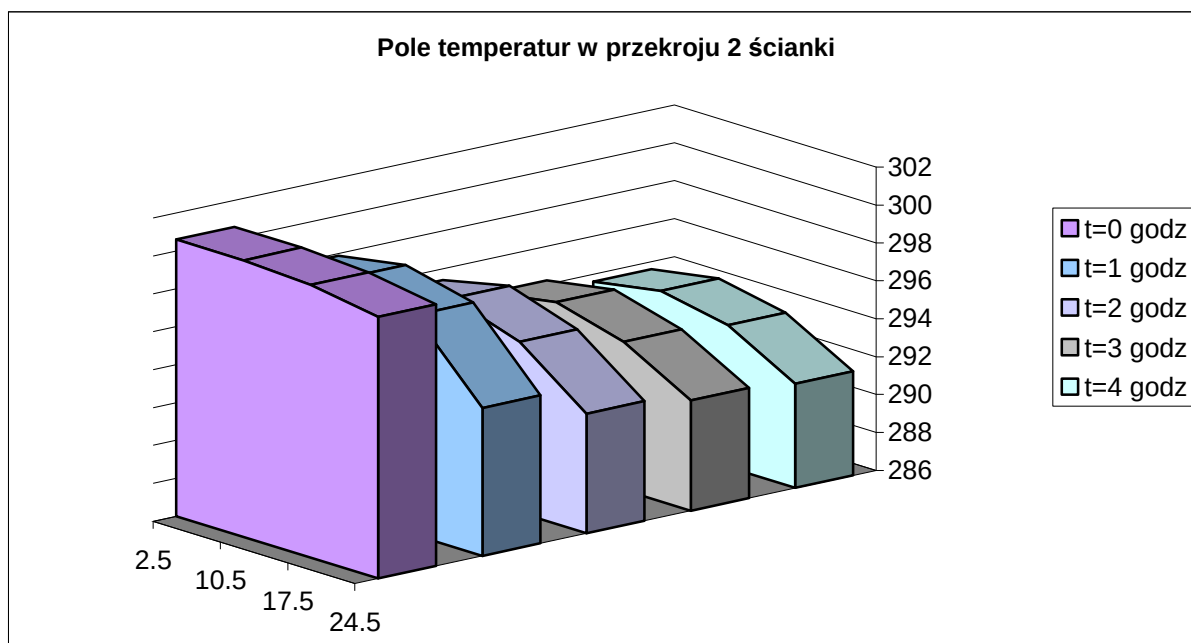


Rys. 5.27. Zmiany temperatury w poszczególnych warstwach próbki w czasie (sondy 4-7)

Zmiany temperatury w przekrojach 1 i 2 (rys. 5.23) pokazano na rys. 5.28-5.29.



Rys. 5.28. Pole temperatur w przekroju 1



Rys. 5.29. Pole temperatur w przekroju 2

Obserwowane w przegrodzie zjawiska pokazały skuteczność zastosowania metody TDR dla określenia zmian temperatur w środku zbudowanej konstrukcji budowlanej. Za pomocy zestawu komór klimatycznych tworzone były stałe warunki zewnętrzne dla przegrody. Otrzymane na rys. 5.26-5.29 zmiany wielkości temperaturowych były logiczne i oczekiwane. Więc zastanawiano wykorzystać zbudowane stanowisko do pomiaru strumienia ciepła przez niektóre materiały budowlane.

5.2.3.2. Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów budowlanych

Współczynnik przewodzenia ciepła jest własnością materiału charakteryzującą dany ośrodek pod względem zdolności przewodzenia ciepła. W ciałach porowatych przewodność cieplna szkieletu materiału jest większa niż przewodność cieplna powietrza. Pory wypełnione powietrzem spełniają zatem rolę izolatora, jeżeli nie są zbyt duże i nie zachodzi w nich konwekcja. Zbyt duże zwiększenie porowatości powoduje powstawanie konwekcji w porach, a tym samym zwiększanie przewodności cieplnej. Pory mogą być wypełnione nie tylko czystym gazem, ale także jego mieszaniną z wodą lub samą wodą. Stąd istotnym czynnikiem wpływającym na przewodność cieplną materiałów porowatych jest ich wilgotność, czyli ilość cieczy zawartej w ciele stałym. Przewodnictwo cieplne ciała porowatego wzrasta wraz z wilgotnością. Dla wielu materiałów budowlanych używanych w normalnych warunkach,

współczynnik przewodzenia ciepła rośnie liniowo wraz ze wzrostem do około 10 % zawartości wilgotności. Wiąże się to ze zwiększeniem kontaktu międzycząsteczkowego wody, która wypełniając pory materiału usuwa z nich powietrze.

W literaturze oraz normach podaje się najczęściej wartości liczbowe współczynnika λ dla materiałów porowatych w stanie powietrzno-suchym. Warunki pomiarów materiału w stanie powietrzno-suchym są nieco odmienne w normach różnych krajów. Można przyjąć, że materiał taki posiada zawilgocenie powstałe w wyniku długotrwałego przebywania w warunkach określonych temperaturą 15-20 °C i wilgotności względnej powietrza około 60 %. Badania przewodności cieplnej odbywają się w temperaturze zbliżonej do 20 °C.

Mówiąc o współczynniku przewodności cieplnej dla materiałów porowatych, należy zaznaczyć, iż jest to tzw. efektywny współczynnik przewodności cieplnej λ_{ef} [rozdz.3.3]. O jego wartości decyduje współczynnik przewodności cieplnej szkieletu ciała porowatego oraz płynu wypełniającego jego pory (cieczy lub mieszaniny cieczy z gazem lub samego gazu).

Przewodzenie ciepła opisane jest wektorowym prawem Fouriera, które dla materiałów izotropowych i jednego kierunku przewodzenia ciepła przyjmuje postać

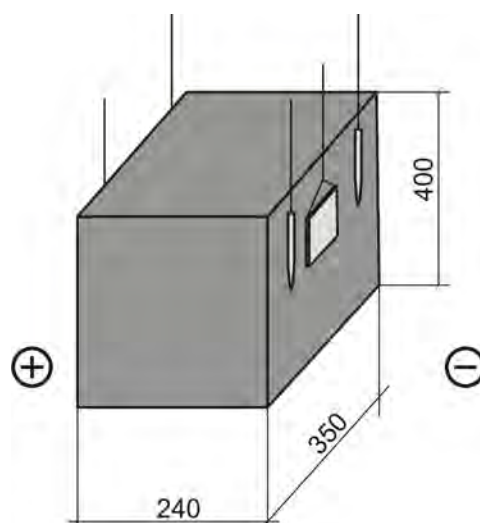
$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.1)$$

gdzie q_x – składowa natężenia strumienia ciepła w kierunku osi x układu współrzędnych, W/m², λ – współczynnik przewodzenia ciepła, W/mK, T – temperatura, K.

Z zależności (5.1) wynika, że natężenie strumienia cieplnego jest wprost proporcjonalne do gradientu temperatury mierzonego wzdłuż kierunku przewodzenia ciepła. Znak minus we wzorze oznacza, że ciepło płynie w kierunku przeciwnym do wzrastającej temperatury.

Badania dotyczyły pomiarów strumienia cieplnego przy zadanych wartościach temperaturowych po obu stronach analizowanego materiału budowlanego. Badania zostały wykonane dla betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej.

Dla wykonania badań została przygotowana próbka betonu komórkowego klasy gęstości 700 o wymiarach 24x35x40 cm (rys.5.30).



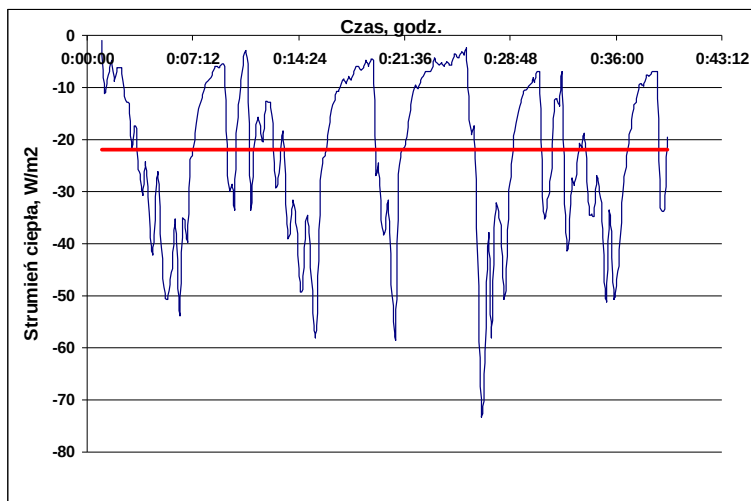
Rys. 5.30 . Schemat próbki betonu komórkowego pod czas wykonania badań współczynnika przewodzenia ciepła

Po obu stronach próbki były umieszczone czujniki Dallas wraz z miernikiem TDR. Z zimnej strony badanego materiału został umieszczony czujnik firmy Ahlborn przeznaczony do pomiaru strumienia ciepła. Próbka została zaizolowana styropianem dla zabezpieczenia jednokierunkowego przepływu ciepła i umieszczona w zestawie komór klimatycznych (rys.5.31).



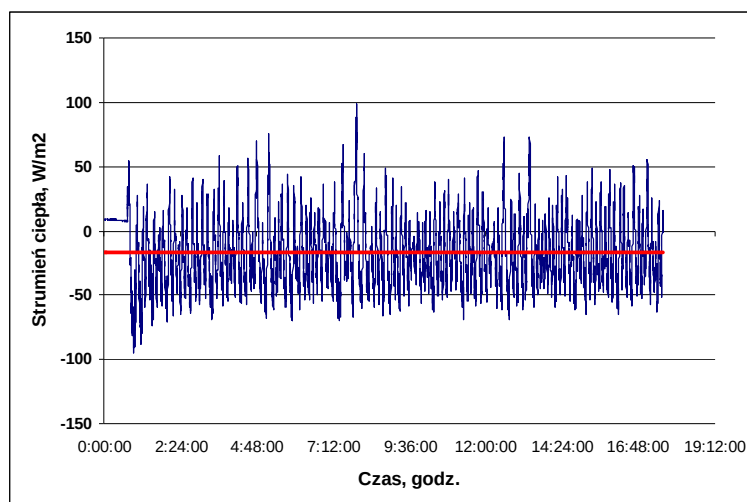
Rys. 5.31. Stanowisko pomiarowe przed wykonaniem badań i pod czas prowadzenia eksperymentu

Temperatury w komorach klimatycznych zmieniano w celu weryfikacji wpływu gradientu temperatur na wartość strumienia cieplnego. Dzięki temu uzyskano zależności wielkości strumienia cieplnego od gradientu temperatur. Czujnik do pomiaru strumienia ciepła mierzył wartości co 10 s.



Rys. 5.32 . Pomiar strumienia ciepła dla betonu komórkowego przy zadanych temperaturach w komorach 0 °C i 20 °C

Z otrzymanych wartości strumienia ciepła (rys. 5.32) można policzyć wartość średnią $q_{sr} = -21,835 \text{ W/m}^2$. Po podstawieniu we wzór (5.1) znajdziemy $\lambda_{sr} = 0,262 \text{ W/mK}$. Producent wybranych bloczków betonu komórkowego Solbet Lubartów S.A. podaje wartość obliczeniową $\lambda = 0,25 \text{ W/mK}$ dla klasy gęstości 700. Różnicę znaczeń można wyjaśnić tym, że próbka materiału nie była wysuszona przed wykonaniem pomiaru, a miała wilgotność początkową do 5%. Znaczne wahania wielkości q , które widać z rys. 5.32 spowodowane wpływem wentylatorów komór klimatycznych na czujnik pomiarowy, który nie udało się pominąć nawet zastosowaniem izolacji. Jednak otrzymane wartości średnie świadczą o dużej dokładności w porównaniu z danymi producenta.



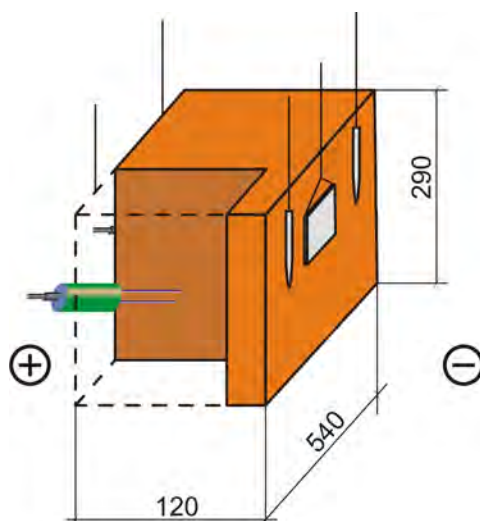
Rys. 5.33. Pomiar strumienia ciepła dla betonu komórkowego przy zadanych temperaturach w komorach 5 °C i 20 °C

Z rys. 5.33 otrzymano wartość średnią $q_{sr} = -16,567 \text{ W/m}^2$, co daje $\lambda_{sr} = 0,265 \text{ W/mK}$.

Tab. 5.2. Pomiar strumienia ciepła q i wartości współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od różnicy temperatur w komorach klimatycznych dla betonu komórkowego klasy 700

Różnica temperatur, ΔT , [K]	Strumień ciepła q , [W/m ²]	Współczynnik przewodzenia ciepła, λ , [W/mK]
20	-21,835	0,262
18	-19,7	0,263
16	-17,6	0,264
15	-16,567	0,265
13	-10,8	0,2
12	-14	0,28
10	-10,1	0,242
9	-9,2	0,245

W przypadku obserwacji zjawiska przewodzenia ciepła w próbce cegły ceramicznej wykonano ściankę z cegieł gęstości 1820 kg/m^3 , postać której pokazana na rys. 5.34.

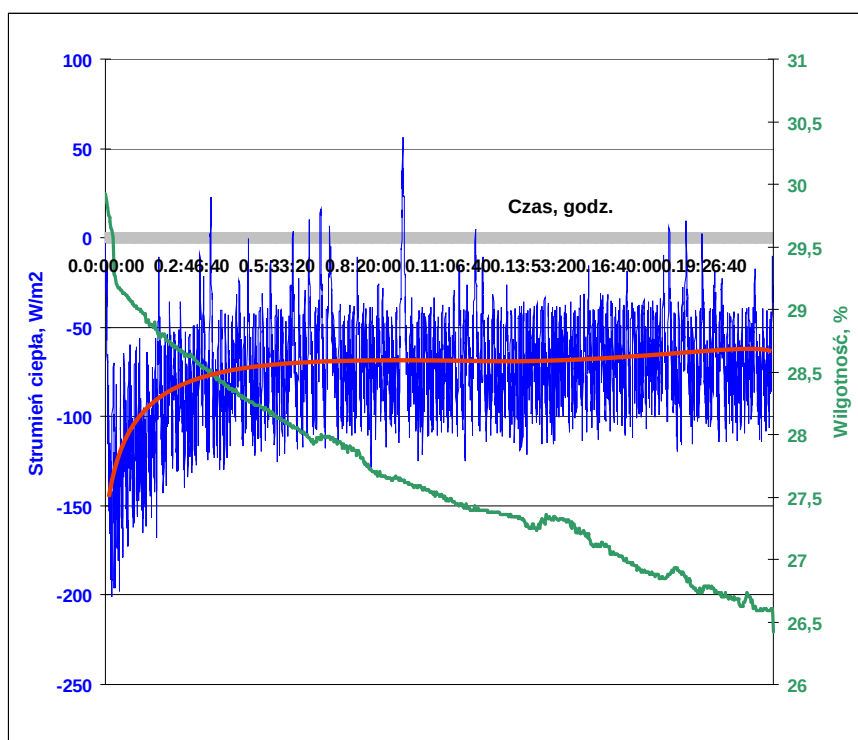


Rys. 5.34. Schemat ścianki z cegły ceramicznej pełnej pod czas wykonania badań współczynnika przewodzenia ciepła

Przed początkiem eksperymentu próbka była nasycona wodą do 30 % wilgotności. W cegle były zainstalowane dwa czujniki TDR, za pomocy których i miernika TDR rejestrowana temperatura i wilgotność w środku materiału. Z obu stron próbki były umieszczone czujniki temperatur Dallas i z zimnej strony ścianki czujnik do pomiaru strumienia ciepła. Dalej ścianka z cegieł została ułożona na stoliku pomiędzy komorami klimatycznymi i dokładnie zaizolowana od wpływu zewnętrznego (rys.5.35). Później za pomocy zestawu komór klimatycznych zadawano różne parametry brzegowe (temperaturę).



Rys. 5.35. Podciąganie kapilarne przez cegły i stanowisko pomiarowe przed wykonaniem badań



Rys. 5.36. Pomiar strumienia ciepła dla cegły ceramicznej przy zadanych temperaturach w komorach 5 °C i 15 °C i malejącej wilgotności próbki

Wyniki przedstawiono w tab.5.3.

Otrzymane z rys. 5.36 dane, które zostały zamieszczone w tab. 5.3 pokazują zmianę współczynnika przewodzenia ciepła wraz ze zmianą zawartości wilgoci w próbce. Można zaobserwować skok wartości współczynnika λ o 2 razy za czas trwania badań. Na początku widoczny jest dynamiczny spadek współczynnika wraz z intensywnym przebiegiem procesu wysychania próbki. Później zmianę wielkości strumienia ciepła, a z niej i współczynnika przewodzenia ciepła już prawie nie widać. Przez długi czas badań ta wartość ma średnie znaczenie 68 W/m², co daje $\lambda_{sr}=0,816$ W/mK. Dane wilgotności nie dają pełnej informacji o wilgotności próbki, ponieważ jest to wilgotność w dwóch punktach pomiarowych w środku próbki. Dla uzyskania wiarygodnych oznaczeń wilgotności niezbędnym jest stosowanie metody grawimetrycznej, co nie było możliwe w tym eksperymencie z uwagi na znaczne wymiary próbki. Z przedstawionego eksperymentu wynika, że wielkość współczynnika przewodzenia ciepła jest bardzo uzależniona od zawartości wilgoci w materiale budowlanym. W ciągu jednej doby współczynnik przewodzenia ciepła może zmniejszyć swoją wartość dwukrotnie.

Wartość średnia $\lambda_{sr}=0,816$ W/mK odpowiada danym, które podaje producent cegły ceramicznej pełnej – Cegielnia Kraśnicka - $\lambda=0,77$ W/mK. Większe znaczenie współczynnika przewodzenia ciepła można wyjaśnić zawartością wilgoci w próbce cegły.

Tab. 5.3. Pomiar strumienia ciepła q i wartości współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od różnicy temperatur w komorach klimatycznych dla cegły ceramicznej

Wilgotność w miejscu zainstalowania czujników, %	Strumień ciepła q , [W/m ²]	Współczynnik przewodzenia ciepła, λ , [W/mK]
30,0	-142,6	1,711
29,7	-139,8	1,680
29,5	-130,2	1,562
29,2	-118,7	1,424
29,0	-100,5	1,206
28,8	-81,7	0,980
28,6	-78,6	0,943
28,5	-77,2	0,926
28,2	-70,8	0,850
28,0	-69,6	0,835
27,8	-69,4	0,833
27,5	-69,1	0,892
27,3	-68,5	0,822
27,0	-68,1	0,817
26,9	-67,9	0,815
26,7	-67,9	0,815

Przy stałej zawartości wilgoci w próbce otrzymane zostały następujące wielkości strumienia ciepła i współczynnika przewodzenia ciepła (tab.5.4)

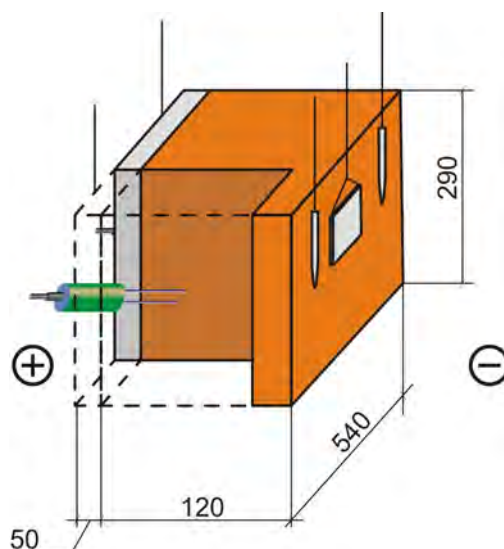
Tab. 5.4. Pomiar strumienia ciepła q i wartości współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od różnicy temperatur w komorach klimatycznych dla cegły ceramicznej

Różnica temperatur, ΔT , [K]	Strumień ciepła q , [W/m ²]	Współczynnik przewodzenia ciepła, λ , [W/mK]
20	-106,7	0,640
17	-101	0,713
16	-96,5	0,724
15	-92,7	0,742
13	-89,7	0,828
12	-74,7	0,747
10	-60,5	0,726

9	-47,3	0,631
---	-------	-------

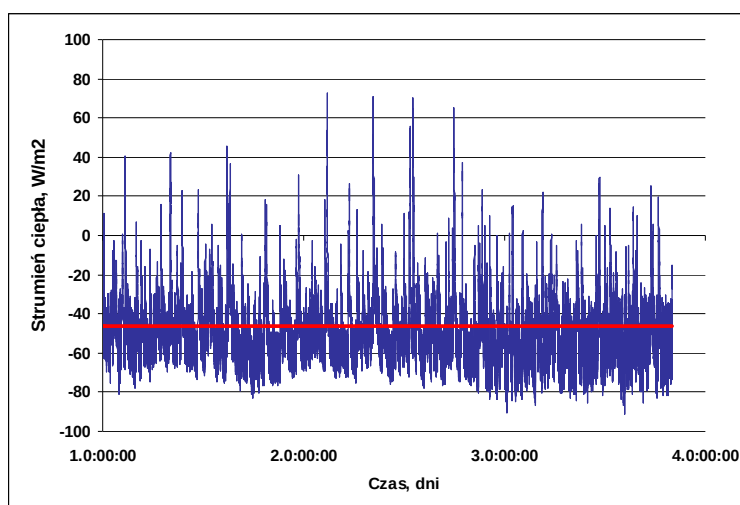
Z danych zamieszczonych w tab. 5.4 wartość λ_{sr} stanowi 0,72 W/mK co jest bardzo bliską wartością w stosunku do danych podawanych ($\lambda=0,77$ W/mK) przez producenta.

Ostatni eksperyment, celem którego było mierzenie strumienia ciepła i wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła prowadzony był na ścianie, schemat której pokazany na rys. 5.37.



Rys. 5.37. Konstrukcja ścianki z cegły ceramicznej pełnej i silikatu wapiennego podczas wykonania pomiarów gęstości strumienia ciepła

Od strony ciepłej do ścianki z cegły ceramicznej dopasowana została warstwa silikatu wapiennego grubością 5 cm. W ściankę wmontowane zostały dwa czujniki TDR i po obu stronach czujniki temperaturowe Dallas. Dane od wszystkich czujników rejestrowane zostały przez miernik TDR. Z zimnej strony ścianki umieszczony strumieniomierz, pozwalający określać wartość strumienia ciepła przez potrzebny okres czasowy.



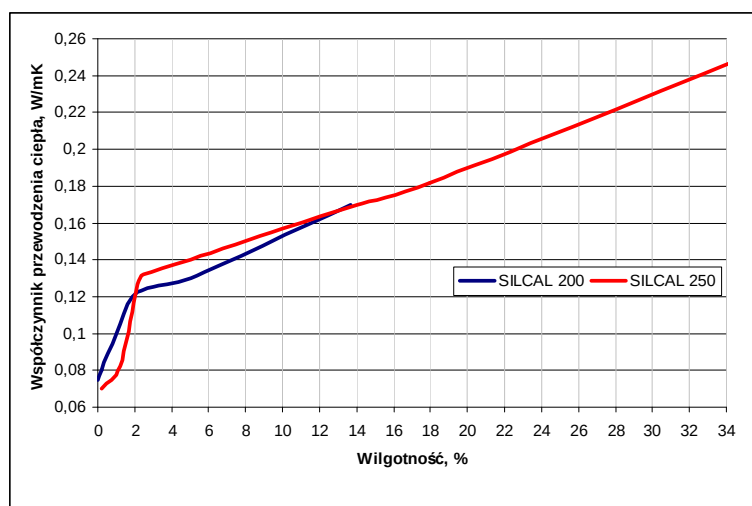
Rys. 5.38 . Pomiar strumienia ciepła dla cegły ceramicznej i silikatu wapiennego przy zadanych temperaturach w komorach 0 °C i 22 °C

Mając w poprzednim eksperymencie wielkość $\lambda_{sr}=0,72$ W/mK dla cegły ceramicznej, biorąc średnie strumienia ciepła z rys. 5.38 $q_{sr}=-46,42$ W/m² można wyliczyć wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla silikatu wapiennego ze wzoru:

$$q_x = \frac{\Delta T}{\left(\frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} \right)} \quad (5.2)$$

Otrzymana wielkość współczynnika przewodzenia ciepła dla silikatu składa $\lambda_{sr}=0,17$ W/mK.

W literaturze można spotkać następujące dane odnośnie silikatu wapiennego:



Rys. 5.39. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła silikatu wapiennego od zawilgocenia materiału [62]

Otrzymane drogą eksperymentalną wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla silikatu wapiennego są bardzo prawdopodobne, ponieważ wilgotność w miejscu zainstalowania czujników w cegle stanowiła 24-26 %, można przyjąć, że i silikat podciągnął pełną ilość wilgoci. Zgodnie z rys. 5.39 ta wartość miała by stanowić około 13-14 %.

