



MONOGRAFIE KOMITETU INŻYNIERII ŚRODOWISKA

P O L S K A A K A D E M I A N A U K

vol. 133



ZASTOSOWANIE TECHNIKI REFLEKTOMETRII
W DOMENIE CZASU DO OCENY STANU
ZAWILGOCENIA PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

Zbigniew Suchorab

LUBLIN 2016

**POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

MONOGRAFIE

Nr 133

**ZASTOSOWANIE TECHNIKI
REFLEKTOMETRII W DOMENIE CZASU DO
OCENY STANU ZAWILGOCENIA PRZEGRÓD
BUDOWLANYCH**

Zbigniew Suchorab

Lublin 2016

Recenzja:

Prof. dr hab. inż. Tomasz Winnicki

Dr hab. inż. Agnieszka Montusiewicz, prof. PL

Komitet Redakcyjny:

prof. Anna Anielak	prof. Marian Mazur
prof. Kazimierz Banasik	prof. Korneliusz Miksch
prof. January Bień	dr hab. inż. Maciej Mrowiec
prof. Ryszard Błażejowski	prof. Hanna Obarska–Pempkowiak
prof. Michał Bodzek	dr hab. Artur Pawłowski
dr hab. inż. Marcin Chodak	prof. Lucjan Pawłowski
prof. Wojciech Dąbrowski	prof. Tadeusz Piecuch
prof. Marzenna Dudzińska	dr hab. inż. Bernard Quant
dr hab. inż. Katarzyna Ignatowicz	prof. Czesława Rosik–Dulewska
prof. Janusz Jeżowiecki	prof. Zofia Sadecka
dr hab. inż. Katarzyna Juda–Rezler	prof. Marek Sozański
dr hab. inż. Małgorzata Kabsch– Korbutowicz,	prof. Joanna Surmacz–Górska
dr hab. inż. Piotr Koszelnik	prof. Kazimierz Szymański
prof. Mirosław Krzemieniewski	prof. Józefa Wiater
dr hab. inż. Izabela Majchrzak–Kucęba,	prof. Tomasz Winnicki
	prof. Mirosław Żukowski

SPIS TREŚCI

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń	5
Wstęp	6
1. Cel i zakres pracy	11
2. Przegląd literatury	12
2.1. <i>Wpływ zawilgoconych przegród budowlanych na jakość powietrza wewnętrznego</i>	<i>12</i>
2.1.1. Wilgoć zawarta w powietrzu wewnętrznym	12
2.1.2. Woda zawarta w przegrodach budowlanych	13
2.1.3. Parametry charakteryzujące wilgotność materiałów budowlanych	15
2.1.4. Źródła wilgoci w przegrodach budowlanych	20
2.1.5. Transport wilgoci w przegrodach budowlanych	21
2.1.6. Wpływ wody zawartej w materiałach budowlanych na jakość przegród	26
2.1.7. Wpływ wody zawartej w materiałach budowlanych na jakość powietrza wewnętrznego i zdrowie ludzi	30
2.2. <i>Postawy funkcjonowania techniki TDR</i>	<i>34</i>
2.2.1. Przenikalność dielektryczna	36
2.2.2. Pomiary za pomocą techniki TDR	40
2.2.3. Charakterystyki dielektryczne ośrodków porowatych	46
2.2.4. Kalibracja urządzeń TDR do pomiarów wilgotności ośrodków porowatych	57
2.2.5. Zastosowanie techniki TDR w badaniach parametrów środowiskowych	58
2.3. <i>Badania parametrów materiałów budowlanych za pomocą techniki TDR.....</i>	<i>61</i>
2.4. <i>Koncepcja sondy powierzchniowej</i>	<i>62</i>
3. Część badawcza	65
3.1. <i>Charakterystyka prototypowych sond</i>	<i>65</i>
3.1.1. Sonda powierzchniowa B1	65
3.1.2. Sonda powierzchniowa B2	67
3.1.3. Sonda powierzchniowa B3	69
3.1.4. Sonda powierzchniowa B4	70
3.1.5. Sonda powierzchniowa C	72
3.1.6. Zbiorcza charakterystyka sond pomiarowych	73
3.2. <i>Badania zasięgu prototypowych sond powierzchniowych</i>	<i>74</i>
3.2.1. Metodyka pomiaru	74
3.2.2. Opis eksperymentu	75
3.2.3. Wyniki badań	76
3.2.4. Analiza wyników	78
3.2.5. Dyskusja wyników	80

3.3. <i>Badania kalibracyjne</i>	81
3.3.1. <i>Metodyka pomiaru</i>	83
3.3.1.1. <i>Opis przyjętej metodyki badawczej</i>	83
3.3.1.2. <i>Model regresji</i>	83
3.3.1.3. <i>Analiza niepewności pomiaru</i>	84
3.3.2. <i>Wyniki badań</i>	86
3.3.2.1. <i>Wyniki badań kalibracyjnych sondy B1</i>	86
3.3.2.2. <i>Wyniki badań kalibracyjnych sondy B2</i>	93
3.3.2.3. <i>Wyniki badań kalibracyjnych sondy B3</i>	101
3.3.2.4. <i>Wyniki badań kalibracyjnych sondy B4</i>	108
3.3.2.5. <i>Wyniki badań kalibracyjnych sondy C</i>	114
3.3.3. <i>Dyskusja wyników</i>	119
3.4. <i>Badania laboratoryjne</i>	125
3.4.1. <i>Metodyka pomiaru</i>	126
3.4.2. <i>Badania podciągania kapilarnego przez bloczek betonu komórkowego za pomocą czujników powierzchniowych</i>	130
3.4.3. <i>Badania podciągania kapilarnego przez ściankę z cegły ceramicznej pełnej za pomocą czujników powierzchniowych</i>	137
3.4.4. <i>Badania podciągania kapilarnego przez ściankę z cegły silikatowej za pomocą czujników powierzchniowych</i>	139
3.4.5. <i>Badania monitoringowe podciągania kapilarnego przez autoklawizowany silikat wapienny za pomocą sond powierzchniowych typu C</i>	141
3.4.6. <i>Badania monitoringowe podciągania kapilarnego przez ściankę z cegły ceramicznej pełnej za pomocą sond powierzchniowych typu C</i>	144
3.4.7. <i>Badania monitoringowe podciągania kapilarnego w ściance z cegły silikatowej za pomocą sond powierzchniowych typu C</i>	146
3.4.8. <i>Dyskusja wyników</i>	148
3.5. <i>Badania terenowe</i>	154
3.5.1. <i>Metodyka pomiaru</i>	154
3.5.2. <i>Badanie przegrody zewnętrznej budynku</i>	155
3.5.3. <i>Badanie wilgotności ścianki kominowej z kanałami wentylacyjnymi</i>	158
3.5.4. <i>Dyskusja wyników</i>	161
4. Podsumowanie i wnioski końcowe	165
5. Bibliografia	168

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

- BNC – złącze do łączenia przewodów koncentrycznych,
EK – współczynnik energii końcowej,
EP – współczynnik energii pierwotnej,
EPBD – dyrektywa o efektywności energetycznej budynków,
FDT – technika pomiaru wilgotności w domenie częstotliwości,
FOM – przenośny miernik TDR,
FP – sonda terenowa TDR,
HVAC – systemy ogrzewania wentylacji i klimatyzacji,
L – długość,
LOM – laboratoryjny miernik TDR,
LP – sonda laboratoryjna TDR,
MVOC – mikrobiologiczne lotne związki organiczne,
NIR – najmniejsza istotna różnica,
OZE – odnawialne źródła energii,
PCW – polichlorek winylu,
POM – polioksymetylen, poliacetal, ertacetal,
RH – wilgotność względna powietrza,
RMSE – pierwiastek średniego błędu kwadratowego,
RSE – standardowy błąd estymacji,
SBS – zespół chorego budynku,
t – czas,
T – temperatura,
TDR – reflektometria w domenie czasu,
U – współczynnik przenikania ciepła,
U – rozszerzona niepewność pomiarowa,
 u_c – całkowita niepewność pomiarowa,
V – objętość,
V – prędkość propagacji impulsu elektromagnetycznego,
VOC – lotne związki organiczne,
w – wilgotność masowa, masowa zawartość wilgoci,
 ε – przenikalność dielektryczna,
 θ – wilgotność objętościowa, objętościowa zawartość wilgoci,
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła,
 ρ – gęstość.

Wstęp

W inżynierii środowiska do najważniejszych problemów wymagających rozwiązania należy zapewnienie użytkownikom dostępu do dobrej jakości wody, powietrza, żywności i jednocześnie zrównoważonego wykorzystania surowców, w tym surowców energetycznych. Ma to szczególne znaczenie przy kształtowaniu środowiska wewnętrznego, czyli środowiska w pomieszczeniach użytkowanych przez ludzi, zarówno w obiektach mieszkalnych, jak też w budynkach użyteczności publicznej. W pomieszczeniach człowiek spędza znacznie więcej czasu niż na zewnątrz, dlatego należy zapewnić im odpowiedni mikroklimat i jakość powietrza, stosując systemy ogrzewania lub coraz częściej – wentylacji mechanicznej i klimatyzacji. Zagadnienie zużycia energii na cele bytowe znajduje się w centrum uwagi badaczy, projektantów i eksploatorów.