W wyniku prowadzonych badań po raz kolejny potwierdzona została trafność stosowania metody TDR i stanowiska pomiarowego komór klimatycznych, ponieważ otrzymane drogą eksperymentalną wielkości współczynnika przewodzenia ciepła są bardzo zbliżone do danych producentów wybranych materiałów budowlanych.

5.2.3.3. Wyznaczanie ciepła właściwego

Dla opisu niestacjonarnego przepływu ciepła przez przegrody budowlane nie wystarczy informacja tylko o przewodności cieplnej materiału. W tych warunkach istotną rolę gra również inny parametr, a mianowicie ciepło właściwe materiału. Jest to informacja o tym, jaka ilość ciepła jest potrzebna do podgrzania materiału w warunkach wzrastającej temperatury. Do określenia wartości ciepła właściwego materiałów budowlanych stosowana została metoda kalorymetryczna. Kalorymetria (łac. calor - ciepło; dział nauki zajmujący się mierzeniem ilości ciepła) opiera się na kilku zasadach, które można wyrazić następująco:

- ilość ciepła ΔQ_1 oddana przez ciało badane jest równa ilości ciepła ΔQ_2 pobranej przez jego otoczenie (przez ciała otaczające)

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 \quad (5.3)$$

- ilość ciepła pobrana przez ciało podczas ogrzewania jest równa ilości ciepła oddanej podczas ostygnięcia w tym samym zakresie temperatur jeśli ciało przechodzi przez te same stany pośrednie w odwrotnej kolejności;
- ilość ciepła ΔQ oddana bądź pobrana przez ciało jednorodne jest proporcjonalna do jego masy, a przy niewielkich zmianach temperatury - do przyrostu temperatury:

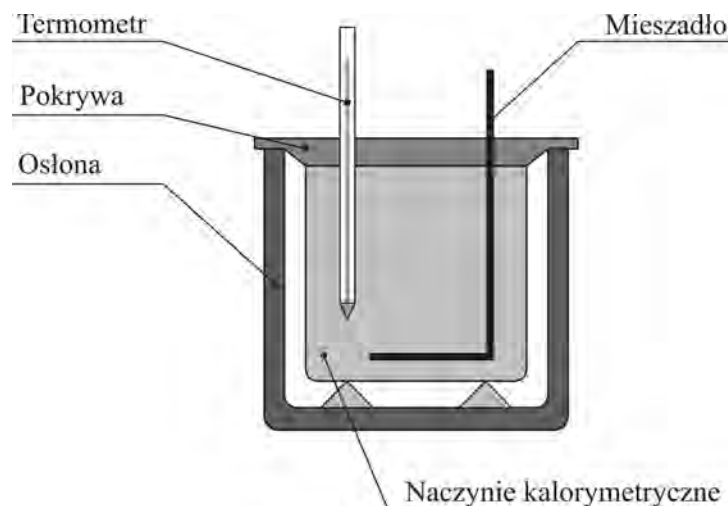
$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (5.4)$$

gdzie c – ciepło właściwe ciała, J/kg ; m – masa ciała, kg; ΔT – różnica temperatur,

K.

Zależność (5.3) jest zasadą zachowania energii ograniczoną wyłącznie do procesów wymiany ciepła pomiędzy ciałami o różnych temperaturach, gdy ciała przyjmujące lub oddające ciepło nie wykonują równocześnie pracy, ani też, że jest ona na nich wykonana.

W kalorymetrii rolę urządzenia podstawowego spełnia kalorymetr. Zasadniczymi jego częściami są: metalowe naczynie kalorymetryczne, w które wlewamy odważoną ilość wody, dokładny termometr oraz mieszadło (rys. 5.40).



Rys. 5.40. Budowa kalorymetru laboratoryjnego

Naczynie jest ustawione wewnątrz większego o podwójnych ściankach, pomiędzy którymi znajduje się płaszcz wodny, na nóżkach wykonanych z drewna. Zadaniem osłony i pokrywy jest uniemożliwienie wymiany ciepła ciał znajdujących się w naczyniu z otoczeniem; np. przez konwekcję, przewodzenie lub parowanie, czego nie dałoby się dokładnie skontrolować. Do naczynia wkładano badane próbki o znanej temperaturze, innej niż temperatura wody i wyznaczano temperaturę końcową, wspólną dla wszystkich ciał biorących udział w wymianie ciepła, tj. dla badanego materiału budowlanego, wody, naczynia kalorymetrycznego (rys. 5.41). Znając masy oraz zmiany temperatur ciał biorących udział w wymianie ciepła wyznaczano pobrane i oddane ilości ciepła. Ciepło właściwe wyznaczano ze wzoru:

$$C_x = \frac{(AV + m_c C_c + m_k C_k) \cdot (T_k - T_o)}{m(T_p - T_k)} \quad (5.5)$$

gdzie $A=1,92 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ – pojemność cieplna szkła i rtęci; $V=0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ – objętość zanurzonej części termometru; $C_c=4190 \text{ J/kgK}$ – pojemność cieplna wody; $C_k=896 \text{ J/kgK}$ – pojemność cieplna kalorymetru; m_c – masa wody w kalorymetrze, kg; m_k – masa kalorymetru, kg; m – masa badanego materiału, kg; T_k – temperatura końcowa, K; T_o – temperatura początkowa wody, K; T_p – temperatura, do której zostały nagrzewane próbki materiału, K.



Rys. 5.41. Przygotowane stanowisko dla pomiaru ciepła właściwego

Dane przedstawia tab. 5.5.

Tab. 5.5. Ciepło właściwe wybranych materiałów budowlanych uzyskane eksperymentalnie

Materiał budowlany	C_1 , J/kgK	C_2 , J/kgK	C_3 , J/kgK	C , kJ/kgK
Beton komórkowy, 700 kg/m ³	888	881	905,3	0,892
Beton komórkowy, 600 kg/m ³	1259,4	1220	1173	1,218
Cegła ceramiczna, 1700 kg/m ³	730	745	850,4	0,775

W literaturze rzadko spotykane dane eksperymentalne o wielkości ciepła właściwego materiałów budowlanych. Można odnaleźć wartości tego parametru w stanie suchym, przytaczane przez różnych autorów [15, 157], np. $C=0,88$ kJ/kgK dla cegły lub 0,84 kJ/kgK dla betonów lekkich. W literaturze ogólnowiatowej dane na temat ciepła właściwego materiałów budowlanych cechuje duży rozrzut. Np. dla cegły ceramicznej parametr ten waha się w zakresie 0,75-0,9 kJ/kgK, dla betonów lekkich – 0,84-1,2 kJ/kgK. Dla przybliżonego określenia ciepła właściwego wilgotnych materiałów budowlanych można korzystać ze wzoru [15]:

$$C = \frac{C_0 + 0,01\theta}{1 + 0,01\theta} \quad (5.6)$$

gdzie C_0 – ciepło właściwe materiału w stanie suchym, θ – wilgotność masowa, %.

5.2.4. Badanie zjawiska termodyfuzji

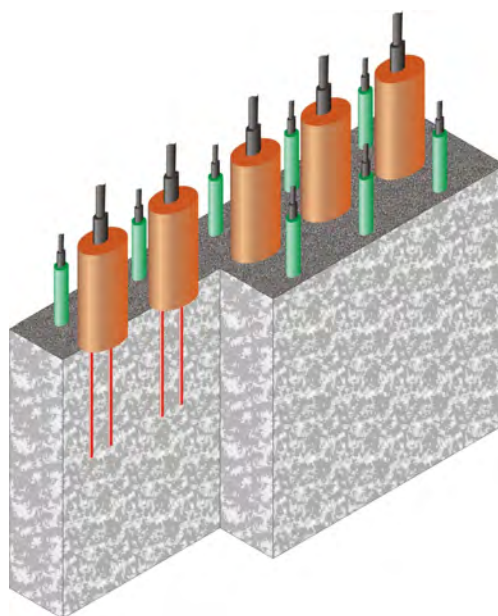
Materiały:

- system komór klimatycznych;
- miernik TDR do pomiaru wilgotności ośrodka oraz temperatury;
- sondy TDR LP/mts do pomiaru zmian wilgotności ośrodka;
- sondy z czujnikami cyfrowymi typu Dallas;
- zaizolowana próbka betonu komórkowego o gęstości w stanie suchym 400 kg/m³.

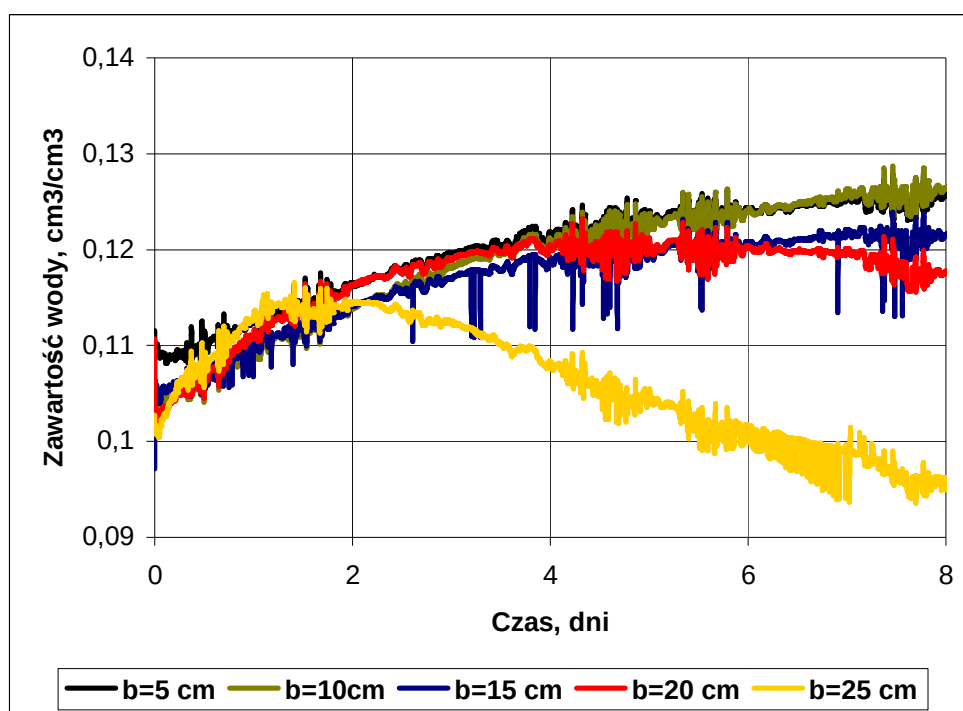
Za pomocą komór klimatycznych zaobserwowano zjawisko przepływu wody w materiałach budowlanych, wymuszonego gradientem temperatury.

Przygotowano próbkę betonu komórkowego o wymiarach 30×24×12 cm. Beton komórkowy nasączono wodą do stanu ok. 10 %. Następnie zaizolowano powłoką bitumiczną. Tak przygotowaną próbkę uzbrojono w czujniki – 5 sond TDR (rozstaw 5 cm) oraz na równoważnych wysokościach zestawu dwóch sond Dallas, celem monitoringu temperatury w określonych punktach próbki (rys. 5.42).

Uzbrojoną próbkę umieszczono pomiędzy dwoma komorami klimatycznymi, zaizolowano styropianem i pianką poliuretanową. Uruchomiono zestaw pomiarowy i komory zadając parametry temperatury 0° C (strona zimna) i 30° C (strona ciepła). Czas trwania eksperymentu – 8 dni.



Rys. 5.42. Rozmieszczenie sond TDR w próbce



Rys. 5.43. Zmiany zawartości wody na skutek gradientu temperatur w betonie komórkowym

Z wykresu (rys. 5.43) reprezentującego uzyskane wyniki badań widać, iż w badanym materiale zachodził proces termodyfuzji na skutek gradientu temperatur. Sondy 1 i 2 zlokalizowane były najbliżej zimnej strony (0°C). Sonda nr 3 zlokalizowana była na środku

próbki, z kolei sondy 4 oraz 5 umieszczono bliżej nagrzewanej strony (30° C). Na początku eksperymentu (przez okres 2 dni) obserwujemy wyraźny wzrost zawartości wody w próbce (ponad 1% objętościowy). Można to zjawisko wytłumaczyć faktem, iż po nasączeniu próbki woda nie rozkładała się w niej równomiernie, tj. po ponad dwóch dniach osiągnięty został pewien stan równowagi. Po dwóch dniach proces wzrostu wilgotności w zasadzie w dalszym ciągu trwał, można jednak dopatrywać się nim innych przyczyn. Główną przyczyną dalszego wzrostu było zjawisko termodyfuzji, czyli przenoszenia wody na skutek gradientu temperatury. Woda w ośrodku o wyższej temperaturze wykazuje większą ruchliwość i płynie w kierunku o niższej wartości temperatury. Widać to na powyższym wykresie, gdzie w skutek opisywanego procesu obserwujemy przyrost wody w zimnej części próbki (sondy 1 i 2). Sonda 3, umieszczona pośrodku okazuje się wykazywać ustabilizowany stan wilgotnościowy. Natomiast sonda 4 (kolor czerwony), po stronie cieplej pokazuje, iż po cieplej stronie próbki w pewnym momencie zaczyna być mniej wody, zaś sonda 5, najbliżej strony cieplej i pozostająca pod jej bezpośrednim wpływem wykazuje znaczny ubytek wody. Zakładając szczelność izolacji bitumicznej (przed i po eksperymencie próbka nie wykazała ubytku masy) można przypuszczać, iż powyższa obserwacja jest wynikiem zjawiska termodyfuzji.

5.2.5. Wyznaczanie współczynnika dyfuzji wilgoci w wybranych materiałach budowlanych

Wyniki badań wysychania można za pomocy transformacji Boltzmann [27] wykorzystać do odzyskania zależności współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci.

Bilans masowy można zapisać:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(k \cdot \text{grad} \theta) \quad (5.7)$$

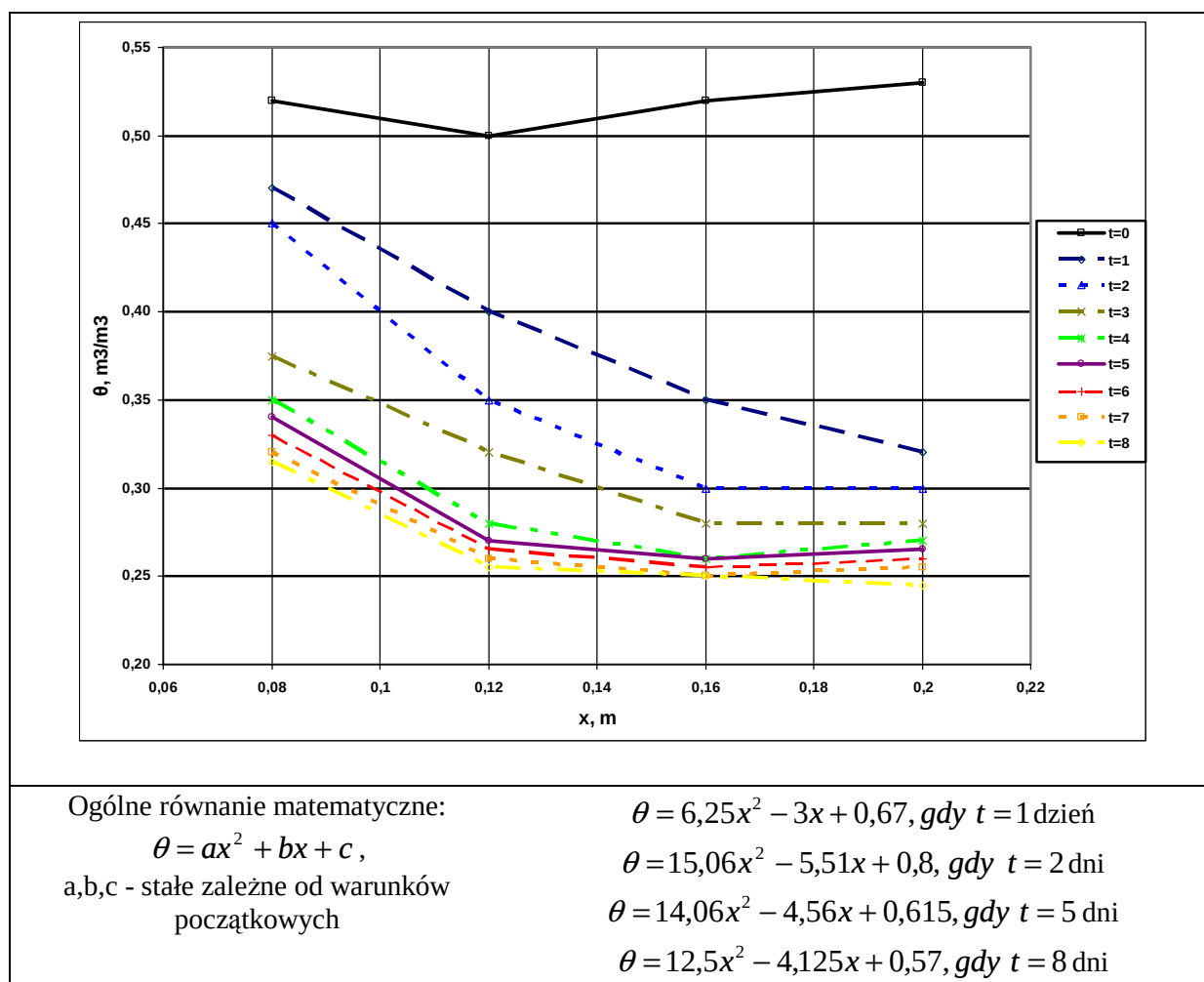
gdzie k – dyfuzja wilgoci.

Zgodnie z [27] transformacja Boltzmann może przekształcić równanie (5.7) w

$$k(\theta) = \frac{1}{2t \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{\theta_i}} \int_0^{\theta_i} x d\theta \quad (5.8)$$

Skąd możemy odnaleźć funkcję zależności współczynnika dyfuzji k od zawartości wilgoci θ .

Dla rozwiązania równania (5.8) niezbędnym jest określenie charakteru funkcji $\theta(x)$. Na podstawie rys. 5.10 z uzyskanych wyników desorpcji wody w betonie komórkowym otrzymany został następny wykres.



Rys. 5.44. Rozkład wilgotności w wybranych punktach próbki badanego betonu komórkowego w różnych przedziałach czasowych

Widocznym jest znaczny spadek wilgotności próbki w jej górnej części ($x=0,2$ m) w ciągu pierwszej doby. Już dalej wilgotność spada mniej intensywnie. Uzyskanych funkcji nie można sprowadzić do jakiejś jednej średniej krzywej, tj. w każdym momencie czasowym zmiana wilgotności po grubości próbki różni się. Obserwowano bardzo bliski charakter zmiany wilgotności w ostatnie dni trwania eksperymentu, co można wyjaśnić bliskością uzyskania stanu równoważnego z otoczeniem.

Obróbka wyników oparta na rozwiązaniu różniczkowania $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)^{-1}$ i całkowania

$$\int_0^{\theta} x(\theta) d\theta.$$

Algorytm jest następujący:

Dla $\theta = 6,25x^2 - 3x + 0,67$, gdy $t = 1$ ($t=86400$ s)

$$\frac{d\theta}{dx} = 12,5x - 3$$

$$d\theta = (12,5x - 3)dx$$

$$k(\theta) = \frac{1}{2t} (12,5x - 3)^{-1} \Big|_{\theta}^{\theta_i} \int_0^{\theta_i} x(12,5x - 3)dx$$

$$k(\theta) = \frac{1}{2t} (12,5x - 3)^{-1} \Big|_{\theta}^{\theta_i} \left(12,5 \frac{x^3}{3} - 3 \frac{x^2}{2} \right) \Big|_0^{\theta_i}$$

$$k(\theta) = \frac{1}{2t} (12,5\theta_i - 3)^{-1} (4,17\theta_i^3 - 1,5\theta_i^2)$$

Dla trzech wybranych punktów:

$$k(0,47 \text{ m}^3 / \text{m}^3) = \frac{1}{2 \cdot 86400} (12,5 \cdot 0,47 - 3)^{-1} (4,17 \cdot 0,47^3 - 1,5 \cdot 0,47^2) = 2,01E - 07 ,$$

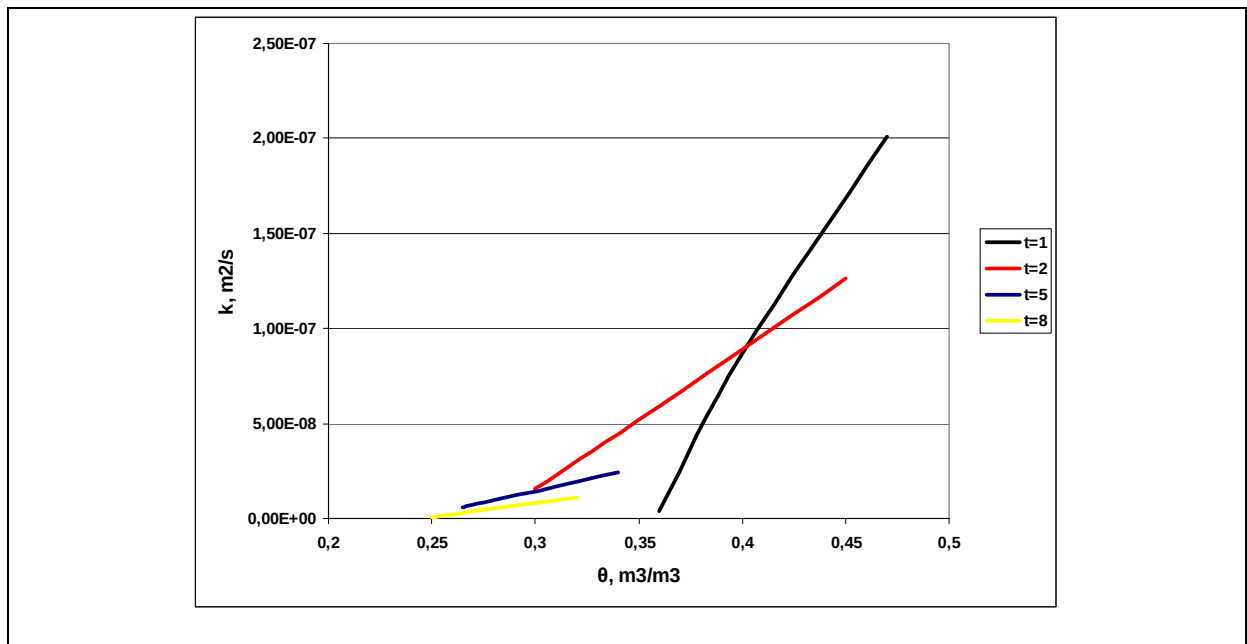
m^2/s

$$k(0,4 \text{ m}^3 / \text{m}^3) = \frac{1}{2 \cdot 86400} (12,5 \cdot 0,4 - 3)^{-1} (4,17 \cdot 0,4^3 - 1,5 \cdot 0,4^2) = 8,68E - 08 , \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k(0,36 \text{ m}^3 / \text{m}^3) = \frac{1}{2 \cdot 86400} (12,5 \cdot 0,36 - 3)^{-1} (4,17 \cdot 0,36^3 - 1,5 \cdot 0,36^2) = 3,86E - 09 ,$$

m^2/s .