Prognozowany wzrost cen paliw, a także obowiązujący trend w kierunku rozwoju technik bazujących na odnawialnych źródłach energii (OZE) mają znaczący wpływ na rozwój budownictwa mieszkalnego i wymagają od inżynierów dbałości o wysoką jakość osłon zewnętrznych budynków. Rządy krajów członkowskich Unii Europejskiej (UE) zobowiązane są do wdrażania coraz nowych obostrzeń w zakresie ochrony cieplnej budynków. Pierwszym dokumentem o zasięgu ogólnoeuropejskim, stymulującym poprawę parametrów energetycznych budynków była dyrektywa EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive* (2002/91/EC), w której zobligowano kraje członkowskie UE do wprowadzania systemu oceny parametrów energetycznych budynków. Odpowiedzią polskiego prawodawstwa było *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej* (Dz.U. 2008 nr 201 poz. 1240), w rezultacie którego wprowadzono w Polsce obowiązek certyfikacji energetycznej budynków i określanie ich parametrów energetycznych za pomocą dwóch wielkości EK i EP, nazywanych odpowiednio współczynnikami energii końcowej i pierwotnej. 19 maja 2010 r. dyrektywa EPBD została znowelizowana, zastąpiła ją *Dyrektywa 2010/31/EU – EPBD Recast*, która zobowiązuje kraje członkowskie UE by od 31 grudnia 2020 roku wszystkie nowo powstające budynki były obiektami „o niemal zerowym zużyciu energii” (oryginalna angielska pisownia „nearly zero-energybuildings”). Duże znaczenie w tym zakresie przypisuje się również doprowadzeniu istniejących

obiektów do stanu umożliwiającego ich eksploatację przy niewielkim oddziaływaniu na środowisko. *Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r., zmieniające Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (Dz.U. 2013 poz. 926) wprowadza obostrzenia w zakresie wskaźnika energii pierwotnej EP, który stopniowo będzie zmniejszany, aby w dniu 1 stycznia 2021 r. przyjąć wartość 70 kWh/(m²·rok) w przypadku budynków jednorodzinnych i 65 kWh/(m²·rok) w przypadku budynków wielorodzinnych.

W celu obniżenia energochłonności budynków i zmniejszenia ich oddziaływania na środowisko stosuje się szereg zabiegów mających na celu poprawę ich wydajności energetycznej. Oszczędności energetyczne można osiągnąć przez nowoczesne, wydajne systemy wentylacji i klimatyzacji (hybrydowe, z odzyskiem ciepła), wykorzystanie odnawialnych źródeł energii albo odpowiednie przegrody budowlane, szczególnie zewnętrzne.

O ile wspomniany wskaźnik energii pierwotnej jest parametrem pozwalającym na ogólną ocenę efektywności energetycznej budynku, o tyle do oceny jakości przegród budowlanych stosowany jest współczynnik przenikania ciepła „U”, którego wartość charakteryzuje ich izolacyjność cieplną. Należy zaznaczyć, iż na przestrzeni ostatnich dekad wymagania w zakresie wartości współczynnika „U” były sukcesywnie zaostrzane. Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r.* w odniesieniu do ścian zewnętrznych wartość maksymalna wynosi obecnie 0,25 W/(m²·K), zaś w przyszłych latach będzie stopniowo zmniejszana, by w roku 2017 przyjąć wartość 0,23, a w styczniu 2021 r. maksymalnie 0,20 W/(m²·K).

Wartość współczynnika przenikania ciepła „U” przegrody budowlanej zasadniczo zależy od dwóch czynników – współczynnika przewodzenia ciepła λ , charakterystycznego dla zastosowanych materiałów oraz grubości przegrody. Należy zaznaczyć, iż wartość współczynnika przewodzenia ciepła nie jest parametrem stałym w cyklu życia budynku, zależy ona od wielu czynników, przy czym wartości deklarowane przez producentów często są zaniżane w celu wykazania wyższej jakości produktu. Badania laboratoryjne pod kątem oznaczenia współczynnika λ prowadzone są z zastosowaniem materiałów o niskiej wilgotności, natomiast stan taki nie zawsze występuje w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Woda zawarta w porowatych strukturach większości dostępnych materiałów przyczynia się do podwyższenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła (Gawin i in., 2000; Williams, 2002; Suchorab i in., 2010a; Su-

chorab i in., 2011a), a tym samym do spadku oporu cieplnego przegrody i w rezultacie do zwiększonych strat ciepła. Wpływ wilgoci na przewodność cieplną materiałów budowlanych uwzględniany był już w wymaganiach sprzed kilku dekad. Warto w tym miejscu przypomnieć dawną normę PN-82-/B-02020 „Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia”, w której sugerowano, aby przy obliczeniach termicznych rozpatrywać wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału w warunkach suchych oraz wilgotnych.

Należy podkreślić, że zjawisko zawilgocenia przegród budowlanych jest powszechne w klimacie umiarkowanym, właściwym dla Polski. Wynika ono z normalnego funkcjonowania budynków wykonanych w technologii tradycyjnej, która uwzględnia transport wody wydzielanej wewnątrz pomieszczeń na zewnątrz przez porowatą strukturę materiałów budowlanych. Transport ten warunkowany jest zastosowaniem właściwego układu warstw w przegrodzie budowlanej, cechującego się większą izolacyjnością i dyfuzyjnością pary wodnej zewnętrznych warstw, natomiast mniejszą izolacyjnością i mniejszą dyfuzyjnością warstw wewnętrznych. W tym miejscu należy zauważyć, iż obecne trendy, popularyzowane między innymi przez Polski Instytut Budownictwa Pasywnego i Energii Odnawialnej imienia Günтера Schlagowskiego Sp. z o.o. (www.pibp.pl) – propagują budownictwo niskoenergochłonne i pasywne, charakteryzujące się szczelną skorupą budynku, co w ocenie autora pracy może również, oczywiście w sytuacjach awaryjnych, prowadzić do problemów eksploatacyjnych związanych z migracją wody wewnątrz struktur materiałów budowlanych przy jednoczesnym braku możliwości jej odparowania.