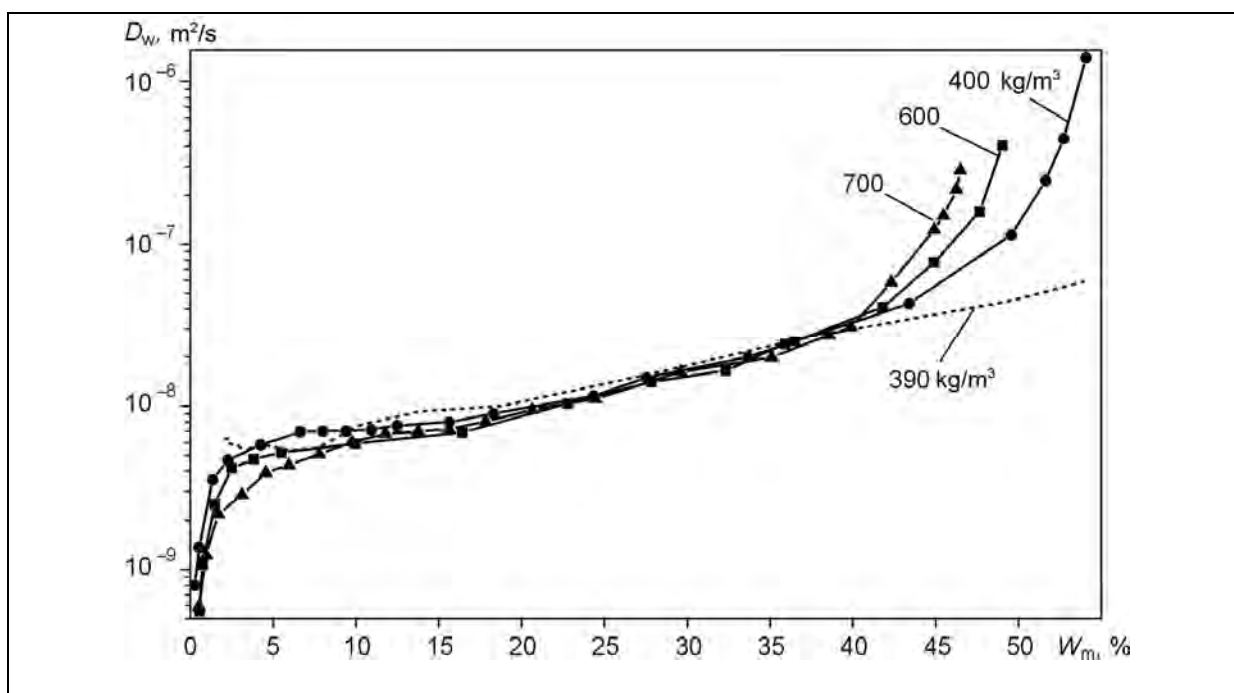
Otrzymane zostały następujące profile:



Rys. 5.45. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w betonie komórkowym podczas desorpcji

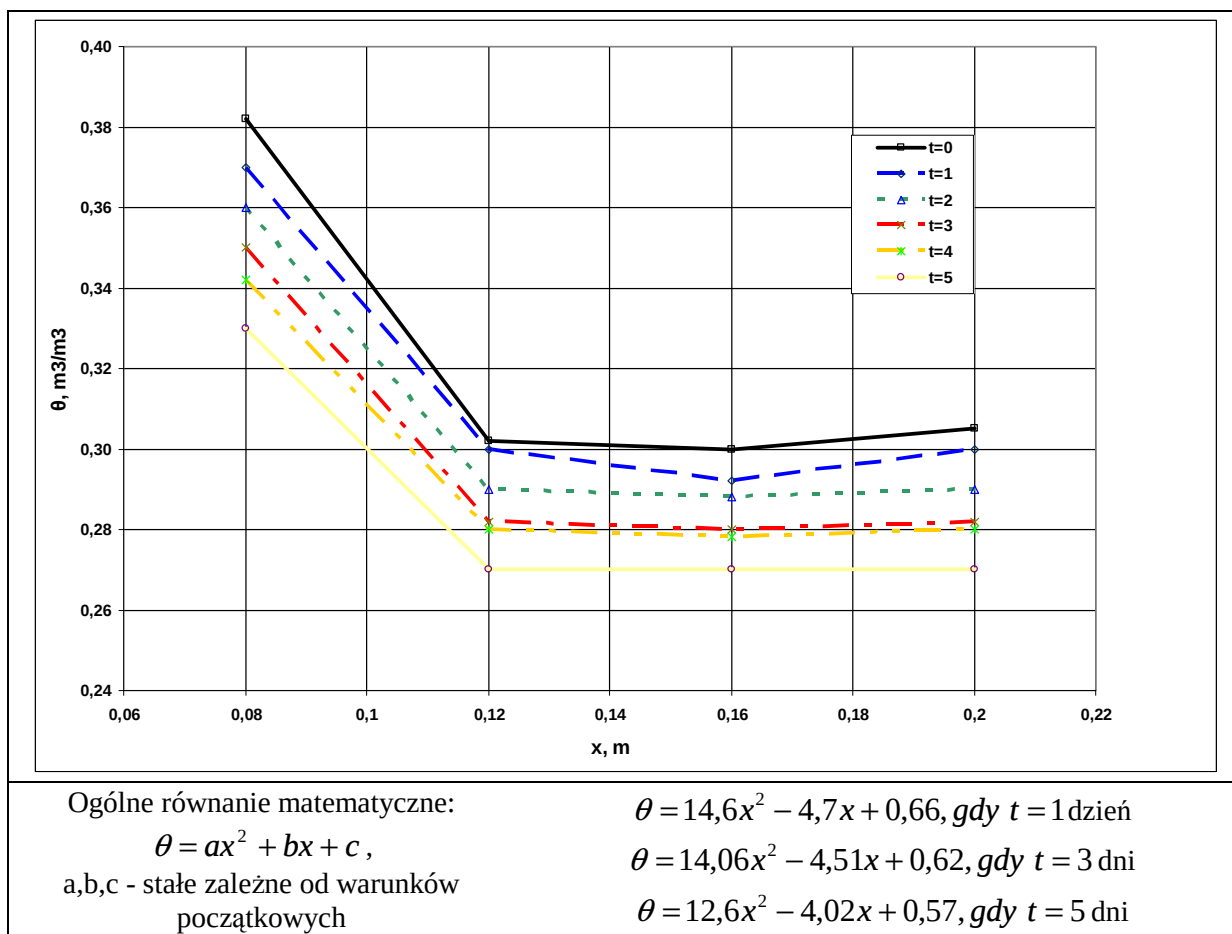
Uzyskano przebiegi dla czterech wybranych momentów czasowych. W rzeczywistości, podobne profile można otrzymać dla różnych przedziałów czasowych, wykorzystując poprzednio pokazane transformacje. Fakt, że nawet przy jednakowych zawartościach wilgoci w próbce współczynnik dyfuzji jest inny można wyjaśnić tym, że wartość wilgotności w jednym punkcie, np. $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ została osiągnięta w innym punkcie pomiarowym, w całkowicie innym czasie. Oczywiście jest, że przy $t \rightarrow t_n$ będzie $k \rightarrow 0$, gdzie t_n – czas nastąpienia równowagi sorpcyjnej z otoczeniem, do którego następuje wysychanie. Ciekawym jest miejsce przełamania krzywych dla pierwszego i drugiego dnia badań. Mówi to o tym, że przy wilgotności próbki około $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ i dla $t=1$ i dla $t=2$, współczynnik dyfuzji wilgoci jest stały. Można to wyjaśnić istnieniem dwóch różnych okresów w suszeniu materiałów [91] – okresami stałej prędkości wysychania i zmniejszającej się. Mianowicie, do czasu $t=2$ dni, w tym eksperymencie obserwowany jeszcze okres 1 – stałej prędkości desorpcji.

Otrzymane wykresy dla betonu komórkowego są bardzo zbliżone do wyników eksperymentalnych innych badaczy w rozpatrywanym przedziale wilgotnościowym. W pracy [166] są następujące zależności dla betonów komórkowych o różnej gęstości:



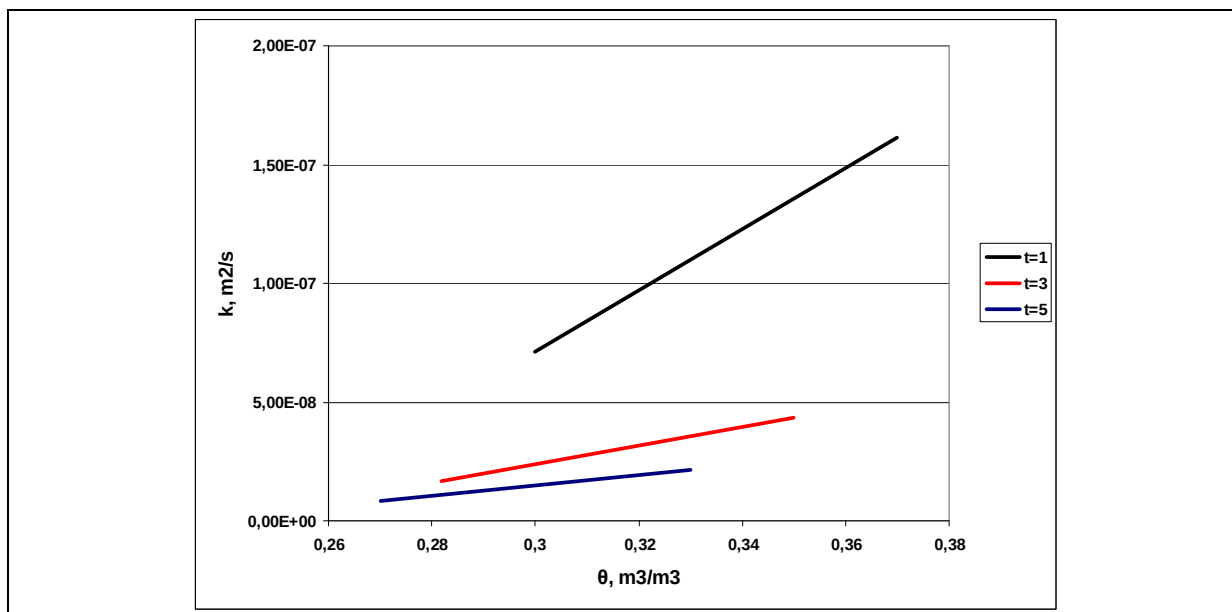
Rys. 5.46. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w betonie komórkowym [166]

Dla cegły ceramicznej z rys. 5.11 otrzymane następujące zależności:



Rys. 5.47. Rozkład wilgotności w wybranych punktach próbki badanej cegły ceramicznej w różnych przedziałach czasowych

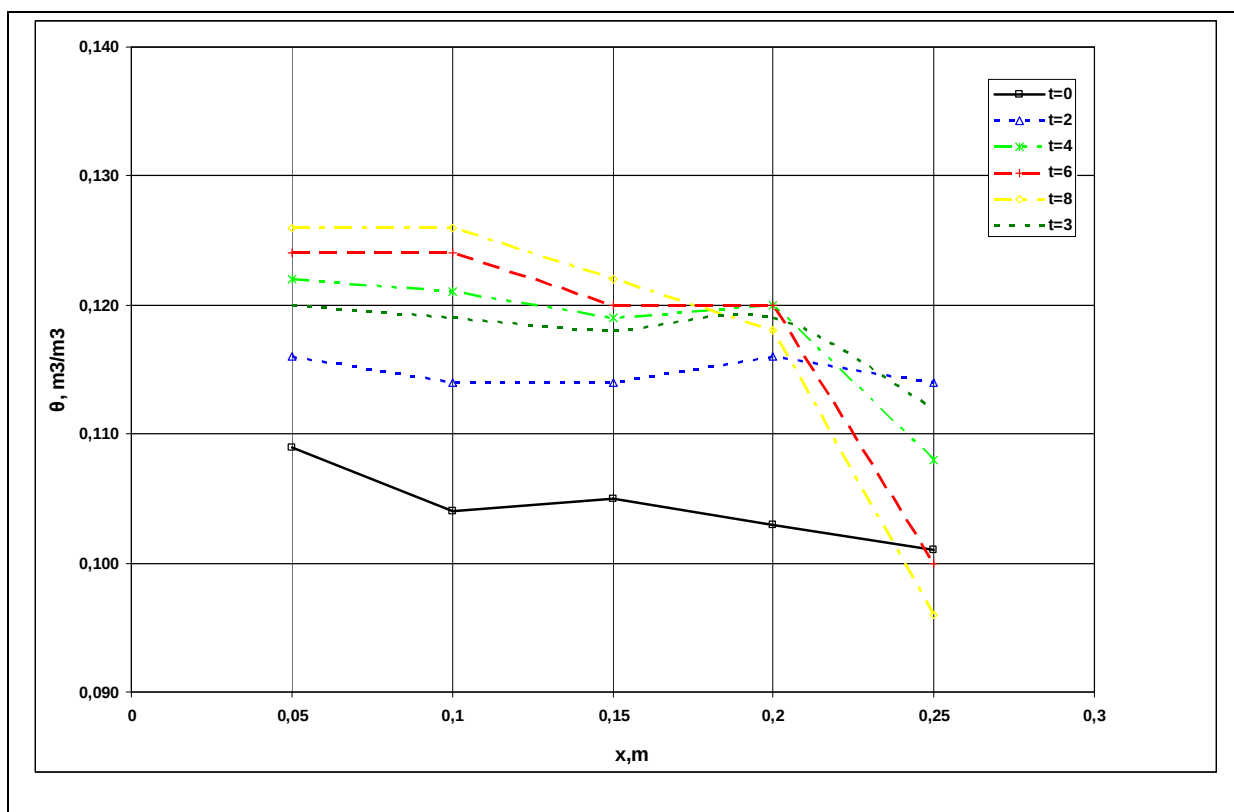
Otrzymane po transformacji Boltzmanna zależności mają następujący kształt:



Rys. 5.48. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od wilgotności w cegle ceramicznej podczas desorpcji

Otrzymane dane zostały zebrane dla trzech parametrów czasowych. Czas trwania suszenia cegły trwał krócej w porównywaniu z podobnym dla betonu komórkowego. Dla odmiany, w porównaniu do poprzednio otrzymanych krzywych dla betonu komórkowego, w przypadku z cegły nie uchwycono momentu przecinania wykresów między sobą, ale charakter funkcji jest bardzo podobny.

Dla zjawiska termodyfuzji, którego wynik przedstawiono na rys. 5.43 zgodnie z powyższym algorytmem możemy wyznaczyć funkcję zależności wilgotności od odstępów x sondy w próbce.



Ogólne równanie matematyczne:
 $\theta = ax^2 + bx + c$,
 a,b,c - stałe zależne od warunków początkowych

$$\theta(t = 2dni) = \begin{cases} 0,4x^2 - 0,1x + 0,12, & \text{gdy } 0,05 \leq x \leq 0,15 \\ -0,8x^2 + 0,32x + 0,084, & \text{gdy } 0,15 < x \leq 0,25 \end{cases}$$

$$\theta(t = 4dni) = \begin{cases} -0,2x^2 + 0,01x + 0,122, & \text{gdy } 0,05 \leq x \leq 0,15 \\ -2,6x^2 + 0,93x + 0,038, & \text{gdy } 0,15 < x \leq 0,25 \end{cases}$$

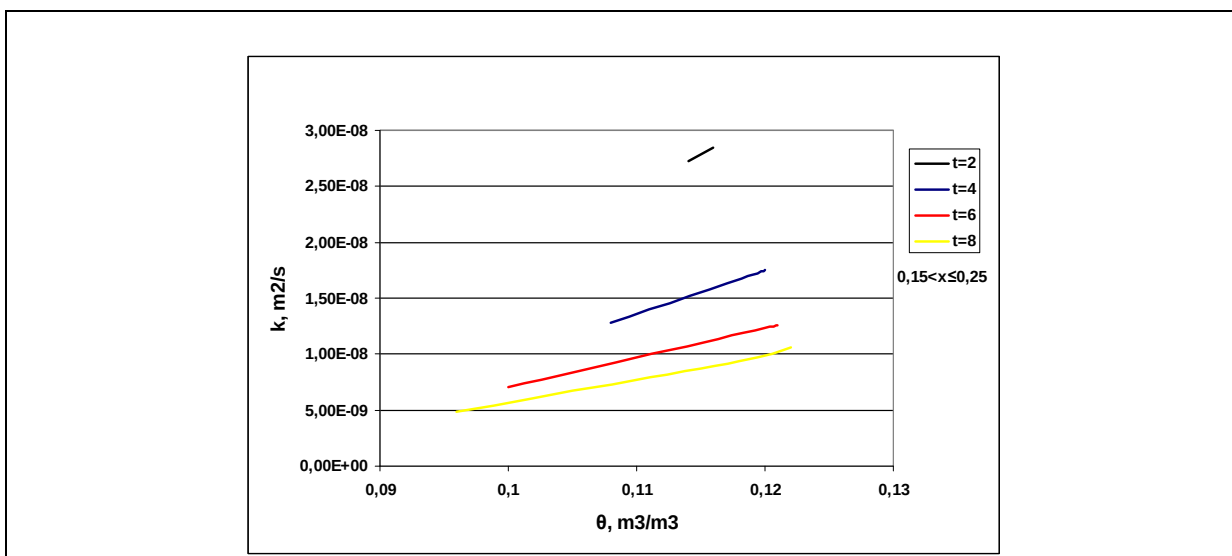
$$\theta(t = 6dni) = \begin{cases} -0,6x^2 + 0,09x + 0,121, & \text{gdy } 0,05 \leq x \leq 0,15 \\ -3,8x^2 + 1,31x + 0,001, & \text{gdy } 0,15 < x \leq 0,25 \end{cases}$$

$$\theta(t = 8dni) = \begin{cases} -0,8x^2 + 0,12x + 0,122, & \text{gdy } 0,05 \leq x \leq 0,15 \\ -3,6x^2 + 1,18x + 0,026, & \text{gdy } 0,15 < x \leq 0,25 \end{cases}$$

Rys. 5.49. Zmiana zawartości wilgoci w betonie komórkowym po grubości próbki z czasem

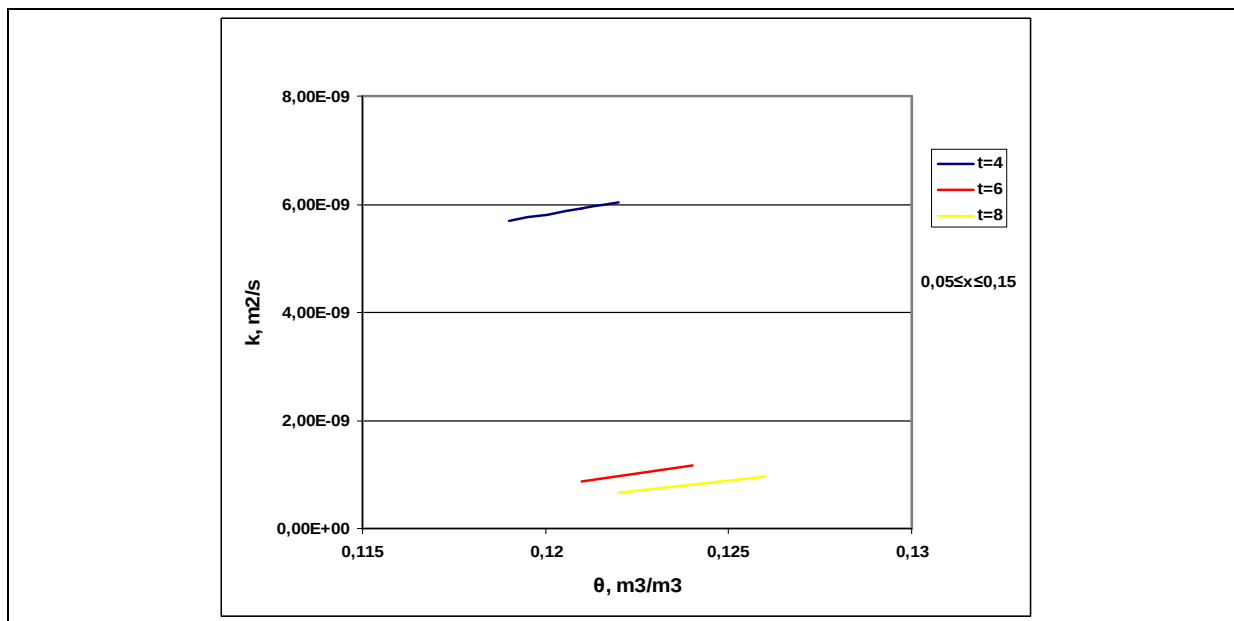
Z rys. 5.49 widać, że w czasie początkowym $t=0$ zawartość wilgoci w próbce ma charakter nierównomierny – opis matematyczny zmian wilgoci w tym czasie nie będzie miał sensu fizycznego. Wyjaśnić to można różnicą w mikrostrukturze próbki. W czasie $t=2$ dni widoczny jest bardzo ciekawy moment – wzrasta zawartość wilgoci w każdym punkcie pomiarowym i z małym błędem można stwierdzić, że osiągnięty został stan równowagi wilgotnościowej na różnej grubości próbki. Wzrost wilgotności można wyjaśnić przemieszczeniem wilgoci od strefy granicznej próbki (strefy okołosiennej) do środka próbki – gdzie wyznaczone były wartości wilgotności (długość sond stanowi 10 cm) – i jej równomierny rozkład. Przedział czasowy $t=2$ dni prawdopodobnie można uznać za czas początku procesów termodyfuzyjnych przemieszczenia wilgoci. Dlatego opis krzywych zaczyna się z tego punktu ($t=2$ dni). Znajdziemy zależności matematyczne $\theta(x)$ dla dwóch części rys. 5.49, tj. charakter funkcji w „zimnej” i „cieplej” stronie bardzo się różni. Punkt $x=0,15$ m będzie rozdzielać te dwie części.

Otrzymane po wykonaniu transformacji Boltzmanna zależności są poniżej:

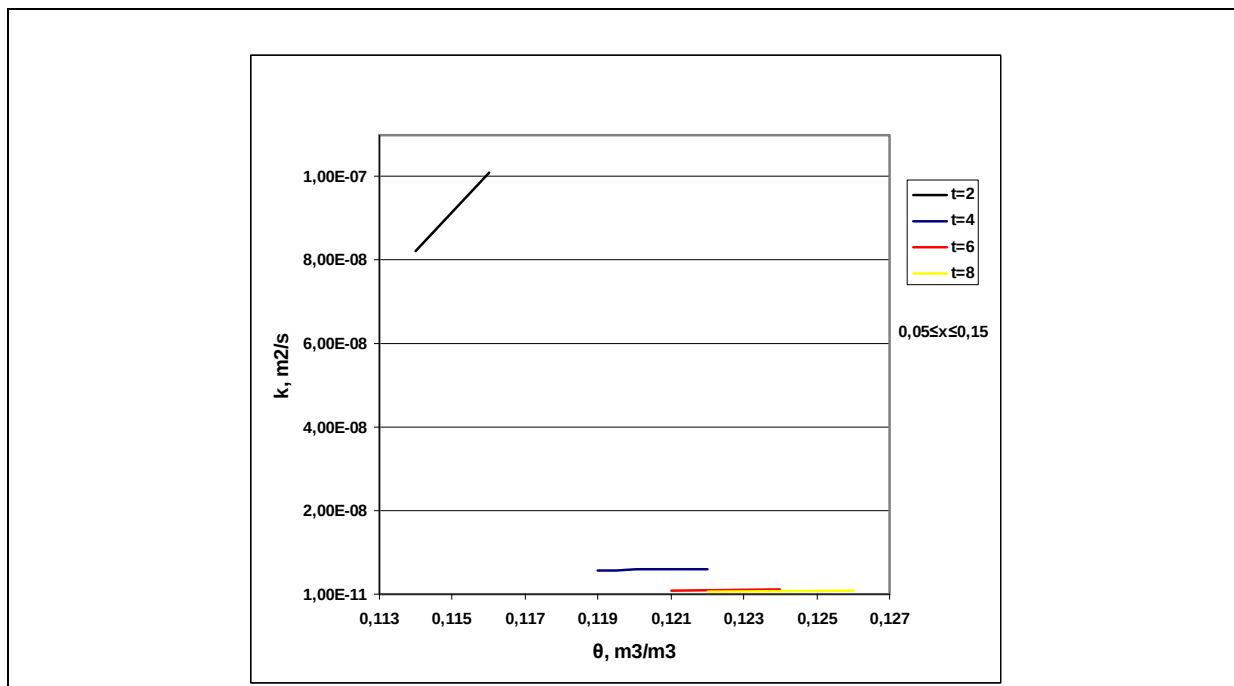


Rys. 5.50. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w betonie komórkowym podczas zjawiska termodyfuzji po „cieplej” stronie próbki

W punkcie $t=8$ dni widoczna jest największa rozbieżność w zawartościach wilgoci, zaś w punkcie $t=2$ najmniejsza. Na odmianę od procesów suszenia, dynamika przepływu wilgoci podczas termodyfuzji nie spada, krzywe są niemal równoległe ze sobą.



Rys. 5.51. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w betonie komórkowym podczas zjawiska termodyfuzji po „zimnej” stronie próbki



Rys. 5.52. Zależność współczynnika dyfuzji wilgoci od zawartości wilgoci w betonie komórkowym podczas zjawiska termodyfuzji po „zimnej” stronie próbki (widok razem z $t=2$)

Dla odmiany, po „zimnej” stronie próbki sytuacja jest nieco odmienna, w porównywaniu do strony „cieplej”. Jeżeli przy $t=4,6,8$ dni krzywe zależności są podobne i równoległe, to wykres dla czasu $t=2$ dni nie spełnia powyższej reguły. Zależność ta wynika z powodu różnicy w funkcji $\theta(x)$ przy $t=2$ dni od większych wartości t . Krzywa ta ma postać paraboli rosnącej, lecz inne paraboli malejącej. Z tej przyczyny wielkości współczynnika dyfuzji wilgoci wykazują wyższe wartości.

Zastosowanie transformacji Boltzmanna dla znalezienia wartości współczynników dyfuzji wilgoci i wyznaczenie zależności tego współczynnika od zawartości wilgoci w materiale jest czynnością pracochłonną aby obliczenia wykonywać „ręcznie”. Otrzymane wielkości współczynnika dla betonu komórkowego w badanym przedziale wilgotnościowym zostały potwierdzone na rys. 5.46. Zależności dla cegły ceramicznej są bardzo podobne do zamieszczonych w bazie materiałowej programu WUFI, opis którego przedstawia rozdz.6 danej pracy.

5.3. Wnioski z badań eksperymentalnych

W ramach przeprowadzonych badań literaturowych oraz eksperymentalnych zaadaptowano technikę pomiarową TDR do wyznaczania wilgotności i temperatur w materiałach i przegrodach budowlanych. Rezultaty uzyskane w drodze pomiarów reflektometrycznych porównywano z danymi uzyskanymi metodą wagową (grawimetryczną). Wykazano, że różnica w pomiarach realizowanych obiema metodami nie przekracza 1 %.