Jednym ze źródeł wilgoci w budynkach są naturalne procesy dyfuzji pary wodnej z wnętrza na zewnątrz. Przy niewłaściwym układzie warstw albo defektach wynikających z niedokładnego wykonawstwa, może zachodzić proces kondensacji pary wodnej wewnątrz struktury przegrody, który wpływa na pogorszenie właściwości izolacyjnych przegród, prowadzi również do degradacji mechanicznej konstrukcji. Do innych źródeł zawilgocenia przegród zalicza się podciąganie kapilarne wód gruntowych, zwłaszcza przy braku lub wadach izolacji przeciwwilgociowych lub przeciwwodnych, opady deszczu w przypadku niewłaściwej obróbki dekarzkiej i awarie instalacji sanitarnych. Ostatnimi czasy, ze względu na niewłaściwie prowadzoną gospodarkę hydrologiczną, częstą przyczyną zawilgocenia murów budynków są wody powodziowe. Prowadzi to do poważnych szkód w infrastrukturze budowlanej. Są to tak zwane skutki popowodziowe, związane głównie z wodą długo utrzymującą się wewnątrz przegród

budowlanych, co daje rezultaty w postaci niekorzystnych procesów chemicznych, biologicznych i biochemicznych (Książek, 2010; Książek, 2011).

Problem zawilgocenia budynków to nie tylko zagrożenia związane z obniżeniem charakterystyk energetycznych budynków ale również przyczyna destrukcji wewnętrznej struktury materiałów budowlanych. Woda zawarta w przegrodach budowlanych negatywnie wpływa na ich izolacyjność cieplną, co w następstwie prowadzi do obniżenia temperatury po wewnętrznej stronie przegrody. Ma to istotny wpływ na tak zwaną średnią temperaturę promieniowania. Badania fizjologiczne (Śliwowski, 1982) potwierdzają, że temperatura odczuwalna zależy od średniej temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz temperatury otaczających powierzchni. Najkorzystniejsze są sytuacje, w których różnica pomiędzy temperaturą powietrza i poszczególnych przegród nie przekracza 3°C. Współczesne rozwiązania inżynierskie w postaci systemów HVAC (ang. Heating, Ventilation and Air Conditioning) umożliwiają utrzymanie temperatury powietrza wewnętrznego na relatywnie stałym, pożądanym poziomie. Inaczej wygląda kwestia temperatury na wewnętrznej powierzchni przegród budowlanych, która zgodnie ze współczesną technologią budowlaną, może być jedynie zapewniona przez właściwą konstrukcję osłon zewnętrznych i prawidłową ich eksploatację, również od strony wilgotnościowej.

Woda zawarta wewnątrz porów materiałów budowlanych przyczynia się do rozwoju mikroorganizmów będących alergenami lub generujących w procesach metabolicznych alergeny chemiczne, tym samym obniża jakość powietrza wewnętrznego. Sprzyja także rozwojowi grzybów pleśniowych (Bogacka, Matkowski, 2001; Dyląg, Bień, 2006; Piotrowska, Żakowska, 2011; Żukiewicz-Sobczak i in., 2012), które korzystają z substratów odżywczych zawartych w drewnie budowlanym, murach, tynkach itp. Do najczęściej spotykanych w mieszkaniach rodzajów grzybów zalicza się *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Aureobasidium* i *Cladosporium*. Porażenie biologiczne przegród, a tym samym pomieszczeń wewnętrznych, jest uważane za jedną przyczynę prowadzących do syndromu chorego budynku (ang. SBS – Sick Building Syndrome), którego przejawami są reakcje „neurotoksyczne” wśród mieszkańców. Należą do nich ból głowy, apatia, spadek koncentracji, zwiększona skłonność do przeziębienia, a nawet w skrajnych przypadkach zagrożenie chorobami nowotworowymi (Bogacka, Matkowski, 2001). Powyższe problemy wywołane są w znacznej mierze produktami metabolizmu grzybów. Są to tak zwane mikrobiologiczne lotne związki organiczne (ang. MVOC – Microbial Volatile Organic

Compounds). Ponadto grzyby wydzielają substancje zapachowe takie jak heksanol, cykloheksan, benzen z pochodnymi, przechodzące do powietrza w postaci bioaerozolu.

Problem zawilgocenia przegród budowlanych jest aktualny, bezpośrednio powiązany z funkcjonowaniem obiektów budowlanych i ma duży wpływ na środowisko wewnętrzne. Z tego względu dużą rolę wydaje się odgrywać rozwój technik detekcji wilgoci w przegrodach, opracowywanie nowych metod oraz udoskonalanie i adaptacja istniejących. Należy podkreślić, że metodami pozwalającymi na najdokładniejsze określenie zawartości wody w przegrodach budowlanych są metody laboratoryjne, polegające na poborze próbki z przegrody, a następnie na jej zważeniu i wysuszeniu, dzięki czemu istnieje możliwość bezpośredniego, dokładnego, wagowego określenia ilości wody zawartej w przegrodzie. Techniki te jednak są w wielu przypadkach nieprzydatne ze względu na konieczność poboru próby metodą wiercenia oraz długi czas oczekiwania na wynik. Dobrą alternatywę stanowią techniki pośrednie, które umożliwiają szybkie pomiary bez naruszenia struktury przegrody i przy zachowaniu dużej precyzji pomiaru.

Wśród technik detekcji wilgoci istotną rolę odgrywa technika TDR (ang. Time Domain Reflectometry), co w wolnym tłumaczeniu należy rozumieć jako reflektometria w domenie czasu. Jest to technika elektryczna, działająca na zasadzie reflektometrycznego pomiaru parametrów dielektrycznych ośrodka. Technika ta przez szereg lat znalazła zastosowanie w pomiarach wilgotności ośrodków gruntowych. W ciągu ostatnich kilkunastu lat podjęto wiele udanych prób wykorzystania jej potencjału pomiarowego do oznaczania wilgotności materiałów i przegród budowlanych (Hansen, Hansen, 2002a; Plagge i in., 2005; Fiala i in., 2006; Pavlík i in., 2006a; Pavlík, Cerný, 2004; Pavlík, Černý, 2005). Ograniczeniem był jednak zespół problemów związanych z instalacją czujników w twardej strukturze materiału oraz brak wypracowanych metod kalibracji sensorów pod kątem pomiarów w materiałach budowlanych.

W niniejszej pracy podjęto problematykę pomiarów wilgotności w materiałach i przegrodach budowlanych. Zaproponowano metodykę pomiaru z użyciem czujników autorskiej konstrukcji, dzięki czemu możliwe stało się prowadzenie pomiarów wilgotności murów w sposób bezinwazyjny i szybki, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak też *in-situ*.

1. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest ocena możliwości zastosowania nieinwazyjnej techniki reflektometrii w domenie czasu wykorzystującej autorskie sondy prototypowe do diagnozowania stanu wilgotnościowego przegród budowlanych w aspekcie zapewnienia wymaganej jakości powietrza wewnętrznego.

Przeprowadzone badania obejmowały:

- opracowanie prototypowych rozwiązań sond umożliwiających prowadzenie badań wilgotności w twardych ośrodkach porowatych takich jak materiały budowlane,
- wykonanie kalibracji poszczególnych czujników dla materiałów powszechnie stosowanych we współczesnym budownictwie,
- wykonanie pomiarów wilgotności przegród budowlanych za pomocą prototypowych, autorskich czujników w warunkach laboratoryjnych,
- wykonanie pomiarów wilgotności przegród budowlanych w warunkach *in-situ*.

Przeprowadzone badania zmierzały do wykazania że:

- technika pomiarowa reflektometrii w domenie czasu może być wykorzystywana w badaniach środowiskowych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak też terenowych,
- sondy powierzchniowe pozwalają na szybką ocenę zawilgocenia przegród budowlanych bez konieczności naruszania ich struktury, co przyczynia się do minimalizacji niebezpieczeństwa wystąpienia syndromu chorego budynku.

2. Przegląd literatury

2.1. Wpływ zawilgoconych przegród budowlanych na jakość powietrza wewnętrznego

2.1.1. Wilgoć zawarta w powietrzu wewnętrznym

Problem zawilgocenia dotyczący infrastruktury budowlanej powinien być rozpatrywany dwójako, w aspekcie wilgotności powietrza wewnętrznego oraz wilgotności przegród budowlanych otaczających pomieszczenie.