Przedstawiona metoda pomiarowa TDR pozwala na długoterminowy monitoring wilgotności, rezystancji i temperatury zarówno próbek jak i odrębnych elementów budowli (model ściany). Może być stosowana zarówno w przypadku materiałów konstrukcyjnych (ceramiki, betonu komórkowego itd.) jak i materiałów termoizolacyjnych (styropian). Do uzyskania prawidłowych wyników wymagana jest jedynie właściwa kalibracja metody. Dzięki zastosowaniu metody TDR zrealizowano następujące zagadnienia:

- obserwację procesu podciągania kapilarnego i desorpcji wody we wnętrzu przegród budowlanych;
- ocenę szybkości desorpcji wody, skuteczności osuszania budynków (świadczy to o tym, że metodę TDR można wykorzystać do monitoringu desorpcji wilgoci technologicznej jak i efektywności stosowania izolacji przeciwwilgociowych);

- wyznaczono wilgotność poszczególnych materiałów (co może być szczególnie przydatne w trakcie realizacji robót budowlanych);
- obserwowano zmiany rezystancji w przegrodzie (przewodnictwo elektryczne);
- wyznaczono zmiany pola temperatur w warunkach nieizotermicznych (przy zastosowaniu systemu komór klimatycznych symulujących warunki brzegowe);
- wyznaczano wartość strumienia cieplnego materiałów i przegród budowlanych, skąd wyliczano współczynnik przewodzenia ciepła w stanie suchym i ze zmianą wilgotności ośrodka;
- obserwowano proces termodyfuzji przy zastosowaniu zestawu komór klimatycznych;
- wyznaczono zależności współczynnika dyfuzji wilgoci od jej zawartości w wybranych materiałach budowlanych.

Wnioski z badań z zastosowaniem techniki reflektometrycznej są następujące:

- badanie procesu desorpcji w materiałach budowlanych pozwala na przewidywanie czasu, potrzebnego do usunięcia wilgoci;
- analiza zmian wilgotności w czasie podczas desorpcji wody w betonie komórkowym wykazała potęgowy charakter tych zmian;
- proces desorpcji wody w cegle ceramicznej pełnej ma postać liniową i różni się od procesu desorpcji w betonie komórkowym równomiernością zmian na grubości materiału;
- styropian nie przepuszcza pary wodnej. Stosowanie tego materiału w przegrodzie budowlanej stanowi przeszkodę dla procesu desorpcji. Woda w ścianie zaizolowanej styropianem nie może odparowywać do powietrza zewnętrznego, co jest przyczyną pojawiania się obszaru stałej wilgotności wewnątrz konstrukcji, który będzie posiadał współczynnik przewodzenia ciepła znacznie większy od stanu normalnego;
- badania konduktywności betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej potwierdzają otrzymane wyżej zależności zmiany wilgotności z czasem - opór wzrasta i dla betonu przyjmuje o wiele mniejsze wartości (dziesięciokrotnie) niż dla cegły. Świadczy to o tym, że w betonie komórkowym stężenie przewodność elektryczna jest większa i wolniej trwa proces desorpcji wody na zewnątrz;
- obserwacja procesu podciągania kapilarnego pokazała istotny wpływ pozycji punktu pomiaru od miejsca nasiąkania wodą na czas zwilżania, który dla betonu

komórkowego wzrasta dziesięciokrotnie. Wykazaną zależność należy brać pod uwagę podczas modelowania stanu zawilgocenia konstrukcji fundamentowej albo pierwszej kondygnacji;

- badania podciągania kapilarnego w styropianie wykazały zupełną nienasiąkliwość tego materiału. Wyniki uzyskane za pomocą metody TDR, przeliczone na wilgotność objętościową według empirycznych wzorów kalibracyjnych wykazują wysoką dokładność wzoru Malickiego w pomiarach wilgotnościowych. Otrzymaną eksperymentalnie wilgotność (około 1%) potwierdzają dane od producentów płyt styropianu [180];
- obserwując zjawisko podciągania kapilarnego w cegle ceramicznej pełnej zauważono znaczną dynamikę podciągania kapilarnego na początku eksperymentu do stanu „nasylenia” (w pierwszej dobie wilgotność zwiększyła się do 20 %, zaś w ciągu następnych 20 dni – tylko o 2 %), który w betonie komórkowym miał miejsce po 6-8 dniach. Świadczy to o znacznych różnicach w strukturze obu materiałów;
- badanie konduktywności betonu komórkowego i cegły ceramicznej pełnej podczas nasiąkania nimi wody przez pory (kapilary) potwierdzają otrzymane wyżej zależności zmiany wilgotności z czasem. Również z wykresu dobrze widać różnicę pomiędzy punktem pomiaru – odstęp od przekroju zwilżania znacznie wpływa na charakter krzywych;
- wykresy zależności zawartości wody od rezystancji materiałów przy procesach podciągania kapilarnego pokazują zależność potęgową zarówno dla cegły ceramicznej pełnej jak i dla betonu komórkowego, w przeciwieństwie do desorpcji wody;
- badania zmiany temperatur wewnątrz zbudowanej przegrody modelowej w zależności od zadanych w komorach klimatycznych warunków brzegowych wykazały trafność zastosowania metody TDR dla badań właściwości cieplnych materiałów budowlanych;
- obserwacja zjawiska termodyfuzji przy zastosowaniu zestawu komór klimatycznych oraz techniki TDR wykazała, że woda w ośrodku o wyższej temperaturze wykazuje większą ruchliwość i płynie w kierunku o mniejszej wartości temperatury;
- wyznaczenie wartości strumienia ciepła, a wraz z nim współczynnika przewodzenia ciepła przy pomocy zestawu komór klimatycznych i sond TDR wykazały dużą dokładność otrzymanych wielkości w porównywaniu z danymi producentów materiałów budowlanych;

- obliczenia współczynnika dyfuzji wilgoci za pomocy transformacji Boltzmanna potwierdziło skuteczność danego modelu, przy czym „ręczne”, (tj. bez zastosowania metod komputerowych) obliczanie okazało się bardzo pracochłonne;
- metoda TDR pozwoliła z dużą dokładnością wykonywać pomiary wilgotności, temperatury i rezystancji w środku materiałów budowlanych.

Wszystkie rozpatrzone zjawiska zostały opisane matematycznie, z czego można wysnuć następujące wnioski:

- proces desorpcji wody w betonie komórkowym ma w całym swoim zakresie charakter funkcji potęgowej:

$$\theta(h) = \theta_0 + a(t - t_0)^b, T = const$$

gdzie a, b - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji.

- proces podciągania kapilarnego w betonie komórkowym jest skomplikowany, i nie da się go opisać za pomocą jednego równania. Otrzymana krzywa procesu podciągania jest rozdzielona na trzy albo nawet na cztery obszary, opisane odrębnymi matematycznymi formułami. Na początku procesu równanie przyjmuje postać: $\theta(h) = \theta_0$ do pewnego czasu t , kiedy woda zaczyna być podciągana do badanego punktu ośrodka. Następnie przebieg opisuje funkcja potęgowa:

$$\theta(h) = a + b(t - c)^p, T = const$$

gdzie a, b, c, p - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji, lub ma przebieg prostoliniowy wyrażający wzrost wilgotności przy stałym czasie $t(\theta_0, h) = t_{pocz}$. Później funkcja wraca do jej poprzedniej postaci - $\theta(h) = a + b(t - c)^p$.

- badanie procesu podciągania kapilarnego w styropianie przedstawione w pracy należy traktować jako weryfikację użyteczności metody TDR przy przyjętym równaniu kalibracyjnym, (wzorami Topp'a i Malickiego). Empiryczna formuła Topp'a okazuje się na potrzeby naszych rozważań niewystarczająca, bowiem po wykonaniu obliczeń uzyskujemy ujemne wartości wilgotności. Z kolei formuła Malickiego charakteryzuje się większą dokładnością, wynikiem których jest określenie początkowej wilgotności styropianu 1,4 %. Ogólne równanie matematyczne procesu można przedstawić następująco: $\theta = \theta_0, T = const$.

- proces desorpcji wody w cegle ceramicznej pełnej wykazał liniowy przebieg procesu osuszania:

$$\theta(h) = a - bt, T = const$$

- proces podciągania kapilarnego w cegle ceramicznej pełnej, podobnie jak w przypadku betonu komórkowego, jest trudny do opisanie z matematycznego punktu widzenia.

Przebieg procesu został podzielony na dwa odrębne obszary, które przedstawiono następującymi ogólnymi formułami:

$$\theta = \begin{cases} \theta_0, & t = 0 \\ \theta_1 + (at)^{\frac{1}{b}}, & t > 0 \end{cases}, T = const$$

Określone zostały zależności pomiędzy oporem elektrycznym, a wilgotnością ośrodka porowatego i opisane w następujący sposób:

- podczas desorpcji wody w betonie komórkowym, podciągania kapilarnego w betonie komórkowym, podciągania kapilarnego w cegle ceramicznej pełnej:

$$R(h) = \frac{b}{a^\theta}, T = const$$

- podczas desorpcji wody w cegle ceramicznej pełnej:

$$R(h) = a - b\theta, T = const$$

Jedynie podczas desorpcji wody w cegle ceramicznej pełnej zależność oporu elektrycznego od wilgotności jest liniowa. W pozostałych przypadkach ma ona postać funkcji potęgowej. Za pomocą otrzymanych równań można wyznaczyć wielkość oporu elektrycznego przy różnych wartości wilgotności próbki, nawet przy niemożliwych w praktyce, teoretycznych wielkościach 0 i 100 % wilgotności.

Dane uzyskane przy zastosowaniu systemu komór klimatycznych zostały przedstawione w postaci wykresów, pokazujących zmianę temperatury wewnątrz przegrody w czasie:

$$T(b) = T_0 + a(t - t_0)^c, \theta = const$$

a, c - stałe zależne od właściwości sondy, aparatu i badanego materiału i wyznaczane są w procesie kalibracji, b – wymiary miejsca zainstalowania czujnika.

Zmiana zawartości wilgoci wraz z grubością próbki zarówno w betonie komórkowym, jak i w cegle opisana została równaniem kwadratowym typu:

$$\theta = ax^2 + bx + c.$$

Skuteczność zastosowanej metody TDR, otrzymanych przez nią wielkości wilgotnościowych i cieplnych materiałów budowlanych potwierdzona została przy pomocy wybranego programu komputerowego dla symulacji sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych w przegrodach budowlanych w następnym rozdziale pracy.

6. MODELOWANIE KOMPUTEROWE ZJAWISK PRZENOSZENIA ENERGII I MASY ZA POMOCY PROGRAMU WUFI

Ze względu na łatwość obsługi, możliwość przedstawiania wyników obliczeń w formie graficznej, wielką bazę danych materiałowych oraz kompletny model eksperymentalny dla weryfikacji danych doświadczalnych, wybrany został niemiecki program WUFI, opracowany w Instytucie Fizyki Budowli Fraunhofera w Holzkirchen. Nazwa WUFI pochodzi od niemieckiego pojęcia niestacjonarnego transportu ciepła i wilgoci (Wärme- und Feuchtetransport Instationär). W Katedrze Fizyki Budowli Politechniki Łódzkiej, we współpracy z Instytutem Fraunhofera Fizyki Budowli w Holzkirchen, w ramach projektu KBN opracowano polską wersję programu, która została nazwana WUFI-POL. Program WUFI-POL został praktycznie sprawdzony i przetestowany w trakcie zajęć dydaktycznych z Fizyki Budowli, prowadzonych na Politechnice Łódzkiej. W pełni potwierdziły one jego zalety: łatwość wprowadzania warunków początkowych, przyjazny użytkownikowi interfejs, wygodna obsługa oraz otrzymanie wyników w postaci graficznej i tabelarycznej [94]. Zgodnie z polityką niemieckich autorów i właścicieli licencji, wersja demonstracyjna programu jest rozpowszechniana bezpłatnie przez Internet.

Model obliczeniowy przepływu ciepła i wilgoci przez przegrody zewnętrzne wykorzystuje metodykę opracowaną przez Künzla, która bazuje się na następujących równaniach różniczkowych, opisujących niestacjonarny, jednowymiarowy, sprzężony przepływ ciepła i wilgoci:

- transport ciepła:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (6.1)$$

- transport wilgoci:

$$\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (6.2)$$

gdzie D_w – współczynnik przewodzenia kapilarnego, H – entalpia wilgotnego materiału, h_v – ciepło parowania, p – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, θ – zawartość wilgoci, δ – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, T – temperatura, λ – współczynnik przewodzenia ciepła wilgotnego materiału, μ – współczynnik oporu dyfuzyjnego suchego materiału, ρ_w – gęstość wody, φ – wilgotność względna.

Równania różniczkowe są rozwiązywane za pomocą metody bilansów elementarnych, z zastosowaniem niejawnego schematu różnicowego, w którym nie ma ograniczenia kroku czasowego.

Program mieści bogatą bazę materiałową, gdzie każdy materiał budowlany opisany jest grupą parametrów podstawowych, niezbędnych do prowadzenia obliczeń – gęstością pozorną, porowatością, pojemnością cieplną, przewodnością cieplną i oporem dyfuzyjnym. Przy uwzględnieniu kapilarnie aktywnych, higroskopijnych materiałów, w opisie spotykamy izotermy sorpcji oraz zależne od wilgotności współczynniki transportu kapilarnego. Z uwagi na znacznie szybsze nasączenie wilgocią materiału przy bezpośrednim kontakcie z wodą niż późniejsza jego kapilarna przewodność, rozróżniono wartości współczynnika transportu dla „nasączania” (lub podciągania kapilarnego) i „wysychania” (lub dalszej redystrybucji). Izotermę sorpcji wyznaczano drogą eksperymentalną, więc jest to technicznie skomplikowane, dlatego w programie istnieje możliwość oszacowania tej wielkości numerycznie, zakładając, że warstwa materiału nie dotyka bezpośrednio do innej aktywnej kapilarnie warstwy

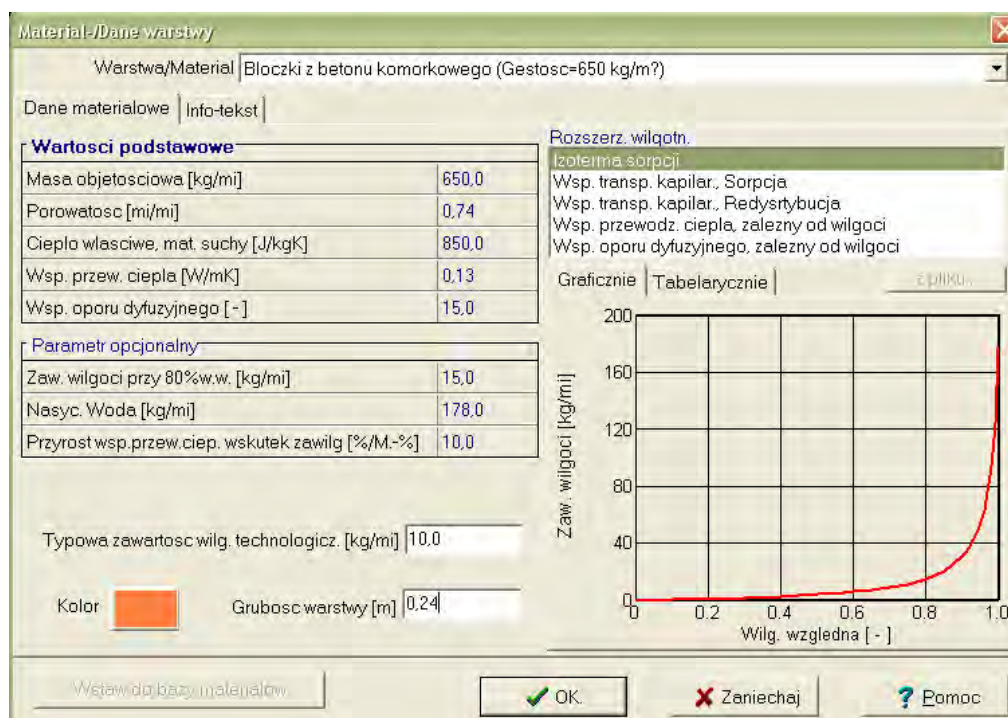
$$\theta = \theta_f \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b - \varphi}, \text{ kg/m}^3 \quad (6.3)$$

gdzie θ – zawartość wody przy wilgotności względnej φ , θ_f – zawartość wody przy swobodnym nasyceniu, b – współczynnik dopasowujący. Wzór ten stosuje się z wykorzystaniem wilgotności odniesienia θ_{80} (sorpcja dla wilgotności względnej 80 %) i wilgotności w stanie swobodnego nasycenia θ_f .

Analogicznie można wyznaczyć współczynniki transportu kapilarnego na podstawie współczynnika wchłaniania wilgoci:

$$D_{ws}(\theta) = 3,8 \cdot \left(\frac{A}{\theta_f} \right)^2 \cdot 1000^{\frac{\theta}{\theta_f} - 1}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.4)$$

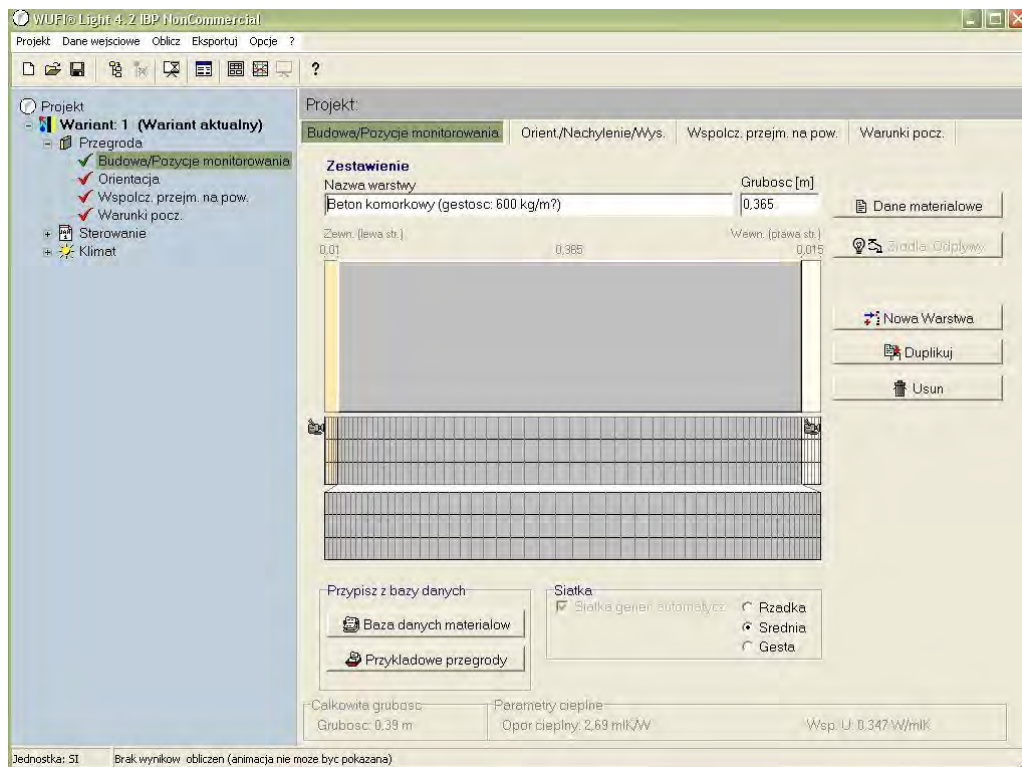
gdzie D_{ws} – współczynnik transportu podciągania kapilarnego, A – współczynnik absorpcji wody. W ten sposób w oparciu o wcześniej zdefiniowaną sorpcję w programie WUFI-POL generowana jest tablica współczynników transportu kapilarnego.



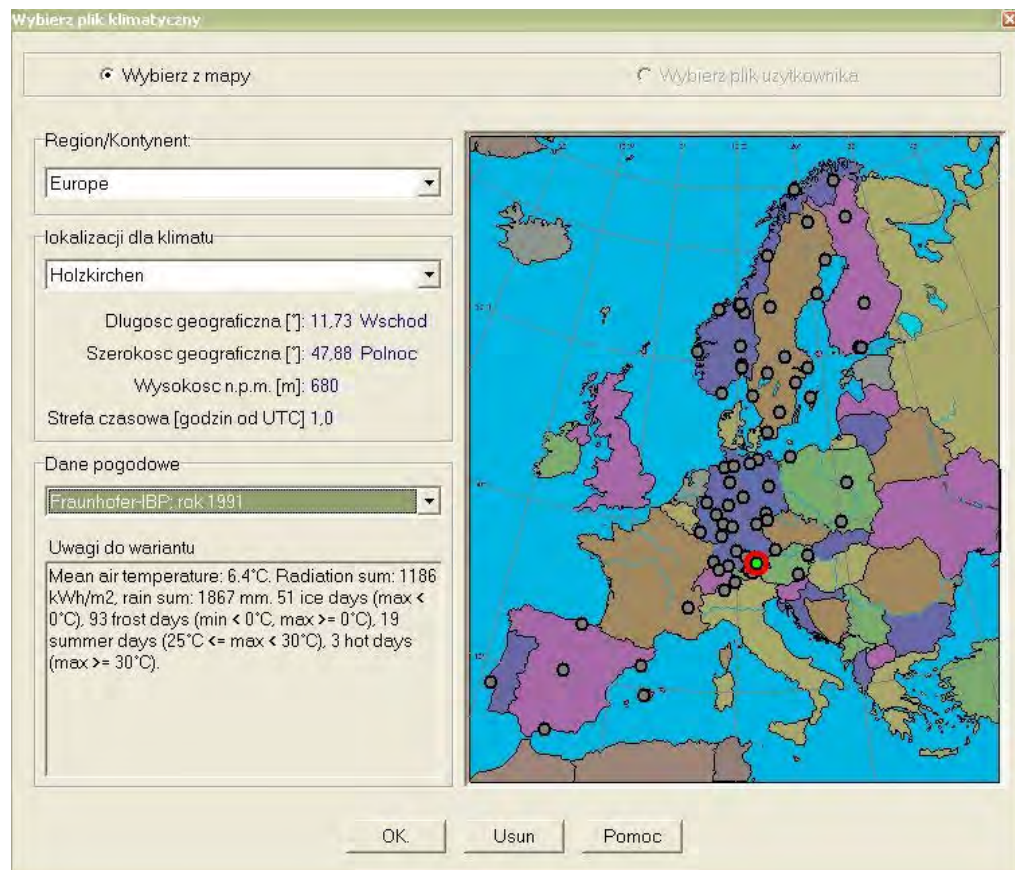
Rys. 6.1. Dane materiałowe w programie WUFI-POL

Dane przegrody, dla której wykonane są obliczenia cieplno-wilgotnościowe, definiuje się korzystając z bazy danych materiałowych (rys. 6.1), lub przez bezpośredni wybór z bazy danych przegród typowych (rys. 6.2).

Klimat zewnętrzny definiowany jest poprzez wybór miejscowości, w której zlokalizowany jest analizowany obiekt (rys. 6.3). Na zewnętrzną powierzchnię przegrody oddziałują temperatura i wilgotność powietrza, a także promieniowanie i ilość wilgoci z deszczu, które zależą od orientacji i nachylenia przegrody. W obliczeniach stosowane warunki pogodowe uśrednione w ciągu jednej godziny. Tak przygotowane dane pogodowe opracowane przez Niemiecki Instytut Meteorologiczny, które łączą dwanaście regionów Niemiec i dane Typowego Roku Meteorologicznego opracowane dla Warszawy, Krakowa i Kołobrzegu. Opracowano dwa rodzaje danych pogodowych, które reprezentują najzimniejszy i najcieplejszy rok w okresie ostatnich dziesięciu lat [94].