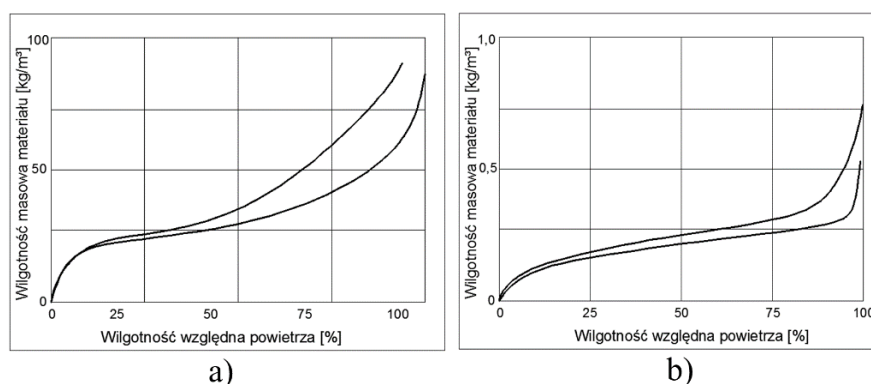
Z uwagi na bezpośredni wpływ na mieszkańców, a także na funkcjonowanie konstrukcji budynku, istotnym parametrem jest wilgotność powietrza. Stanowi ją para wodna, będąca jednym z wielu gazów występujących w atmosferze. Zawartość pary wodnej uzależniona jest od liczby osób przebywających w pomieszczeniu, procesów technologicznych, oddziaływania atmosfery i innych czynników (Pełech, 2008; Raczkowski i in., 2011). Wilgotność powietrza jest parametrem złożonym i w zależności od analizowanego problemu powinna być rozpatrywana w różny sposób. Z tego powodu w inżynierii środowiska wewnętrznego najczęściej operuje się czterema podstawowymi parametrami (Raczkowski i in. 2011; Jones, 2005). Są to wilgotność bezwzględna, wilgotność względna, zawartość wilgoci oraz stopień nasycenia. Wilgotność bezwzględna, będąca masą pary wodnej zawartej w 1 m³ powietrza wilgotnego, wyrażona jest w [kg/m³]. Wilgotność względna, którą stanowi stosunek wilgotności bezwzględnej powietrza do jego maksymalnej wilgotności bezwzględnej (powietrza nasyconego) w danej temperaturze, to parametr wyrażony w [%]. Należy zaznaczyć, że odgrywa on istotną rolę w ocenie jakości środowiska wewnętrznego i jego oddziaływaniu na organizm człowieka. Kolejnym parametrem opisującym stan wilgotnościowy powietrza jest zawartość wilgoci, którą stanowi stosunek masy pary wodnej zawartej w powietrzu do masy powietrza suchego. Jest to wielkość wyrażona w [kg_{H₂O}/kg_{ps}]. W odróżnieniu od wilgotności względnej, parametr ten określa ilościowo zawartość pary wodnej w powietrzu suchym, dlatego jest często wykorzystywany w technice klimatyzacyjnej do projektowania i doboru urządzeń nawilżających i osuszających powietrze (Jones, 2005). Ostatnim z parametrów opisujących powietrze wilgotne jest stopień nasycenia, będący stosunkiem zawartości wilgoci do maksymalnej zawartości wilgoci w danej temperaturze powietrza. Jest to wielkość bezwymiarowa.

2.1.2. Woda zawarta w przegrodach budowlanych

Woda zawarta w przegrodach budowlanych występuje w kilku postaciach, tj. jako woda związana chemicznie, woda związana fizycznie (siłami sorpcji), swobodna para wodna oraz woda wolna (Kubik, Wyrwał, 2005; Korjenic, Bednar, 2012; Litavcova i in., 2014).

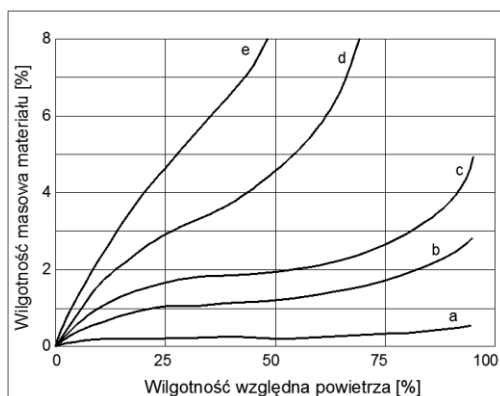
Woda związana chemicznie jest formą trwałą, nie wpływającą na ogólną wilgotność ośrodka, dlatego zazwyczaj w rozważaniach wilgotnościowych jest pomijana. Ma to również miejsce w niniejszym opracowaniu. Należy jednak zaznaczyć, że ten rodzaj wilgoci jest bardzo powszechny w budownictwie wykończeniowym, ponieważ jednym z najczęściej stosowanych materiałów budowlanych jest gips, będący hydratami, tj. uwodnionym siarczanem wapnia o wzorze $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Stefańczyk, 2005).

Inny rodzaj stanowi woda związana fizycznie. Jej obecność w materiałach budowlanych wiąże się z ich higroskopijnymi i kapilarnymi właściwościami. W odróżnieniu od wody związanej chemicznie, może ona ulegać transportowi i dlatego jest rozpatrywana w kategoriach wilgotności ośrodków porowatych (Voutilainen, 2005). W ocenie parametrów wilgotnościowych materiałów budowlanych ważną rolę odgrywa pojęcie higroskopijności, które określa, w jaki sposób materiał pochłania wodę z atmosfery bądź przekazuje ją do niej. Wymiana wilgoci pomiędzy ośrodkiem porowatym a powietrzem zachodzi wskutek różnic wilgotności względnej powietrza oraz wilgotności względnej materiału.