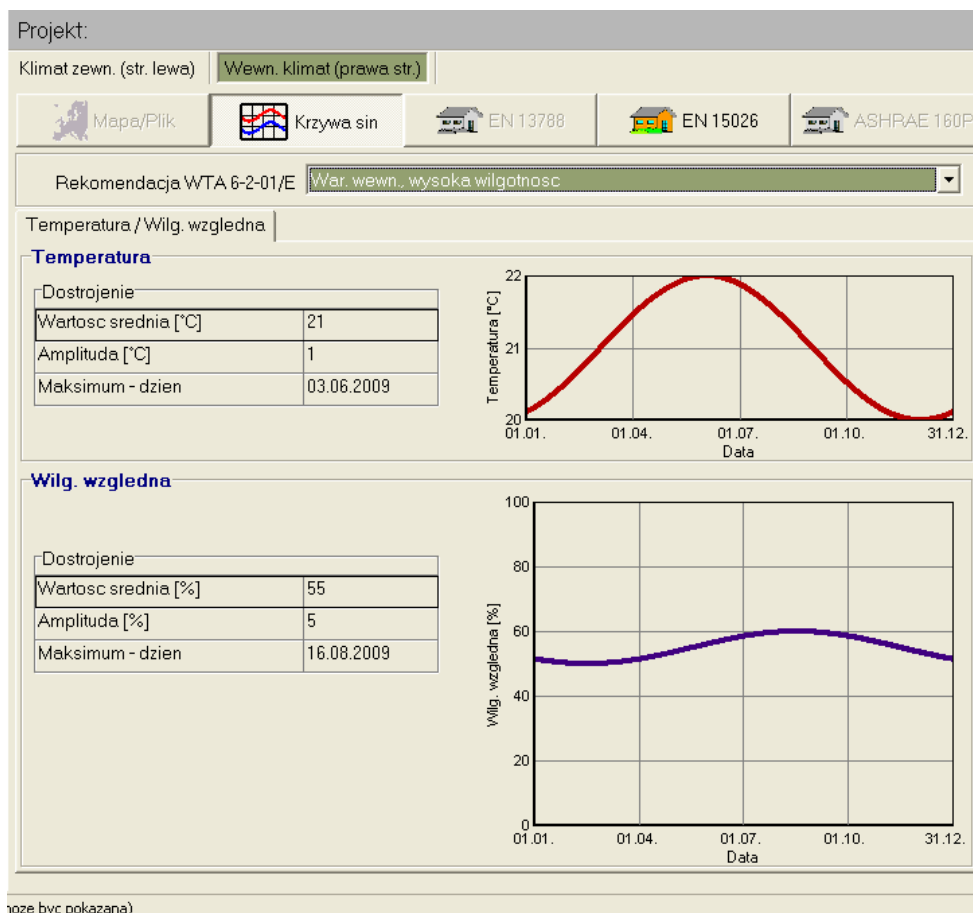


Rys. 6.2. Wybrana przegroda z bazy danych w programie WUFI-POL



Rys. 6.3. Wybór danych pogodowych w programie WUFI-POL

Program WUFI-POL przyjmuje temperaturę powietrza wewnętrznego jako sinusoidalnie zmienną o okresie jednego roku (rys. 6.4). Domyślnie średnia wartość temperatury powietrza wewnętrznego wynosi 21°C , a wartość amplitudy 1 K oraz średnia wartość wilgotności względnej 50 % i wartość amplitudy 10 %. Parametry te odpowiadają pomieszczeniom mieszkalnym o średnich wartościach wilgoci.



Rys. 6.4. Okno dialogowe do zadawania warunków klimatu wewnętrznego w programie WUFI-POL

Klimat zewnętrzny za wyjątkiem gruntu oraz mikroklimat pomieszczeń oddziałują na powierzchnie przegrody. Warunki brzegowe charakteryzowane są przez tzw. współczynniki przejmowania (rys. 6.5). Na powierzchni zewnętrznej opór cieplny opisuje zjawisko konwekcyjnej i radiacyjnej wymiany ciepła przez zewnętrzną stronę z otoczeniem, wartość S_d uwzględnia charakter materiałów wykończeniowych, absorpcja promieniowania krótkofalowego charakteryzuje absorpcje promieniowania słonecznego, lecz długofalowego – emisję promieniowania podczerwonego, współczynnik absorpcji deszczu opisuje ilość wody deszczowej, która pozostaje na powierzchni przegrody i podlega podciąganiu kapilarnemu (program domyślnie ma ustawiony ten parametr na wartość 0,7). Na powierzchni wewnętrznej opór cieplny opisuje zjawisko konwekcyjnej radiacyjnej wymiany ciepła

między powierzchnią wewnętrzną a pomieszczeniem, wartość S_d uwzględnia występowanie materiałów wykończeniowych.

Rys. 6.5. Okno dialogowe do zadawania warunków brzegowych w programie WUFI-POL

W programie WUFI-POL użytkownik określa również warunki początkowe rozkładu temperatury i wilgoci w przegrodzie budowlanej. Można przyjąć stały poziom wilgoci, zadać zawartość wilgoci w każdej warstwie lub wczytać profil pola koncentracji wilgoci, przyjąć stałą temperaturę lub wczytać profil pola temperatur.

Symulacja komputerowa niestacjonarnych procesów przepływu ciepła i wilgoci w programie WUFI-POL [94] daje możliwość analizy następujących zagadnień:

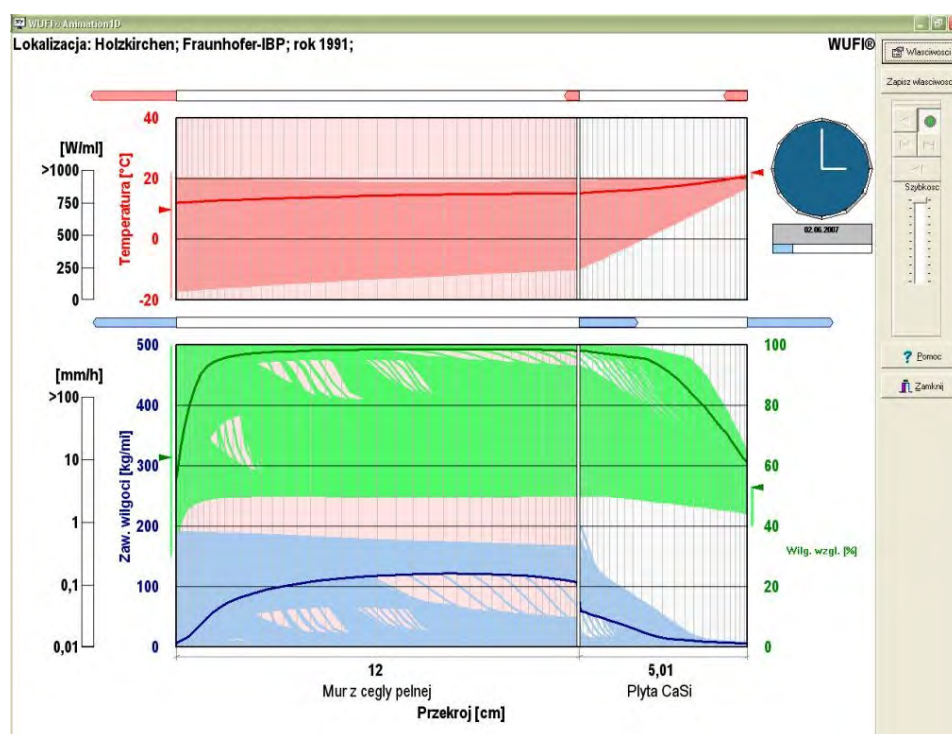
- zmienne w czasie zawilgocenie i wysychanie przegród z uwzględnieniem dyfuzji i przewodzenia kapilarnego,
- wysychanie przegród z wilgoci budowlanej (początkowej),
- kondensacja pary w okresie letnim wskutek odwróconej dyfuzji,
- wpływ promieniowania słonecznego, zacinającego deszczu, kondensacji powierzchniowej przegród,

- wpływ zawilgocenia na przepływ ciepła.

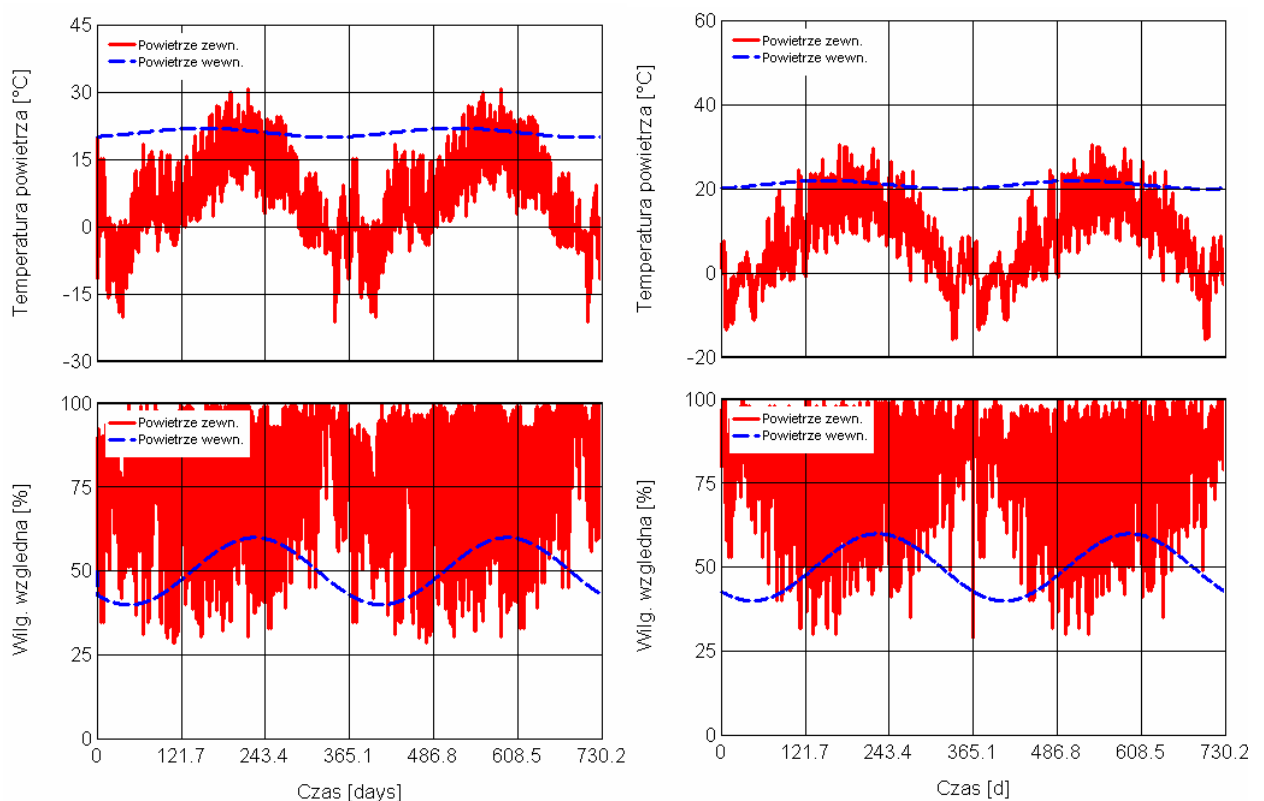
Wyniki obliczeń mogą zostać wykorzystane do:

- weryfikacji badań doświadczalnych,
- analizy zachowania się przegrody w różnych strefach klimatycznych,
- projektowania nowych oraz przebudowy i renowacji starych budynków,
- opracowania i optymalizacji nowych materiałów budowlanych,
- określenia normowych warunków mikroklimatu wewnątrz.

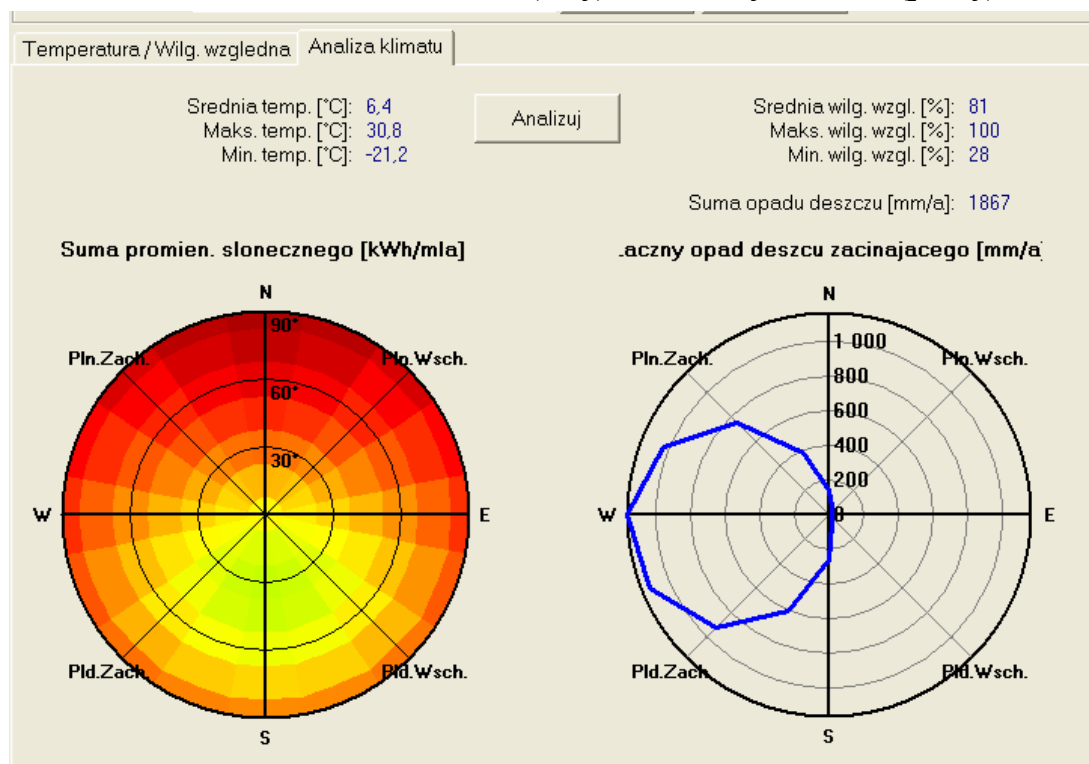
Analizie poddana została przegroda wykonana z cegły ceramicznej pełnej (12 cm) i silikatu wapiennego (5 cm), izolującego przegrodę od strony wewnętrznej. Ściana ta była położona na elewacji zachodniej i południowej i podczas obliczeń uwzględniono wpływ „zacinającego deszczu”. Analizowano okres 2-letni, podczas którego przyjęto 2-krotnie powtórzone dane pogodowe dla Holzkirchen i Warszawy z 1.01.2007 po 1.01.2009. Dane pogodowe dla wybranych regionów przedstawiono na rys. 6.7–6.10.



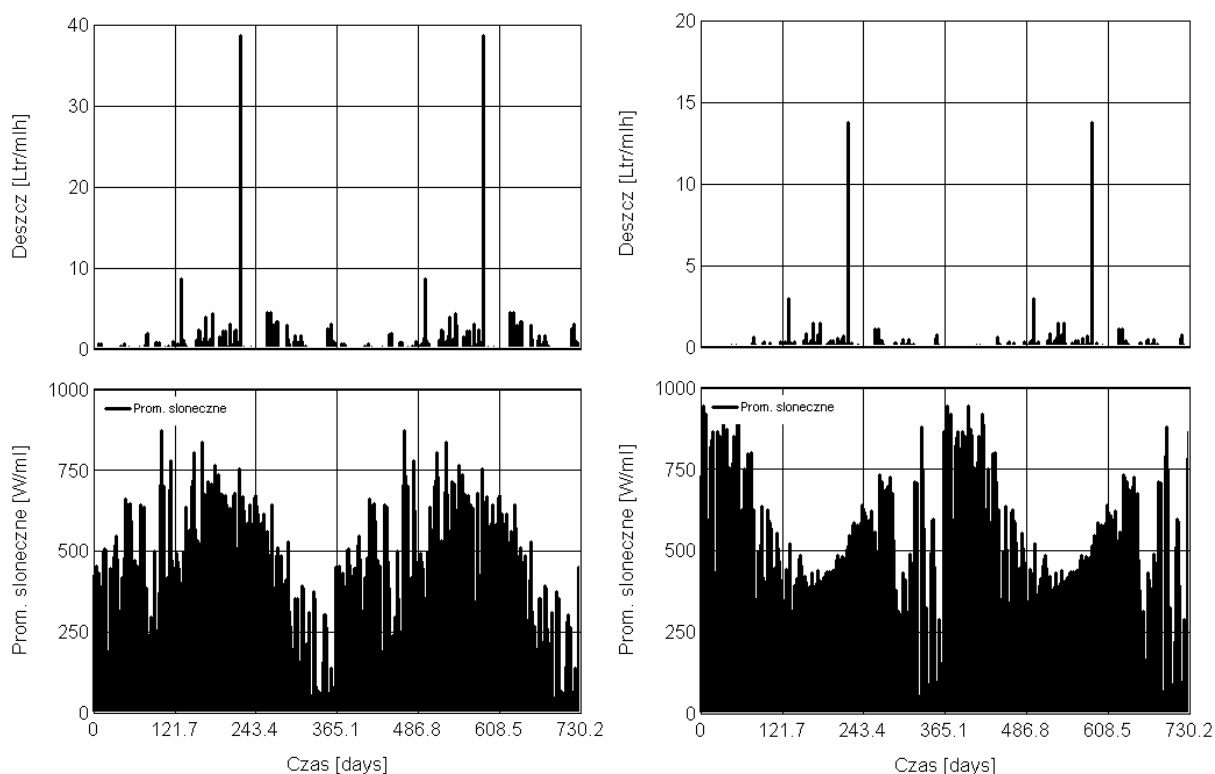
Rys. 6.6. Animacja wykonywania obliczeń w programie WUFI-POL



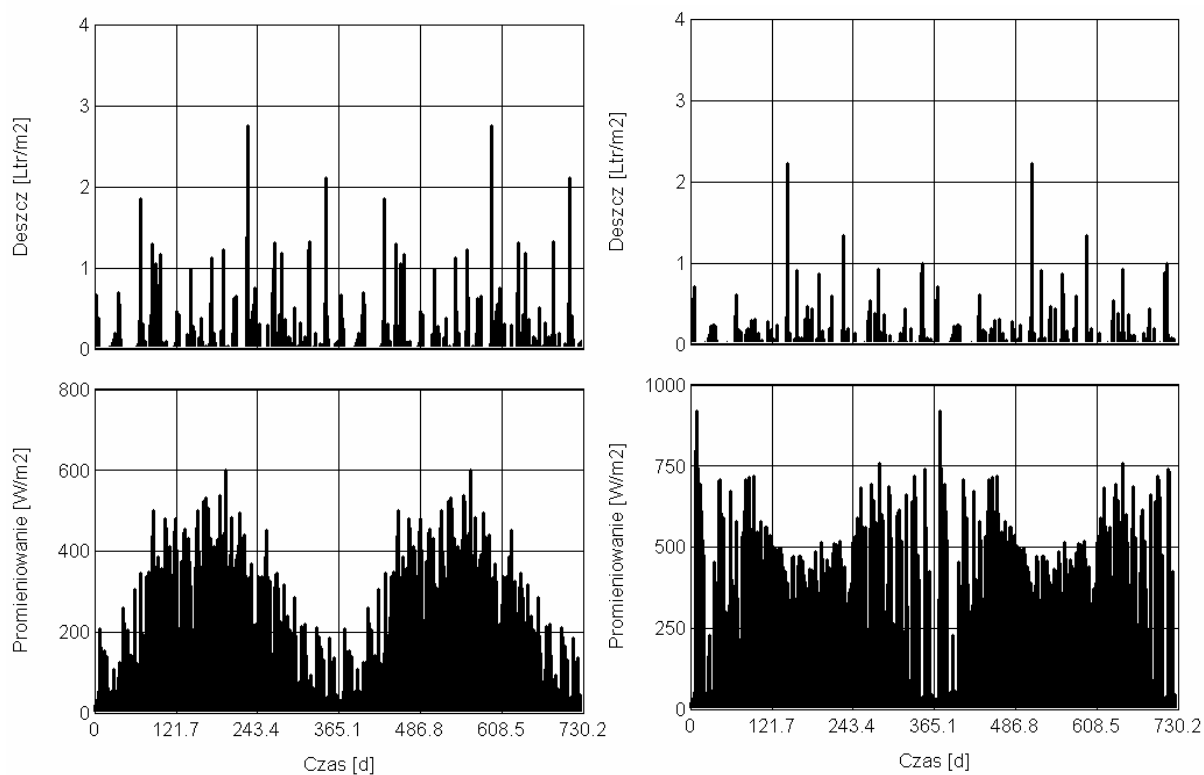
Rys. 6.7. Temperatura i wilgotność względna powietrza w trakcie realizacji obliczeń dla klimatu Holzkirchen w Niemczach (lewy) i Warszawy w Polsce (prawy)



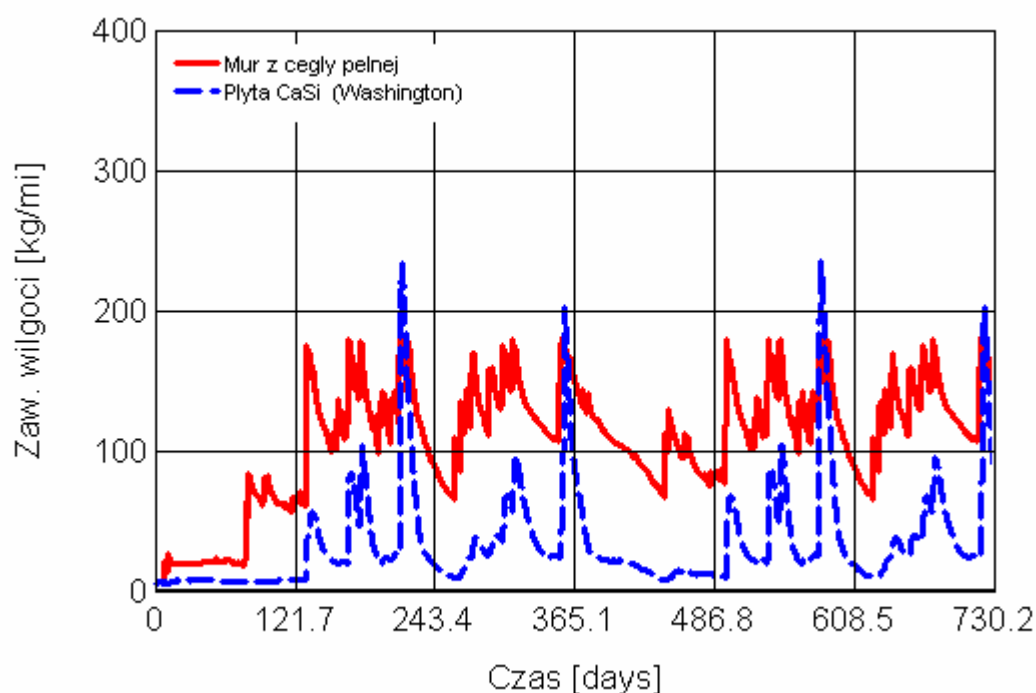
Rys. 6.8. Przykładowa analiza klimatu dla Holzkirchen w Niemczach



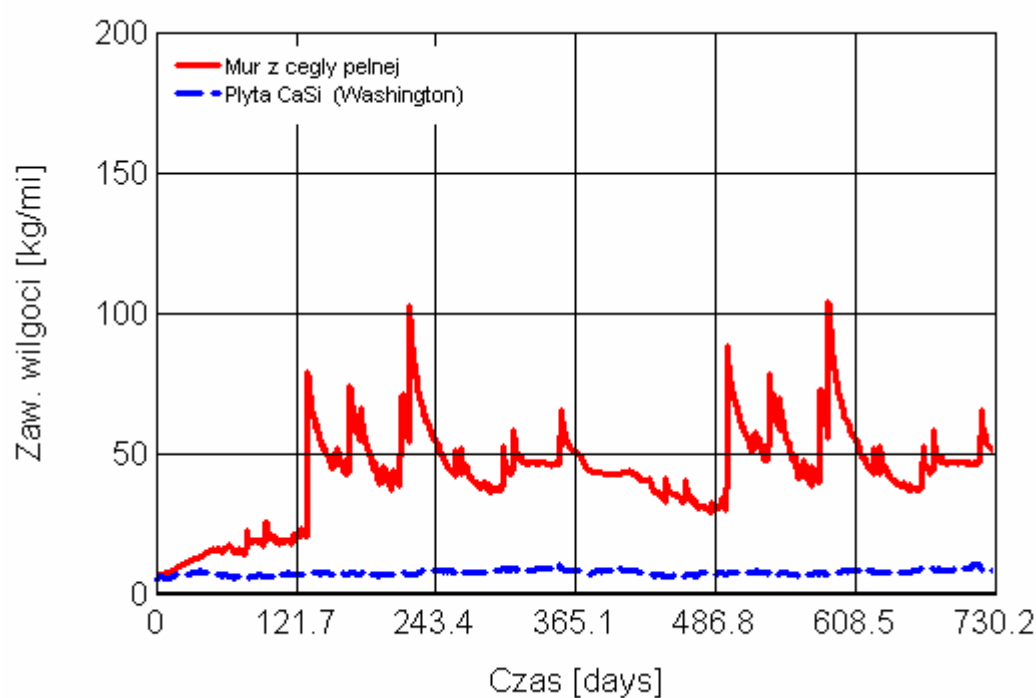
Rys. 6.9. Opady deszczu i promieniowanie słoneczne dla klimatu Holzkirchen w Niemczech (lewy – orientacja zachodnia, prawy – orientacja południowa)