Rys. 2.1.1. Izotermę sorpcji dla betonu o klasie wytrzymałości K25 (a) oraz wełny mineralnej o gęstości 18 kg/m^3 (b) w temperaturze $+20^\circ\text{C}$ (opracowanie własne na podst. Voutilainen, 2005)

Do opisu zjawiska sorpcji, zgodnie z PN-EN ISO 12571:2013-12, stosowane są izotermy sorpcji (rysunki 2.1.1 oraz 2.1.2), które definiują zależność pomiędzy wilgotnością materiału w równowadze ze środowiskiem, a wilgotnością względną powietrza w określonej temperaturze.



Rys. 2.1.2. Izotermy sorpcji dla wybranych materiałów budowlanych w temperaturze +20°C, a) cegła ceramiczna pełna, b) żużłobeton, c) gazobeton, beton komórkowy, d) płyty wiórowo-cementowe, e) drewno (oprac. własne na podst. Parczewski, 1977)

Sorpcja jest procesem złożonym, zachodzącym w różny sposób w zależności od porowatości ośrodka. Ma na nią wpływ wiele czynników – między innymi rozmiar, rozkład, a nawet kształt porów. Z tego powodu izotermy sorpcji dla różnych materiałów mają różny przebieg. Należy zaznaczyć, że w obrębie tego samego materiału proces sorpcji może zachodzić różnorodnie z uwagi na strukturę porów, która wpływa na odmienny przebieg absorpcji i desorpcji. Zjawisko to nazywa się histerezą sorpcji (Ościk, 1973) i jest przedstawione na rysunku 2.1.1. w postaci dwóch krzywych o różnym przebiegu.

Woda występująca w materiałach budowlanych pod postacią pary wodnej ma również znaczenie w ocenie wilgotności ośrodka. Należy jednak zaznaczyć, że wskutek dużej mobilności może ona swobodnie przemieszczać się w otwartej, porowatej strukturze materiałów budowlanych dzięki mechanizmowi dyfuzyjnemu. Może również podlegać sorpcji wskutek zmian wilgotności względnej powietrza w porach. Z tego powodu współczynniki dyfuzji i paroprzepuszczalności są ważnymi charakterystykami materiału budowlanego jako ośrodka porowatego (Litavcova i in., 2014).

Największe znaczenie w ocenie stanu wilgotnościowego przegród budowlanych, wpływającego na jakość środowiska wewnętrznego, ma tak zwana woda wolna. Występuje ona wewnątrz porów i kapilar przy względnej wilgotności powietrza wewnątrz porów w zakresie 98–100%. Jej obecność jest najczęściej spowodowana procesami kondensacji pary wodnej, podciąganiem kapilarnym, awariami instalacji sanitarnych i wadami obróbki dekarskiej.

2.1.3. Parametry charakteryzujące wilgotność materiałów budowlanych

Wilgotność ośrodka porowatego, do którego można zaliczyć większość materiałów budowlanych, wyrażona jest w różny sposób. W pomiarach z wykorzystaniem techniki reflektometrycznej, na których skupiono się w niniejszym opracowaniu, najczęściej stosowanym parametrem jest wilgotność objętościowa (O'Connor, Dowding, 1999) zwana inaczej objętościową zawartością wilgoci, wyrażoną w $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ lub w $[\%_{\text{vol}}]$. Według normy PN-EN ISO 12571:2013-12 objętościowa zawartość wilgoci jest to objętość zdolnej do wyparowania wody odniesiona do objętości suchego materiału. Wzór opisujący objętościową zawartość wilgoci jest następujący (O'Connor, Dowding, 1999):

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_{\text{tot}}} \quad (2.1.1)$$

gdzie: θ_v – objętościowa zawartość wilgoci $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$, V_w – objętość wody zdolnej do odparowania $[\text{cm}^3]$, V_{tot} – objętość całkowita próbki $[\text{cm}^3]$.

W fizyce budowlanej najczęściej stosowanym parametrem opisującym wilgotność ośrodka porowatego jest wilgotność masowa lub inaczej masowa zawartość wilgoci, wyrażona w $[\text{g}/\text{g}]$. Wartość ta często wyrażona jest również w procentach $\%_{\text{mass}}$. Według PN-EN ISO 12571:2013-12 jest to masa zdolnej do wyparowania wody odniesiona do masy suchego materiału i może być wyrażona wzorem (O'Connor, Dowding, 1999):

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.1.2)$$

gdzie: w – masowa zawartość wilgoci $[\text{g}/\text{g}]$, m_w – masa wody zdolnej do odparowania $[\text{g}]$, m_s – masa próbki wysuszonej do stałej masy $[\text{g}]$.

Istnieje możliwość przeliczenia wartości wilgotności masowej na wilgotność objętościową i odwrotnie. Służy do tego następująca formuła (O'Connor, Dowding, 1999; Najm i in., 2008):

$$w = \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \theta_v \quad (2.1.3)$$

gdzie: w – masowa zawartość wilgoci [g/g], θ_v – objętościowa zawartość wilgoci [cm^3/cm^3], ρ_w – gęstość wody [g/cm^3], $\rho_w = 1$ [g/cm^3], ρ_s – gęstość stałej masy [g/cm^3].