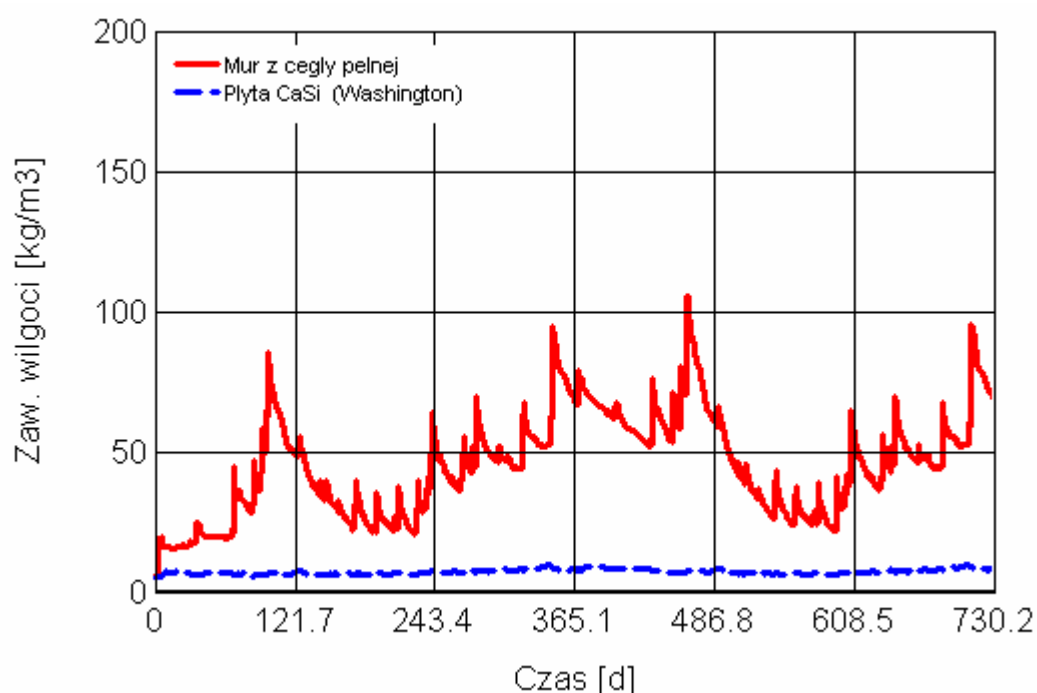
Rys. 6.10. Opady deszczu i promieniowanie słoneczne dla klimatu Warszawy w Polsce (lewy – orientacja zachodnia, prawy – orientacja południowa)



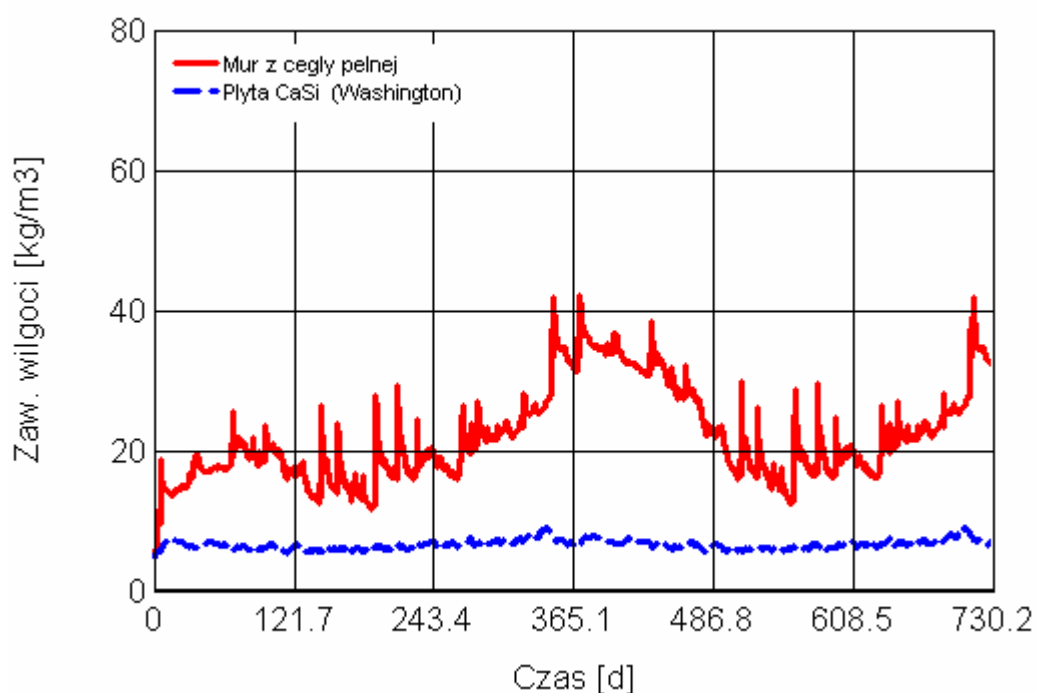
Rys. 6.11. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w poszczególnych warstwach (zachodnia orientacja) dla klimatu Holzkirchen



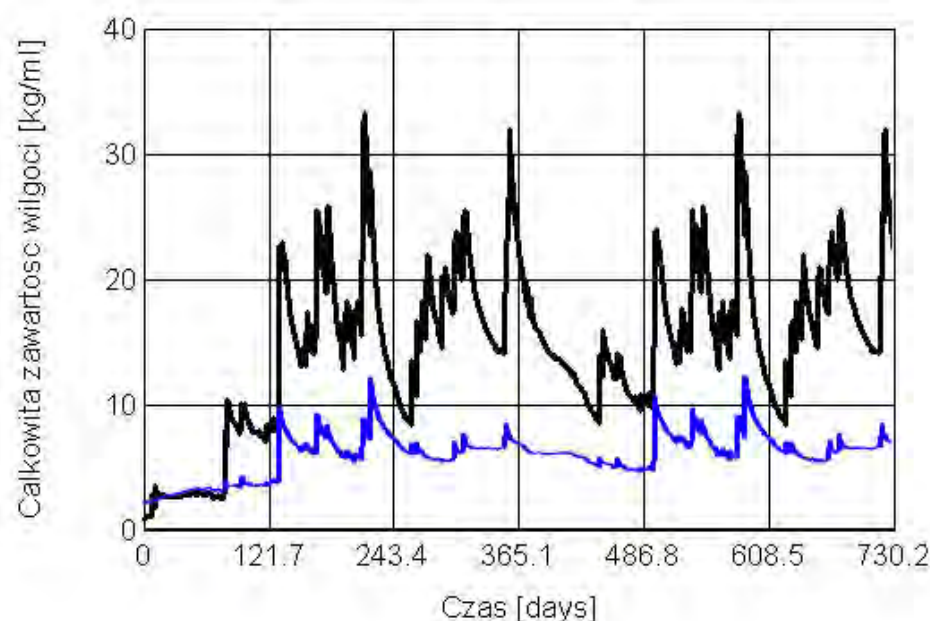
Rys. 6.12. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w poszczególnych warstwach (orientacja południowa) dla klimatu Holzkirchen



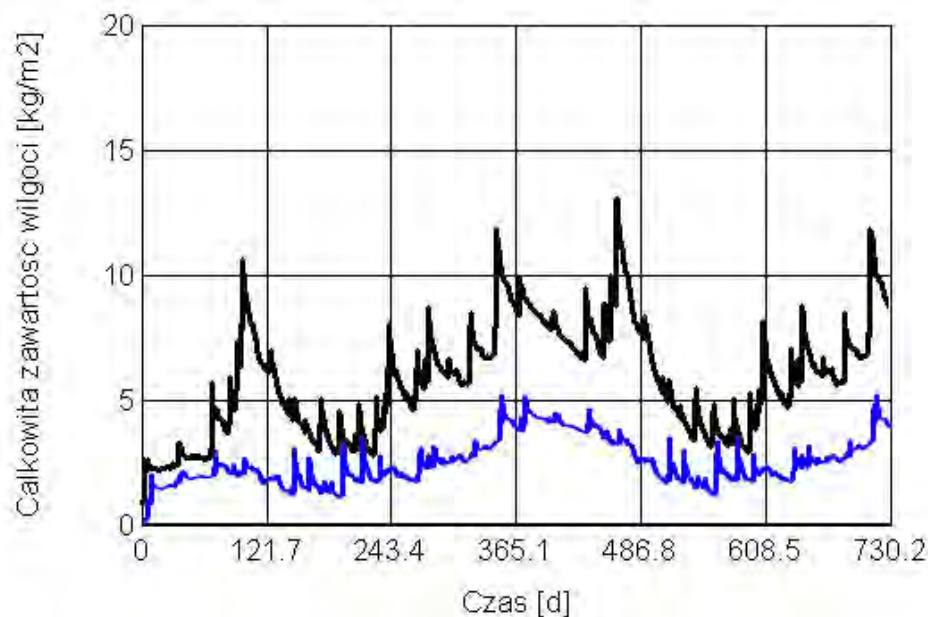
Rys. 6.13. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w poszczególnych warstwach (zachodnia orientacja) dla klimatu Warszawy



Rys. 6.14. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w poszczególnych warstwach (orientacja południowa) dla klimatu Warszawy



Rys. 6.15. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w przegrodzie (czarny - zachodnia orientacja, granatowy – orientacja południowa) – klimat Holzkirchen

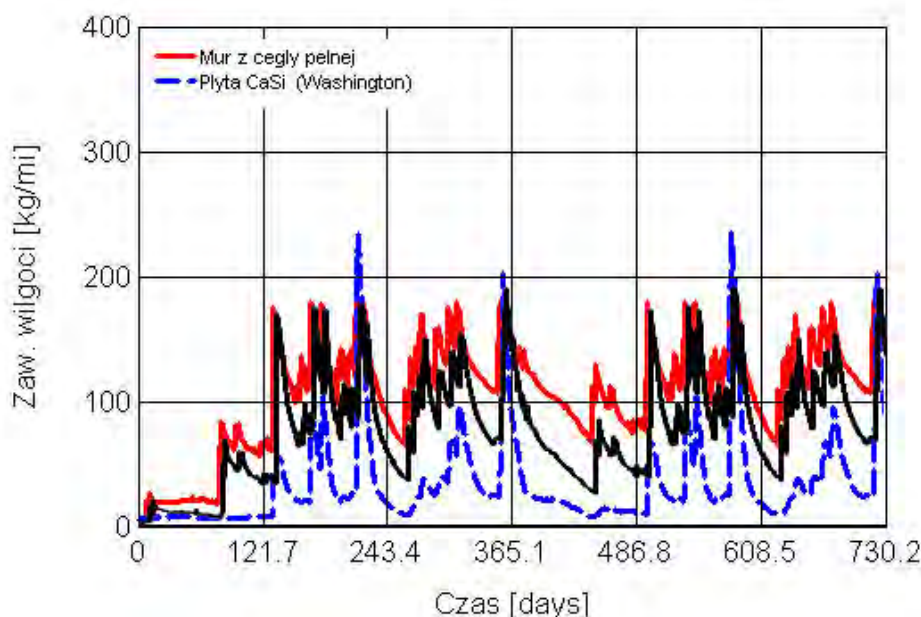


Rys. 6.16. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w przegrodzie (czarny - zachodnia orientacja, granatowy – orientacja południowa) – klimat Warszawy

Otrzymane w wyniku obliczeń zmiany zawartości wilgoci w przegrodzie oraz jej warstwach przedstawiono na rys. 6.11-6.16. Analizy wskazują, że dobór danych pogodowych ma wielki wpływ na wyniki symulacji procesów ciepłno-wilgotnościowych w przegrodach budowlanych (znaczną różnicą w otrzymanych wynikach dla Holzkirchen i Warszawy). Jak widać, brak tynku zewnętrznego i wybrana zachodnia orientacja powodują, że zewnętrzna warstwa cegły jest silnie zawilgocona od opadów atmosferycznych i jej zawilgocenie tylko w

małym stopniu zmniejsza się podczas eksploatacji budynku, podlegając wzrostowi podczas opadów deszczu i wpływu wiatru zachodniego. Wybór elewacji południowej w modelowaniu zmniejsza zawartość wilgoci w ścianie za rachunek zwiększonego promieniowania słonecznego tej strony. Nieruchomy stan zawartości wilgoci w warstwie silikatu wapiennego jest przesłanką aby stosować ten materiał w wybranej konstrukcji. Zakładano, że silikat będzie podciągał wilgoć z narażonej na działania klimatu zewnętrznego cegły ceramicznej. W związku z tym, zdecydowano przebadac w programie WUFI-POL ściankę tylko z cegły ceramicznej dla orientacji zachodniej i klimatu Holzkirchen (najmniej korzystne z punktu widzenia opadów atmosferycznych).

Jak widać z rys. 6.17-6.19 stosowanie w konstrukcji ściany ze strony wewnętrznej warstwy silikatu wapiennego nie tylko nie ulepsza sytuacji wilgotnościowej w ścianie, ale nawet ją pogarsza. W ciągu 2 lata badań okresu symulacji, w przegrodzie z cegły i silikatu całkowita zawartość wilgoci stanowiła $22,17 \text{ kg/m}^3$, a w ścianie tylko z cegły ceramicznej – $15,1 \text{ kg/m}^3$, co jest w 1,5 razy mniej. Wynikiem tego modelowania jest spostrzeżenie, że izolacja wewnętrzna stanowi barierę do wysychania ściany ze strony wnętrza.



Rys. 6.17. Zmiany całkowitej zawartości wilgoci w poszczególnych warstwach (linia czarna – ściana tylko z cegły)

Zaw. wilgoci [kg/m³]				
Warstwa/Material	Start	Koniec	Min.	Max.
Mur z cegly pelnej	4,84	148,98	4,78	183,85
Plyta CaSi (Washington)	4,82	85,82	4,72	235,07
Calkowita zawartosc wilgoci [kg/m³]	0,82	22,17	0,81	33,3

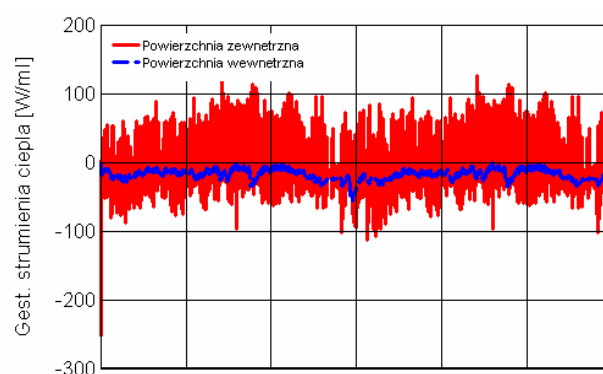
Rys. 6.18. Zmiany zawartości wilgoci w przegrodzie wykonanej z cegły i silikatu

Zaw. wilgoci [kg/m]				
Warstwa/Material	Start	Koniec	Min.	Max.
Mur z cegly pelnej	4,84	125,85	4,77	189,74
Calkowita zawartosc wilgoci [kg/m]	0,58	15,1	0,57	22,77

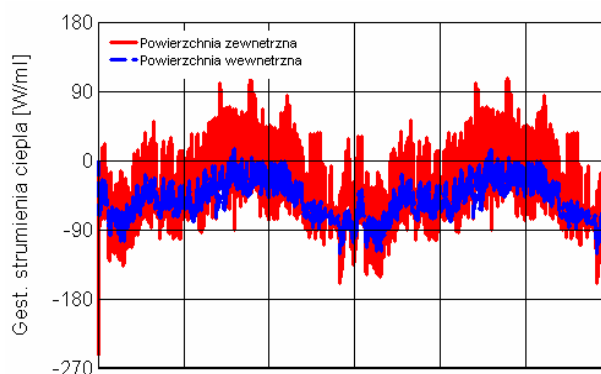
Rys. 6.19. Zmiany zawartości wilgoci w przegrodzie wykonanej tylko z cegły

Jednak opór przenikania ciepła przegrody wykonanej tylko z cegły nie jest dostateczny. Przegroda jest bardzo wrażliwa na zmiany temperaturowe klimatu zewnętrznego. Ścianki z cegły grubością 38 cm i 51 cm stanowią większą barierę przenikania ciepła, co jest widoczne w postaci mniejszych pików na rys. 6.20-6.23.

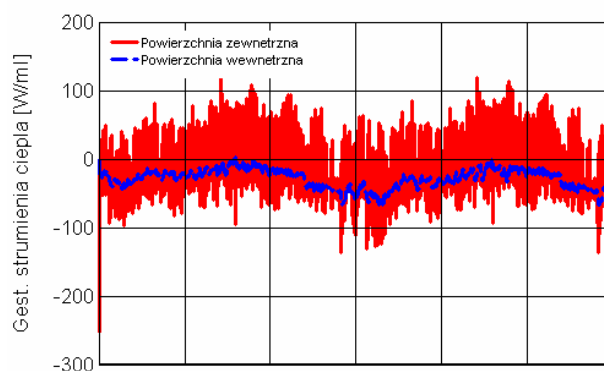
Na temat izolacji cieplnej istniejących budynków, a wśród nich ważną rolę odgrywają zabytkowe i historyczne budowle toczy się ciągła dyskusja [96]. Renowacja musi być kompromisem między koniecznością zachowania zabytkowego charakteru budynków a doprowadzeniem ich do współczesnych standardów cieplnych i użytkowych. Za pomocy programu WUFI można łatwo i skutecznie prognozować ciepłno-wilgotnościowy stan obiektów w proponowanych wersjach konstrukcyjnych.



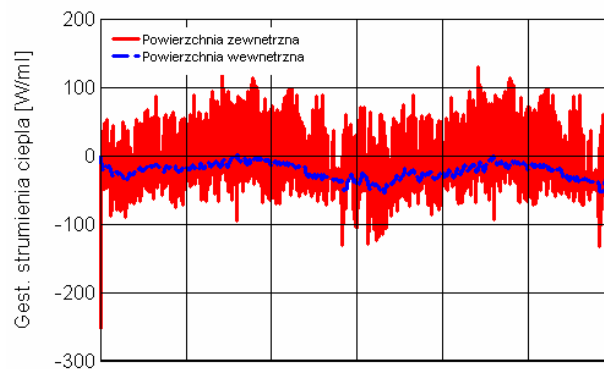
Rys. 6.20. Gęstość strumienia ciepła na powierzchniach przegrody z cegły i silikatu



Rys. 6.21. Gęstość strumienia ciepła na powierzchniach przegrody z cegły 12 cm

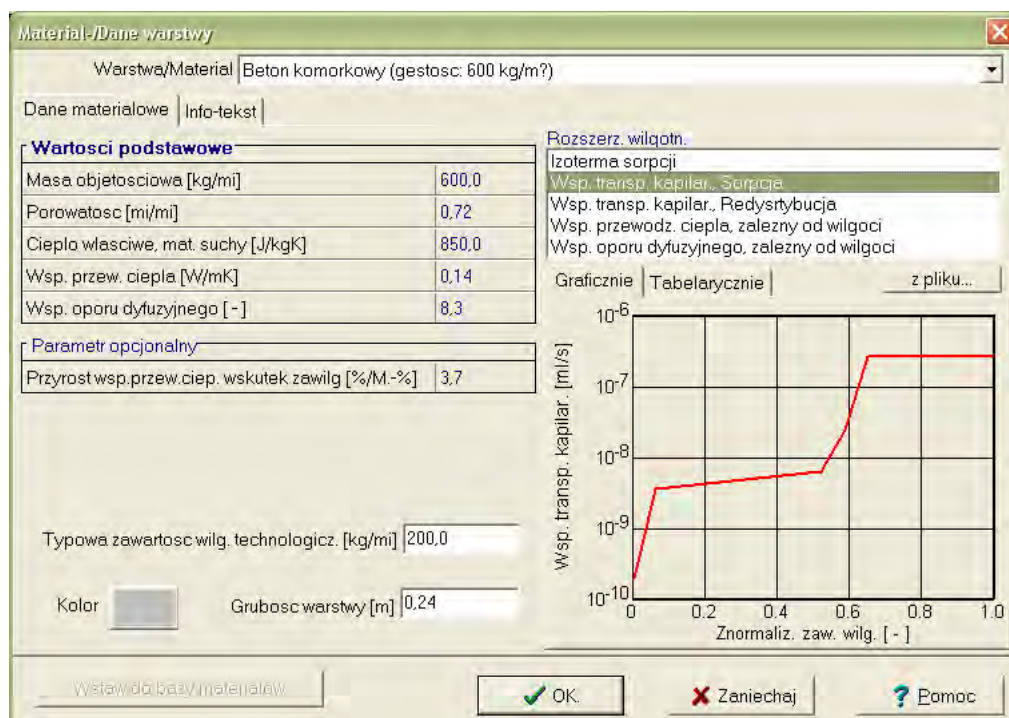


Rys. 6.22. Gęstość strumienia ciepła na powierzchniach przegrody z cegły 38 cm



Rys. 6.23. Gęstość strumienia ciepła na powierzchniach przegrody z cegły 51 cm

Za pomocy programu WUFI-POL wykonano porównywanie otrzymanych danych eksperymentalnych. Ponieważ korzystano z demonstracyjnej wersji programu możliwość wprowadzenia danych materiałowych i nowych materiałów budowlanych była wyłączona. Dlatego korzystano z istniejącej bazy. Z tego powodu po wykonaniu obliczeń wysnuto wnioski o bardzo wielkim znaczeniu danych materiałowych zamieszczonych w programie, a szczególnie danych izotermy sorpcji i współczynników transportu kapilarnego. Dla porównania, ze strony zewnętrznej badanego materiału umieszczono barierę izolacyjną, pomijano opady deszczu, wybrano 10 dni w lipcu i warunki wewnętrzne mało wilgotne z temperaturą około 20°C . W modelu przegrody ustalono zawartość wilgoci początkowej, analogiczną do danych badań laboratoryjnych. Z proponowanych w bazie materiałów najbardziej zbliżony do betonu komórkowego badanego eksperymentalnie pod względem charakterystyki wilgotnościowej okazał się materiał na rys. 6.24. Dla cegły ceramicznej przyjęty został odpowiednik przedstawiony na rys. 6.25.



Rys. 6.24. Dane materiałowe betonu komórkowego gęstości 600 kg/m^3

Material-/Dane warstwy

Warstwa/Material: Historyczna cegla z Wiednia

Dane materialowe | Info-tekst

Wartosci podstawowe

Masa objetosciowa [kg/mi]	1560,0
Porowatosc [mi/mi]	0,38
Cieplo wlasciwe, mat. suchy [J/kgK]	850,0
Wsp. przew. ciepla [W/mK]	0,6
Wsp. oporu dyfuzyjnego [-]	14,93

Parametr opcjonalny

Typowa zawartosc wilg. technologicz. [kg/mi] 11,798

Kolor  Grubosc warstwy [m] 0,25

Wyjdz do bazy danych

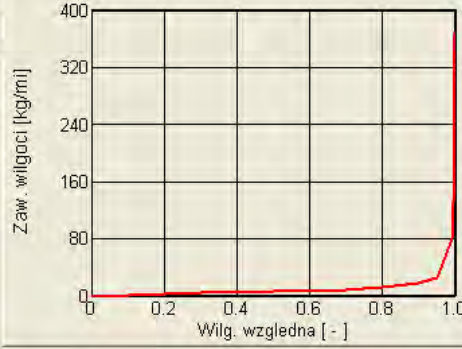
OK Zaniechaj Pomoc

Rozszerz. wilgotn.

Izoterma sorpcji

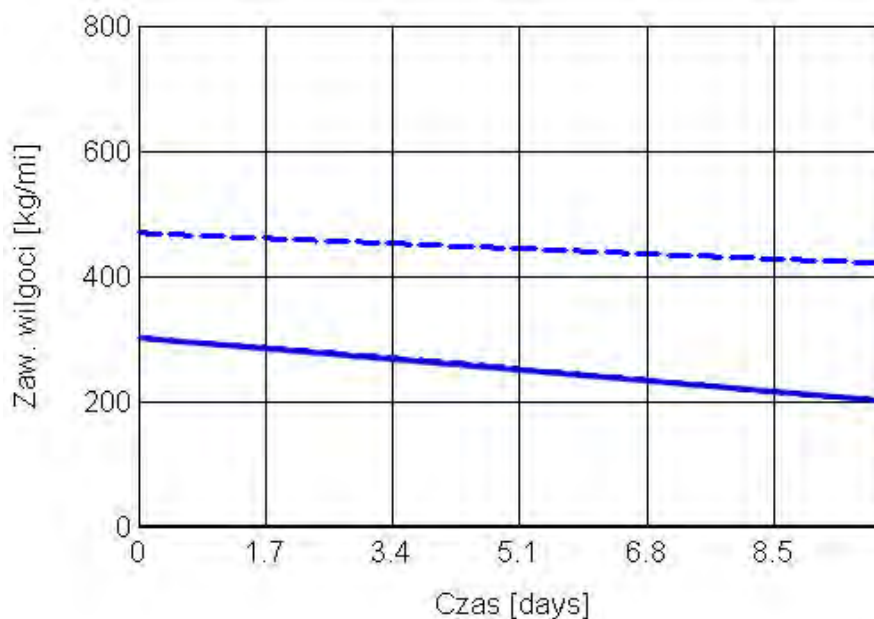
Wsp. transp. kapilar., Sorpcja
Wsp. transp. kapilar., Redysrtybucja
Wsp. przewod. ciepla, zalezny od wilgoci
Wsp. oporu dyfuzyjnego, zalezny od wilgoci

Graficznie | Tabelarycznie | z pliku...



Rys. 6.25. Dane materialowe cegly ceramicznej gęstości 1560 kg/m³

Otrzymane dane wysychania w ciągu 10 dni obu materiałów pokazane na rys. 6.26.



Rys. 6.26. Desorpcja betonu komórkowego (górny) i cegły ceramicznej (dolny) według programu WUFI-POL

Zaw. wilgoci [kg/m ³]				
Warstwa/Material	Start	Koniec	Min.	Max.
vapour barrier (sd=1500m)	0,05	0,02	0,02	0,05
Beton komórkowy (gestosc: 600 kg/m ³)	470,00	421,54	421,54	470,00
Calkowita zawartosc wilgoci [kg/m ³]	112,8	101,17	101,17	112,8

Rys. 6.27. Zmiany zawartości wilgoci w betonie komórkowym

Zaw. wilgoci [kg/m ³]				
Warstwa/Material	Start	Koniec	Min.	Max.
vapour barrier (sd=1500m)	0,04	0,02	0,02	0,13
Historyczna cegla z Wiednia	301,47	250,61	250,61	301,47
Calkowita zawartosc wilgoci [kg/m ³]	75,37	62,65	62,65	75,37

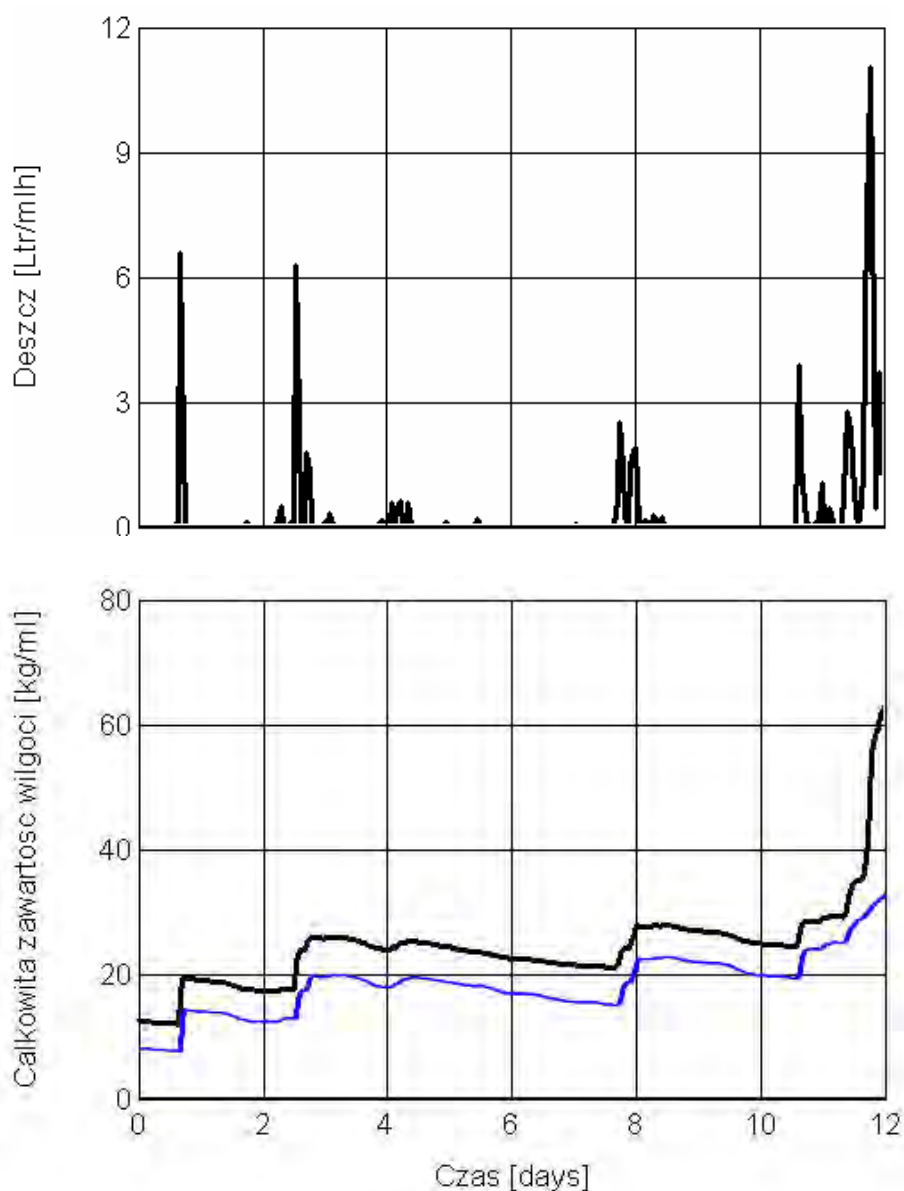
Rys. 6.28. Zmiany zawartości wilgoci w cegle ceramicznej

Wyniki wysychania cegły ceramicznej są bardzo przybliżone do otrzymanych danych eksperymentalnych [rozd. 5] co jest konsekwencją właściwego doboru danych materiałowych z bazy materiałowej dostępnej w programie. Modelowanie w betonie komórkowym wykazało rozbieżności, spowodowane mniejszym współczynnikiem desorpcji wilgoci odniesionym do bazy materiałowej programu. Być może to wynikać z faktu generowania w programie właściwości materiałowych według wzorów (6.3), (6.4) i in., a nie korzystania z danych eksperymentalnych, otrzymanych w laboratorium.

W programie WUFI-POL nie uwzględniona jest możliwość obserwacji zjawiska podciągania kapilarnego wilgoci z gruntu do przegród budowlanych. W celu modelowania przenoszenia kapilarnego w ścianie obserwowano wpływ deszczu na stan wilgotnościowy badanego materiału przez 12 dni w lecie. Przyjęto początkową wilgotność materiałów przybliżoną do danych eksperymentalnych – około 5 %. Dla modelowania największego wpływu opadów deszczu na przegrodę wybrana była orientacja zachodnia elewacji, w górnej części budynku powyżej 10 m. Obciążenie deszczowe w programie WUFI opisane zależnością:

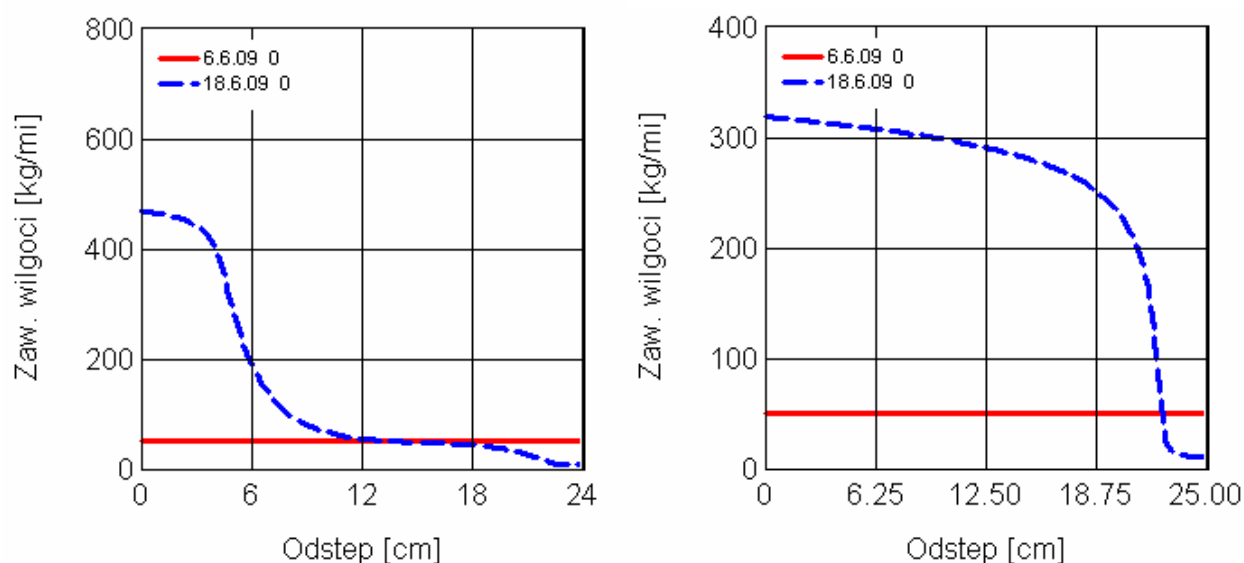
$$R_L = R_h \cdot (R_1 + R_2 \cdot V_n), \text{ mm/h} \quad (6.5)$$

gdzie R_L – obciążenie zacinającym deszczem, R_h – obciążenie opadami deszczu na powierzchnię poziomą, V_n – prędkość wiatru w kierunku prostopadłym do ściany, R_1 – współczynnik nachylenia przegrody, R_2 – współczynnik wysokości elewacji. Podczas obliczeń wartość obciążenia deszczem zacinającym mnożona jest przez współczynnik absorpcji deszczu, który według Künzla stanowi 0,7 dla większości materiałów [94].



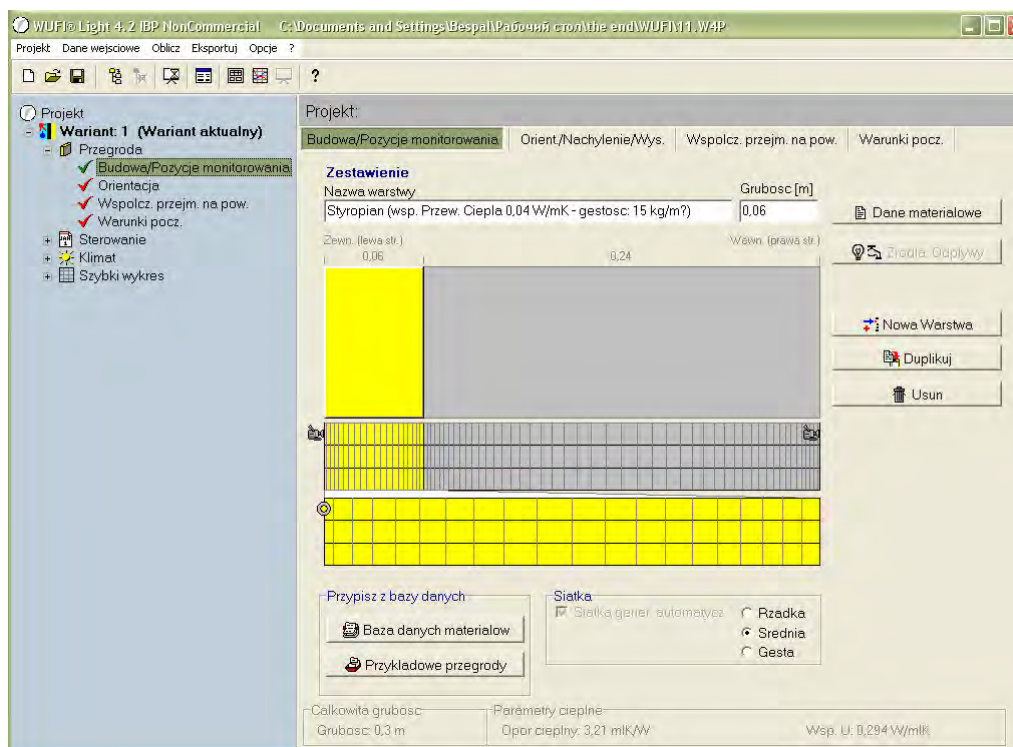
Rys. 6.29. Wpływ deszczu na stan wilgotnościowy w betonie komórkowym (czarna linia) i cegle ceramicznej (niebieska linia)

Charakter zmian wilgotności i w betonie komórkowym i w cegle jest prawie identyczny, zgodnie z rys. 6.29. Jednak na rys. 6.30 umieszczono profile zmian wilgotności wraz z grubością przegrody, gdzie różnica jest widoczna. Zmiany te dotyczą parametrów materiałowych – zmiany współczynników transportu kapilarnego i jeżeli warunki brzegowe są jednakowe – dotyczą tylko różnicy właściwości podstawowych materiałów – gęstości, porowatości, różnicy w składzie i td.



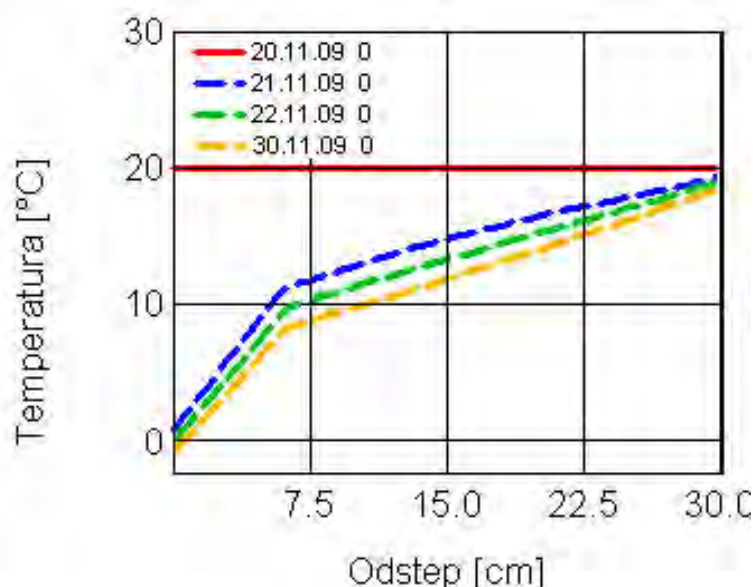
Rys. 6.30. Profil wilgotnościowy w przekroju ściany z betonu komórkowego (lewy) i cegły (prawy)

Dla obserwacji zmian temperaturowych w środku przegrody do programu WUFI-POL zanesiony został model ściany z [rozd. 5].



Rys. 6.31. Wprowadzenie poszczególnych warstw przegrody do programu WUFI-POL

Obserwowano procesy zachodzące w zimie, dla klimatu Warszawy. Wybrane zostały dni z temperaturą powietrza blisko 0°C , wpływu deszczu nie uwzględniono. Otrzymane wykresy pokazane na rys.6.32.

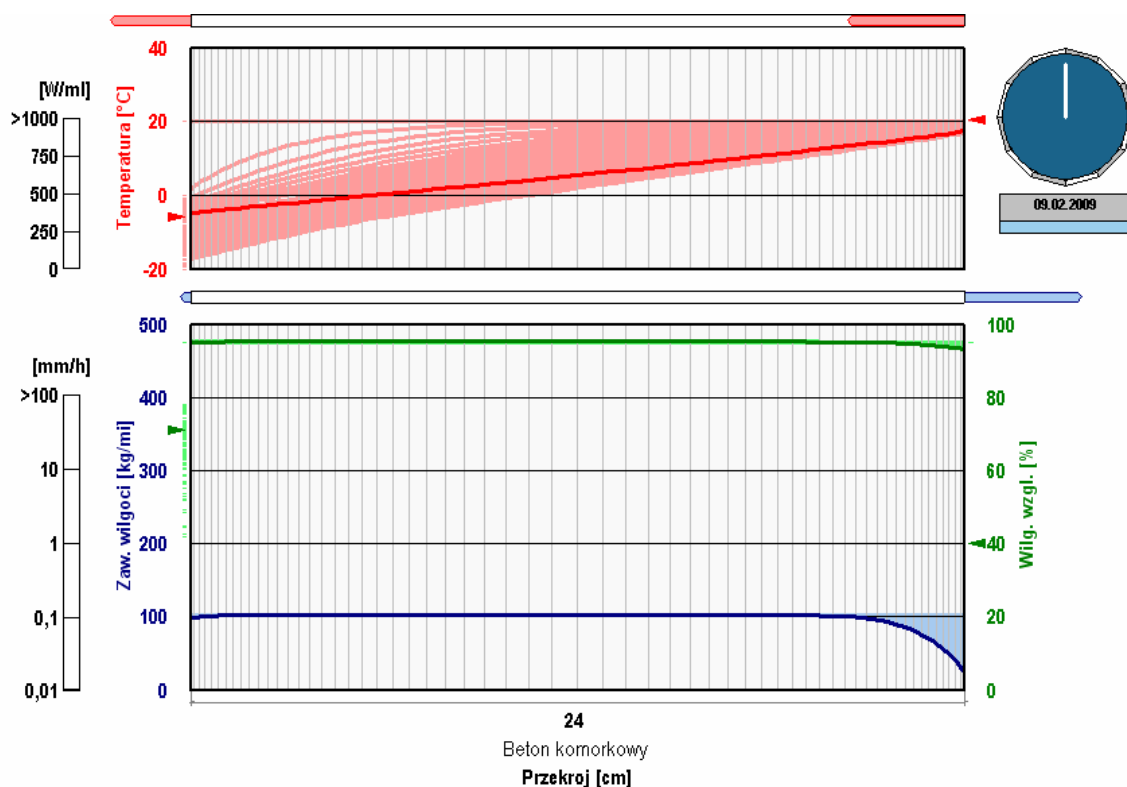


Rys. 6.32. Rozkład temperatury w ścianie z betonu komórkowego i styropianu przy $t=0^{\circ}\text{C}$ po stronie zewnętrznej i $t=20^{\circ}\text{C}$ po stronie wewnętrznej przegrody

Przy pomocy modelowania komputerowego wykazano zmianę pól temperatury w środku przegrody w różnych dniach trwania badań, przy stałych warunkach brzegowych.

Dla próby modelowania zjawiska termodyfuzji wybrano 24 cm otynkowanego w celu stabilizacji wilgotnościowej betonu komórkowego. Nadano mu wilgotności początkowej 10 % i zrobiono różnicę w warunkach temperaturowych po obu stronach przegrody 30°C .

Po wykonaniu modelowania można zaobserwować różnicę pomiędzy otrzymanymi w laboratorium i na rys. 6.33 wielkościami wilgoci. Wyjaśnić to można tym, że program WUFI zorientowany jest bardziej na warunki rzeczywiste, w których ciężko wyodrębnić jedną z wielu możliwych form przemieszczania wilgoci. Nawet ten fakt, że istniejące przeciwstawne kierunki dyfuzji pary wodnej i transportu kapilarnego mogą nie dać zaobserwować zmianę przemieszczenia wilgoci w jednej postaci. W laboratorium wykazano istnienie zjawiska termodyfuzji, więc za pomocy programu wyjaśniono, że w warunkach rzeczywistych to zjawisko nie jest samoczynne, a zawsze jest połączone z innymi przejściami cieplno-wilgotnościowymi.



Rys. 6.33. Modelowanie procesu termodyfuzji w betonie komórkowym w programie WUFI-POL

Z prowadzonych obliczeń komputerowych można wnioskować o dużym podobieństwie otrzymanych wyników drogą eksperymentalną i matematyczną. Program WUFI nawet w wersji demonstracyjnej pokazał duże możliwości w prowadzeniu symulacji niestacjonarnych procesów przenoszenia ciepła i wilgoci. Łatwa obsługa, wielowariantowość, duża baza materiałów budowlanych, dane klimatyczne wielu regionów, a także znakomita graficzna forma prezentacji wyników obliczeń stawiają ten program z bardzo wysokiej strony. Obliczenie komputerowe potwierdziło, że pomiary laboratoryjne są bardzo ważne dla modelowania komputerowego, bo tylko drogą eksperymentalną można otrzymać wartości fizycznych właściwości materiałów budowlanych – gęstość, porowatość, ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, izotermę sorpcji, współczynnik dyfuzji wilgoci i in., większość z których została wyznaczona w niniejszej pracy za pomocą metody TDR.

OGÓLNE WNIOSKI

Celem pracy było zastosowanie techniki pomiarowej TDR do badania właściwości cieplnych i wilgotnościowych wybranych materiałów budowlanych oraz symulacja sprężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych za pomocy użytego modelu matematycznego.

Do realizacji celu wykonano badania literaturowe dotyczące tematu, przeprowadzono badania laboratoryjne i przedstawione symulacje programu komputerowego.

W części teoretycznej pracy dotyczącej przepływu masy (wody) w materiałach o strukturze niejednorodnej, przedstawiono klasyfikację form występowania wilgoci w materiałach budowlanych, wykonano analizę przyczyn zawilgocenia przegród, ich wpływu na stan przegrody i przeciwdziałanie nim. Ponadto wykonano analizę procesów transportu wody w porach materiałów budowlanych, gdzie trudne jest praktyczne korzystanie z przedstawionych zależności matematycznych ze względu na jednoczesne występowanie kilku złożonych mechanizmów transportu wilgoci. W wyniku porównywania różnych wzorów dla współczynnika dyfuzji wilgoci w ośrodkach niejednorodnych zweryfikowano zależność od warunków wilgotnościowych, temperatury i struktury materiału.

W części teoretycznej dotyczącej przenoszenia energii (ciepła) w materiałach o strukturze niejednorodnej, korzystając z teoretycznych podstaw fizycznych wykonano analizę procesów przenoszenia ciepła w ośrodkach niejednorodnych. Wyznaczono podstawowe parametry mające wpływ na przewodzenie ciepła. Wykazano również, że jednym z najważniejszych parametrów jest współczynnik przewodzenia cieplnego λ , zależny od parametrów materiałowych, warunków temperaturowych i wilgotnościowych. Rozpatrywanie wpływu czynników na proces przewodzenia ciepła wykazało potrzebę badania złożonego przenoszenia ciepła i wody. Dla opisu wpływu wzajemnego procesów przenoszenia ciepła i wody w aspekcie teoretycznym stosowano kryteria podobieństwa – Prandtla, Knudsen'a i Luikov'a. Udowodniono, że jednym z czynników wpływającym na proces przenoszenia ciepła jest stężenie soli w materiałach budowlanych – zwiększenie zawartości soli sprzyja wiązaniu wody, w wyniku czego wzrasta współczynnik przewodności cieplnej materiału. Zrobiona została analiza opracowanych modeli matematycznych sprężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych w Polsce i na świecie za ostatnie lata.

Ponadto, w części teoretycznej przeprowadzono analizę programów komputerowych dotyczących modelowania procesów przenoszenia ciepła i wody, która potwierdziła ciągły rozwój wiedzy w tym kierunku.

W części eksperymentalnej pracy zaprojektowano i wykonano dwa stanowiska eksperymentalne, za pomocą których obserwowano i rejestrowano zmiany wilgotnościowe i cieplne ośrodków. Wykazano możliwość zastosowania w pomiarach cieplno-wilgotnościowych metody TDR, która jest obecnie w fazie wdrożeniowej zarówno w Polsce jak i na świecie w odniesieniu do badań materiałów budowlanych. Wykazano również, że opracowane modele i programy komputerowe pozwalają wyznaczyć parametry ośrodka porowatego, których pomiary są trudne i kosztowne na drodze analizy innych parametrów ośrodka, łatwiejszych do określenia. Zastosowana metoda pomiarowa TDR pozwala na długoterminowy monitoring wilgotności, rezystancji i temperatury zarówno próbek jak i odrębnych elementów budowli (modelowa przegroda). Może być stosowana zarówno w przypadku materiałów konstrukcyjnych (ceramiki, betonu komórkowego itd.) jak i materiałów termoizolacyjnych (styropian).

Badanie procesu desorpcji w materiałach budowlanych pozwala na prognozowanie czasu wymaganego do usunięcia wilgoci z różnych przekrojów materiału do powietrza otaczającego.

Badanie procesu podciągania kapilarnego w materiałach budowlanych pozwala na prognozowanie czasu w ciągu którego następuje nasycanie różnych warstw przekroju przegrody drogą kapilarną. Może być to użyteczne podczas projektowania i modelowania zjawisk cieplno-wilgotnościowych w elementach przegród zagrożonych wpływem wód gruntowych – przegrody piwnic albo pierwszej kondygnacji.

Badania parametrów cieplnych materiałów budowlanych pozwoliły obliczyć współczynnik przewodzenia ciepła i jego zmianę od wilgotności próbek.

Za pomocy transformacji Boltzmanna wykonane zostały obliczenia współczynnika dyfuzji wilgoci i określona zależność wartości tego współczynnika od wilgotności materiału budowlanego.

Wszystkie przedstawione zjawiska fizyczne zostały opisane matematycznie.

W pracy został przyjęty model matematyczny i program komputerowy dla badań cieplno-wilgotnościowych przegród budowlanych pod nazwą WUFI. Za pomocy wykonanych symulacji komputerowych potwierdzona została trafność stosowanej metody badawczej, zamodelowane zostały różne warianty przegród budowlanych w wyniku których otrzymano ciekawe efekty symulacyjne.

LITERATURA

1. Adamowski J. Metody wykrywania nieszczelności hydroizolacji dachów płaskich. Forum budowlane. Nr 7/2006
2. Aksielrud G.A., Altszuler M.A.: Ruch masy w ciałach porowatych, WNT, Warszawa 1989
3. Barnat-Hunek D., Szmygin B. Ocena efektywności preparatów do powierzchniowej hydrofobizacji opoki wapnistej z Kazimierza Dolnego nad Wisłą. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław, Dolnośląskie wydawnictwo edukacyjne, 2006, 751 s.
4. Baruah T., Hasegava S. In-situ measurement of soil evaporation from a volcanic ash soil by TDR technique using soil water diffusivity, "Geoderma" 2001, nr 102, p.317-328
5. Bauman G. Adaptacja oprogramowania konsoli MR do badań materiałów porowatych. Praca magisterska. Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2006
6. Bennet C.O., Myers J.E.: Przenoszenie pędu, ciepła i masy, WNT, Warszawa 1967
7. Bezpalko N., Sobczuk H. Określenie właściwości wilgotnościowych materiałów budowlanych za pomocą metody TDR, Referaty naukowe sympozjum „Nowe osiągnięcia nauki i techniki w budownictwie”, Rzeszów 2005, Wyd-wo Politechniki Rzeszowskiej, s. 149-159
8. Bielecki Z, Rogalski A.: Detekcja sygnałów optycznych, WNT, Warszawa 2001
9. Biernat K. i in. Tomograficzna metoda oceny stopnia zawilgocenia murów ceglanych. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław, Dolnośląskie wydawnictwo edukacyjne, 2006, 751 s.
10. Blocken B., Jansen H., Carmeliet J. On the modelling of runoff of driving rain on a capillary active surface, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 400-408
11. Bogosłowski W.: Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach, Arkady, Warszawa 1989

12. Bogusławska-Kozłowska J., Jeruzal J. Analiza składu mikroflory pleśniowej w zagrzybionych budynkach Łodzi. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław, Dolnośląskie wydawnictwo edukacyjne 2006, 751 s.
13. Borowczyk M., Czubek J., Dziunikowski B., Niewodniczański J., Zuber A., „Aparatura do radiometrycznego oznaczania ciężaru objętościowego gruntów w warunkach terenowych” Nukleonika, **9**, 871, 1964
14. Brandt A., [i in.]: Kryteria i metody optymalizacji konstrukcji, PWN, Warszawa 1977
15. Budownictwo ogólne. Materiały i wyroby budowlane. T.1. Praca zbiorowa pod kierunkiem Stefańczyka B., Warszawa, wyd-wo „Arkady”, 2005, 926 s.
16. Chen Y., Wang S. Transfer function model and frequency domain validation of moisture sorption in air-conditioned buildings, “Building and Environment” 2001, Vol. 36, p.579-588
17. Comegna V., Coppola A., Sommella A. Nonreactive solute transport in variously structured soil materials as determined by laboratory-based time domain reflectometry (TDR), “Geoderma” 1999, nr 92, p.167-184
18. Corey A., Klute A. Application of the potential concept to soil water equilibrium and transport, “Soil Sci. Soc. Am. J.” 1985, Vol. 49, p.3-11
19. Czarnecki L., Broniewski T., Henning O.: Chemia w budownictwie, Arkady, Warszawa 1996
20. Demichowacz-Pigoniowa J.: Obliczenia fizykochemiczne. Część I. Termodynamika chemiczna i nauka o fazach, Wrocław 1975
21. Dobrowolna J., Stastnik S., Zach J., Znajda T. Heat technical troubles of light building construction, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 20-26
22. Dominauskas A., Heider D., Gillespie J. Electric time-domain reflectometry sensor for online flow sensing in liquid composite molding processing, “Composites: Part A” 2003, nr 34, p. 67-74
23. Dzieniszewski W., [i in.]: Optymalizacja wytrzymałości konstrukcji. Praca zbiorowa, PAN 1983
24. Dzieniszewski W., Faryniak L.: Modelowanie matematyczne procesów przepływowych powietrza przez obudowę w obszarach budynków, Rzeszów 1999

25. Eller H., Denoth A. A capacitive soil moisture sensor, "Journal of Hydrology" 1996, nr 185, p. 137-146
26. EN-ISO 13788, Hygrothermal performance of building components and building elements. Estimation of internal surface temperature to avoid critical surface humidity and calculation of interstitial condensation, CEN 2001
27. Fiala L., Pavlik Z. i in. Boltzmann-transformation solution of the problem of coupled water and salt transport in porous materials. Czech Science Foundation, grant No.103/04/P085
28. Funk M., Grunewald J. Die thermodynamischen grundlagen des numerischen Simulationsprogramms DELPHIN4, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 491-500
29. Garbalińska H.: Izotermiczne współczynniki transportu wilgoci porowatego materiału budowlanego, Szczecin 2002
30. Gawin D. (red.), Komputerowa symulacja procesów wymiany masy i energii w budynku. Przykłady zastosowań. Seria: Komputerowa Fizyka Budowli, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998
31. Gawin D., Kossecka E., [i in.]: Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach, Drukarnia wydawnictw naukowych, Łódź 2002
32. Gawin D., Modelowanie sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Zeszyty Naukowe Nr 853, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000
33. Glaser H., Graphisches verfahren zur untersuchung von diffusionvergangen, kalttechnik, 11, s. 345-349 1959
34. Gózdź A.: Modelowanie w fizyce. (Konstankiewicz K., Usowicz B. (red): „Fizyka z elementami agrofizyki”). Materiały IX Szkoły p.t. Agrofizyczne metody badań, ich znaczenie i upowszechnianie. Lublin, s. 23-29 1997
35. Grunewald J., Bomberg M. An engineering approximation of material characteristics for input to heat, air and moisture transport simulations, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 272-285
36. Grunewald J., Steiger M., Kriegel R., Espinosa R. Implementierung eines models für den salztransport in kapillarporösen baustoffen im

- simulationprogramm Delphin4, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 514-525
37. Gumiński K.: Termodynamika procesów nieodwracalnych, PWN, Warszawa 1983
38. Häupl P., Fechner H. Hygric material properties of porous building materials, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 295-309
39. Haverkamp R., Parlange J. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter, "Soil Sci. Soc. Am. J." 1986, Vol. 142, nr 6, p.325-339
40. Hens H., Annex 24 - an example of international cooperation in HAM-design, CIB Proc., Publication 173, KU-Leuven & CIB-Rotterdam 1994
41. Hopmans J., Dane J. Temperature dependence of soil water retention curves, "Soil Sci. Soc. Am. J." 1986, Vol. 50, p.562-567
42. Huisman J., Snepvangers J., Bouten W., Heuvelink B. Mapping spatial variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry, "Journal of Hydrology" 2002, nr 269, p. 194-207
43. Huisman J., Sperl C., Bouten W., Verstraten J. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar, "Journal of Hydrology" 2001, nr 245, p. 48-58
44. Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J.: Fizyka budowli. Wybrane zagadnienia. Białystok 2000
45. Instrukcja obsługi. Wilgotnościomierz mikrofalowy LB 456. Marzec 2003
46. Ishizaki T. Experimental study of water redistribution measurement in the model earthen wall and its numerical analysis, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 576-584
47. Jankowski S. Magnetyczny rezonans jądrowy. Życie Uczelni – Biuletyn Informacyjny Politechniki Łódzkiej. Nr 3/2003
48. Jasieńko J., Matkowski Z. Zasolenie i zawilgocenie murów ceglanych w obiektach zabytkowych – diagnostyka, metodyka badań, techniki rehabilitacji. Wiadomości konserwatorskie. nr 14/2003
49. Jezierski W., Kosior-Kazberuk M. Współczynnik przewodzenia ciepła zasolonych materiałów ściennych. Przegląd budowlany, 6/2008, s. 38-41

50. Jiaping L. Thermal environment of chinese traditional yaodong dwellings, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 148-157
51. Kalmar F. Energy analysis of building thermal insulation, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 103-112
52. Kasperkiewicz J.: Dyfuzja wilgoci i deformacje skurczowe w betonie, PWN, Warszawa 1972
53. Kawala Z., Pająk M., Szust J.: Zbiór zadań z podstawowych procesów inżynierii chemicznej. Część II. Przenoszenie ciepła. Politechnika Wrocławska 1987
54. Keller B., Magyari E., Tian Y. Klimatisch angepasstes Bauen: Eine allgemeingültige Methode, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 113-125
55. Kiessl K., Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Diss. Univ. Essen, Essen 1983
56. Klemm P., Gawin D.: Przybliżony model matematyczny opisujący procesy sprzężonego transportu ciepła i wilgoci w ośrodkach kapilarno-porowatych, w P. Klemm (red.), Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych. Wybrane modele i metody badań. T. I, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993, s. 70 – 85
57. Klemm P., [i in.]: Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych, t.4, Politechnika Łódzka, Łódź 1994
58. Kolek Z., Marcinkowska E. Dynamiczna metoda pomiaru parametrów cieplnych materiałów. Artykuł recenzowany. Kraków 2007
59. Kool J., Parker J., van Genuchten M. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, "Soil Sci. Soc. Am. J." 1985, Vol. 49, p.1348-1359
60. Kostyrko K., Łobsowski A.: Klimat. Pomiary. Regulacja, Warszawa 2002
61. Kostyrko K., Okołowicz-Grabowska B.: Pomiary i regulacja wilgotności w pomieszczeniach, Arkady, Warszawa 1971
62. Koronthalyova O., Matiasovsky P., Moisture dependant thermal conductivity analysis of the low density CSH based materials, Building Physics 2002 – 6th Nordic Symposium, p. 515-522
63. Kubik J., Świrski J., Wyrwał J.: Popowodziowe zawilgocenie przegrody, Politechnika Opolska, 1999

64. Kubik J.: Przepływy wilgoci w materiałach budowlanych, Politechnika Opolska 2000
65. Kubik J. The properties of thin moisture films, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 436-440
66. Künzelt H., Holm A., Radoń J., Gawin D. „WUFI-POL” – program do cieplno-wilgotnościowego projektowania przegród budowlanych w Polsce. Sprawozdanie z grantu Nr 7 T07E 045 23
67. Kurnikowski J.. Przyrządy do pomiaru wilgotności podłoża. Profesjonalny parkiet. nr 1/2003
68. Larossa Rodriguez C., da Cunha Neto J., Prata A. Using time domain reflectometry to measure moisture content discontinuity of an artificial soil, “Experimental Thermal and Fluid Science” 1999, nr 20, p. 25-33
69. Leśniewska M., Pogorzelskij A. Badania ruchu kapilarnego wody w niektórych materiałach budowlanych, „Arch. Inż. Łąd.” 1976, nr 22, 2, s. 333-343
70. Liu X., Pinto N. Frequency domain π -phase-shift reflektometry for soil moisture measyrement, “Sensors and Actuators” 1996, nr 55, p.127-132
71. Łobzowski A., Opęchowski A., Szkolnikowski W. Wilgotność materiałów stałych, sypkich i gleby. Pomiar, nr 4/2008.
72. Maděra J., Černý R. Capillary active materiale on the mineral wool basis in interior thermal insulation systems: compulational simulation of hygrothermal performance, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 585-594
73. Malicki M.A., Skierucha W.M., A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse, „Irrigation Science” 1989, nr 10, s.153-163
74. Mansell R., Bloom S., Burgoa B., Nkedi-Kizza P., Chen J. Experimental and simulated p transport in soil using a multireaction model “Soil Sci. Soc. Am. J.” 1992, Vol. 153, nr 3, p.185-194
75. Maryniwicz A., Świrska J., Wyrwał J. Wyznaczenie współczynnika dyfuzji pary wodnej w ujęciu losowym. Roczniki inżynierii budowlanej. Zeszyt 7/2007, Katowice
76. Matiasovsky P., Koronthallyova O. Complex and basic material properties of calcium-silicate for the HAM transport simulation, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 329-337

77. Mid-Term report for project GRD1-1999-11149. Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation
78. Miyamoto T., Kobayashi R., Annaka T., Chikushi J. Applicability of multiple length TDR probes to measure water distributions in an Andisol under different tillage systems in Japan, „Soil & Tillage Research” 2001, nr 60, p. 91-99
79. Mojid M.A., Cho H., Response of the core and shield rods of time-domain reflectometry probe to transverse soil-water content heterogeneity, „Journal of Hydrology” 2002, nr 262, p.21-27
80. Musters P., Bouten W. A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents for calibrating a root water uptake model, “Journal of hydrology” 2000, nr 227, p. 273-286
81. Nassar I. N., Horton R., Heat, water and solute transfer in unsaturated porous media: I – theory development and transport coefficient evaluation. Transport in Porous Media 27, 1997
82. Ościk J.: Adsorpcja, PWN, Warszawa 1983
83. Ozaki A. Systematic analysis model on combined heat and water transfer Rusing water potential based on thermodynamics, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 624-633
84. Persson M., Berndtsson R. Estimating transport parameters in an undisturbed soil column using time domain reflectometry and transfer function theory, “Journal of Hydrology” 1998, nr 205, p. 232-247
85. Pihlajavaara S.E., Studies of the effect of gravitation on drying with special reference to concrete, ”Journal of Engineering Physics and Thermophysics” 1968, Vol. 14, nr 2, February, p.208-218
86. Plagge R., Häupl P. Grunewald J., Fechner H. Functional description of water storage and transfer in capillary porous building materials, Materials of symposium for building physics, september 2002, Dresden, s. 338-350
87. Płochocki Z.: Słownik fizyczny. Wiedza Powszechna, Warszawa, 235, 1984.
88. Płoński I., [i in.]: Poradnik inżyniera i technika budowlanego, t.2, Materiały i wyroby budowlane, Arkady, Warszawa 1982
89. Płoński W., Pogorzelski J.A.: Fizyka budowli, Arkady, Warszawa 1979

90. PN-C-04959:1981. Oznaczanie zawartości wody metodą Karola Fischera w produktach organicznych i nieorganicznych
91. Pogorzelski J.: Fizyka ciepła budowli, PWN, Warszawa 1976
92. Ponizovsky A., Chudinova S., Pachepsky Y. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture, "Journal of Hydrology" 1999, nr 218, p. 35-43
93. Potter D.: Metody obliczeniowe fizyki, PWN, Warszawa 1977
94. Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie w analizach cieplno-wilgotnościowych przegród budowlanych. Pod red. Gawina D. I Kosseckiej E., Łódź, 2007, 160 s.
95. Prystaj A.: Zadania z hydrostatyki, Kraków 1999
96. Radoń J., Künzeli H. Problemy cieplno-wilgotnościowe przy renowacji ścian budynków z muru pruskiego. Architektura 5 (1), 2006, s.45-53
97. Rees S., Zhou H., Thomas H. The influence of soil moisture content variations on heat losses from earth-contact structures: an initial assessment, "Building and Environment" 2001, Vol. 36, p.157-165
98. Robinson D., Gardner C., Cooper J. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity, "Journal of Hydrology" 1999, nr 223, p. 198-211
99. Rokiel M. Hydroizolacje w budownictwie. Warszawa 2006, 256 s.
100. Russo D., Zajdel J., Laufer A. Stochastic analysis of solute transport in partially saturated heterogeneous soil, "Water Resources research" 1994, Vol. 30, nr. 3, p.769-779
101. Sawicki J.: Przenoszenie masy i energii. Politechnika Gdańska 1993
102. Skabiński S. Sole rozpuszczalne w wodzie, Renowacje, 10/2000
103. Składzień J.: Termodynamika i termokinetyka. Politechnika Śląska 1985
104. Skoczylas A.: Przenoszenie ciepła. Politechnika Wrocławska 1999
105. Sławiński C. Wpływ fizycznych parametrów gleby na wartości współczynnika przewodnictwa wodnego, Lublin 2003
106. Sobczuk H., Kokot J., Walczak R., Zhou L., TDR setup for monitoring flow variability of solute in soil column, Mat. 6th International Conference on Agrophysics, Volume 1, Institute of Agrophysics, Lublin 1997

107. Sobczuk H: Sprawozdanie merytoryczne grantu nr 4 T09D 052 22 „Opracowanie modelu i zestawu pomiarowego do oceny charakterystyk cieplnych i wodnych materiałów budowlanych narażonych na oddziaływanie czynników klimatycznych w aspekcie ochrony środowiska”
108. Staniszewski B.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979
109. Stähli M., Stadler D. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry, “Journal of Hydrology” 1997, nr 195, p.352-369
110. Strzelecki T., [i in.]: Mechanika ośrodków niejednorodnych. Teoria homogenizacji, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 1996
111. Talsma T. Prediction of hydraulic conductivity from soil water retention, “Soil Sci. Soc. Am. J.” 1985, Vol. 140, nr.3, p.184-188
112. Tarnowski W., Bartkiewicz S.: Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1968
113. Thomsen A., Hansen B., Schelde K. Application of TDR to water level measurement, „Journal of Hydrology” 2000, nr 236, p. 252-258
114. Tomkiewicz D. Zastosowanie spektrometrii impedancyjnej do pomiaru wilgotności ziarna zbóż. Inżynieria Rolnicza. Nr 8(96)/2007
115. Topp C. G., Reynolds D. W., Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil, „Soil & Tillage Research” 1998, nr 47, p.125-132
116. Usowicz B. Statystyczno-fizyczne modele przepływu masy i energii w ośrodku porowatym, Lublin 2000
117. Vaz C., Bassoi L., Hopmans J. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer – TDR probe, „Soil & Tillage Research” 2001, nr 60, p. 35-42
118. Walczak R. Agrofizyka: fizyka środowiska i żywności, Materiały XXXVI zjazdu fizyków polskich, Toruń 2001
119. Werner, H. Gertis K., Energetische Kopplung von Feuchte- und Wärmeübertragung an Außenflächen, In: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 258, Berlin 1976

120. Wesołowska M. Wpływ obecności chlorku sodu na materiał ceramiczny poddany wielokrotnym cyklom kapilarnego nawilgacania. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław, Dolnośląskie wydawnictwo edukacyjne, 2006, 751 s.
121. Williams R., Ahuja L., Naney J. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data, "Soil Sci. Soc. Am. J." 1992, Vol. 153, nr.3, p.172-184
122. Wiśniewski S., Staniszewski B., Szymanik R.: Termodynamika procesów nierównowagowych, Warszawa 1973
123. Witakowski P., Klisiński M., Ratajewicz-Natkowska B., Analiza i podstawy projektowania przegród budowlanych pod względem izolacyjności higrotermicznej, Raport wykonany w ramach CPBP 02.21, temat 6.6, Warszawa 1989
124. Witczak H., Künzle H., Gawin D. Wpływ zacinającego deszczu na stan wilgotnościowy przegród budowlanych w Polsce. Materiały XLIX Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa-Krynica, 2003, t. IV, s. 99-106
125. Wójcik R., Wpływy temperatury i wilgoci na współczynniki kinetyczne dyfuzji i termodyfuzji betonu komórkowego, praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 1990
126. Wraith J., Das B. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry, „Soil & Tillage Research” 1998, nr 47, p. 145-150
127. Wyrwał J.: Ruch wilgoci w porowatych materiałach i przegrodach budowlanych. Studia i Monografie z.31, Wydawnictwo W.S.I. w Opolu, Opole 1989
128. Wyrwał J.: Termodynamiczne podstawy fizyki budowli, Opole 2004
129. Wyrwał J., Świrski J.: Problemy zawilgocenia przegród budowlanych, Warszawa 1998
130. Zakrzewski T.: Zagadnienia fizyczne w budownictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
131. Zaradny H.: Ciśnienia porowe w budowlach ziemnych, IBN PAN, Gdańsk 1999
132. Zaradny H.: Ciśnienia porowe w budowlach ziemnych. Mechanizmy ich kształtowania oraz metody pomiarowe, IBN PAN, Gdańsk 1999

133. Żenczykowski W.: Budownictwo ogólne, Arkady, Warszawa 1987
134. Żenczykowski W.: Budownictwo ogólne, t. 3/1. Problemy fizyki budowli i izolacje, Arkady, Warszawa 1987
135. Белобородов В.В. Определение химического потенциала процессов массо- и теплопереноса в пористых телах, «Инженерно-физический журнал» 2002, том 75, №3, с.141-145
136. Богословский В.Н. Строительная теплофизика, М.: Высшая школа 1970, 375 с.
137. Брич М.А., Кожин В.П. Влияние теплопереноса на кинетику процесса пропитки древесины, «Инженерно-физический журнал» 2004, том 77, №1, с.33-38
138. Брич М.А., Кожин В.П. Моделирование неизотермической пропитки древесины и других пористых сред жидкостями, «Инженерно-физический журнал» 2002, том 75, №2, с.75-80
139. Гаврилов Н.Т. Практический опыт диагностики и прогнозирования технико-эксплуатационного состояния зданий в условиях нерасчетных температурно-влажностных воздействий, «Инженерные системы» 2002, №4, с.52-57
140. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Метод инженерного расчета влажностного состояния ограждающих конструкций, учитывающий перенос парообразной и жидкой влаги. Материалы международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», Москва 2005
141. Гамаюнов Н.Н., Гамаюнов С.Н. Массоперенос и осмотические явления в набухающих органических материалах, «Инженерно-физический журнал» 2003, том 76, №6, с.110-117
142. Гамаюнов Н.Н., Гамаюнов С.Н. Усадка и прочность капиллярно-пористых коллоидных материалов, «Инженерно-физический журнал» 2004, том 77, №1, с.39-44
143. Гіроль А.П., Гіроль М.М., Омельчук Н.О. Гідромеханічні процеси аеродинаміки, тепломасопереносу і фільтрації. Рівне: РДТУ 2002, 276 с.
144. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. Методы и приборы. М.: Наука 1964, 720 с.

145. Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Куц П.С., Павлюкевич Н.В., Терехов В.И. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах, «Инженерно-физический журнал» 2003, том 76, №6, с.129-141
146. Гришин А.М., Голованов А.Н., Русаков С.В. Об испарении свободной и связанной воды с лесным горючим материалом воды в изотермических условиях, «Инженерно-физический журнал» 2003, том 76, №5, с.175-180
147. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена, М.: Высшая школа 1967, 303 с.
148. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах, Л.: Энергоатомиздат 1991, 248 с.
149. Дундич Е.И., Константинов В.Ф., Реусова В.А. Лабораторный практикум по строительной физике ограждающих конструкций зданий, Изд-во Харьковского университета 1963, 192 с.
150. Евсеева Л.Е., Танаева С.А. Влияние пропитки на тепловые свойства теплоизоляционных материалов, «Инженерно-физический журнал» 2004, том 75, №2, с.99-101
151. Зверева Н.А., Вальцифер В.А. Компьютерное моделирование структуры дисперсных систем методом частиц, «Инженерно-физический журнал» 2002, том 75, №2, с.42-47
152. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача, М.-Л.: Энергия 1965, 424 с.
153. Комплекс программ для решения задач строительной теплофизики (на языке алгол-60), Отраслевой фонд алгоритмов и программ, М.: Гипротис 1970, 52 с.
154. Коновалов В.И., Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Колиух А.Н. Методы решения задач тепломассопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде. Тамбов. Изд-во ТГТУ 2005
155. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд-во «Наука» Сибирское отделение, Новосибирск 1970, 659 с.
156. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М. 1972, 344 с.

157. Леденев В.И., Матвеева И.В. Физико-технические основы эксплуатации наружных кирпичных стен гражданских зданий, Тамбов, Изд-во ТГТУ 2005, 127 стр.
158. Леонова В.Ф. Термодинаміка. М.: Высшая школа 1968, 158 с.
159. Литвин А.М. Теоретические основы теплотехники. М.: Энергия 1969, 328 с.
160. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. 1973, 847 с.
161. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.. Энергия 1978, 480 с.
162. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: ТЭН 1963, 535 с.
163. Методы расчёта задач тепломассопереноса, М.: Энергоатомиздат 1984, 414 с.
164. Можаяев А.П. Хаотические гомогенные пористые среды. 2. теория дисперсионной турбулентности: основные положения, «Инженерно-физический журнал» 2002, том 75, №2, с.85-94
165. Можаяев А.П. Хаотические гомогенные пористые среды. 4. Теплообмен в ячейке, «Инженерно-физический журнал» 2004, том 77, №1, с.69-76
166. Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. Верификация модели расчета сопряженного тепло- и влагопереноса при увлажнении газобетона. Известия Вузов. Строительство 2008. – № 1. – с. 104–109
167. Объедков В.А., Езерский В.А., Никитин В.И. Сорбция капиллярно-пористых материалов, содержащих хлористые соли//Исследования в области теплопередачи в промышленных зданиях: Сб. науч. трудов ЦНИИ-Промзданий. — М.: ЦНИИ-Промзданий 1982. — с. 85 — 92
168. Оробченко П.А., Пастернак С.Я. Пінобетон у сучасних стінових конструкціях «Будівельні матеріали» 2004, №1, с. 31-33
169. Романенко П.Н. Гидродинамика и тепломассообмен в пограничном слое (справочник), М.: Энергия 1974, 463 с.
170. Романенко П.Н. Тепломассообмен и трение при градиентном течении жидкостей. М. 1971, 568 с.
171. Садыков Р.А. Расчет теплотехнических характеристик ограждающих конструкций с учетом термодиффузии и фильтрации влаги. Материалы международной научно-технической конференции

- «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», Москва 2005
172. Твардовский А.В., Яковлев В.Ю. Моделирование ад- и абсорбционных процессов на основе феноменологической термодинамики, «Инженерно-физический журнал» 2002, том 75, №3, с.122-127
173. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая Школа 1979, 495 с.
174. Теплопроводность и молекулярная диффузия. Учебное пособие, Л.: ЛТИХП 1982, 84 с.
175. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха, М.: Стройиздат 1968, 144 с.
176. Фаренюк Г.Г., Трохименко М.О. Удосконалення нормативної бази ефективних огорожувальних конструкцій, «Будівництво України» 2003, №8, с. 32-35
177. Федяев А.А., Федяева В.Н., Видин Ю.В. Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 1 (2008) с. 68-75
178. Хмелюк К.Д., Дужкин Н.Н. Теплопередача в новых конструкциях ограждающих частей зданий, Киев, Госстройиздат УССР 1964, 86 с.
179. Хуторной, А.Н. Теплозащитные свойства неоднородных наружных стен зданий: монография /А.Н. Хуторной, Н.А. Цветков, А.Я. Кузин. – Томск : Изд-во ТГАСУ 2006. – 287 с.
180. Шагапов В.Ш., Насырова Л.А., Потапов А.А., Дмитриев В.Л. Тепловой удар под воздействием энергии излучения на пористую среду, частично заполненную газогидратом, «Инженерно-физический журнал» 2003, том 76, №5, с.47-53
181. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. 1969, 742 с.