Należy jednak podkreślić, że powyższe przeliczenie jest uprawnione jedynie w sytuacji, kiedy znana jest gęstość badanego materiału w stanie suchym. Informację taką można uzyskać w drodze badań laboratoryjnych lub od producentów danego materiału. Trzeba również pamiętać, że ze względu na duże różnice gęstości materiałów, rozbieżności pomiędzy wilgotnością masową, a objętościową mogą być znaczące (Trochonowicz, 2010).

Poza wskaźnikami określającymi wilgotność materiału, do opisu stosuje się następujące parametry: gęstość, gęstość objętościową, szczelność, porowatość i maksymalną wilgotność ośrodka – nasiąkliwość wagową oraz nasiąkliwość objętościową (Stefańczyk, 2005). Są one pochodną budowy ośrodka porowatego i odgrywają istotną rolę w ocenie stopnia zawilgocenia przegrody budowlanej, stanowiąc wartość referencyjną, do której porównywana jest wilgotność zmierzona. W normie PN-EN 1936:2010 wyróżniono porowatość całkowitą p , stanowiącą objętość wszystkich porów (otwartych i zamkniętych) zawartych w próbce materiału w stosunku do objętości próbki. Z punktu widzenia pomiarów parametrów wilgotnościowych ważniejszą rolę odgrywa porowatość otwarta p_0 , którą według PN-EN 1936:2010 stanowi procentowy stosunek objętości porów otwartych do objętości danej próbki. Z reguły przyjmuje ona wartość mniejszą od porowatości całkowitej, ponieważ nie wszystkie pory w materiale porowatym są otwarte i nie zawsze woda oraz wilgotne powietrze mają do nich dostęp. Z tego powodu porowatość otwarta odgrywa ważniejszą rolę w ocenie parametrów materiałów budowlanych niż porowatość całkowita.

Kolejnym istotnym parametrem charakteryzującym ośrodek porowaty, w tym materiał budowlany, jest jego maksymalna wilgotność zwana nasiąkliwością. Jest to wartość wilgotności, którą osiąga materiał całkowicie nasycony wodą. Wyrażona jest w jednostkach wilgotności objętościowej lub masowej. Maksymalna wilgotność objętościowa przyjmuje najczęściej wartości nieznacznie mniejsze od porowatości otwartej, co jest spowodowane tym, że woda nie może

dostać się do porów zamkniętych lub jedynie nawilża ścianki porów o dużych średnicach (Kubik, Wyrwał, 2005). Parametr ten jest istotny w ocenie stopnia zawilgocenia materiału budowlanego, ponieważ w zależności od struktury materiału, jedne materiały mogą być bardziej nasiąkliwe, a inne mniej. Porównanie wartości z maksymalną wilgotnością pozwala na ocenę zawilgocenia danego ośrodka. W tabeli 2.1.1 przedstawiono podstawowe parametry wybranych materiałów budowlanych na podstawie źródeł literaturowych oraz danych od producentów.

Tabela 2.1.1. Podstawowe cechy wilgotnościowe wybranych materiałów budowlanych (opracowanie własne na podstawie źródeł literaturowych przedstawionych w tabeli)

L. p.	Nazwa materiału	Gęstość objętościowa	Maksymalna wilgotność objętościowa/masowa	Porowatość otwarta	Źródło
-	-	[kg/m ³]	[cm ³ /cm ³], [% _{mass}]	[cm ³ /cm ³]	-
1	Cegła Wienerberger	1786	0,32	0,35	Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik
2	Cegła ceramiczna pełna	1710–1724	0,25	0,30–0,33	Koronthalyova, 2011
3	Cegła ceramiczna	1790	-	0,35	Scheffler, Plagge, 2007
4	Cegła silikatowa	1814	0,33	0,34	Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik
5	Cegła silikatowa	1200–1700	15% _{mass}	-	Stefańczyk, 2005
6	Piaskowiec	1988–2096	0,19–0,20	0,21–0,25	Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik
7	Granit	2453	0,05	0,09	Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik
8	Beton komórkowy 400	392	0,70	0,87	Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik
9	Beton komórkowy 500	500–512	0,27–0,29	80	Koronthalyova, 2011
10	Autoklawizowany silikat wapienny	270	0,9	0,91	Scheffler, Plagge, 2007
11	Autoklawizowany silikat wapienny	230	-	0,87	Pavlík i in., 2012
12	Płyta gips-karton	595	0,6	0,65	Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik

Istotną informacją w ocenie zawilgocenia przegrody budowlanej jest wartość maksymalnej dopuszczalnej wilgotności dla danego materiału. Zwykle zależy ona od kilku czynników, między innymi od nasiąkliwości. W literaturze krajowej brak jest szczegółowych danych tego typu. Trochonowicz (2010), powołując się na nieobowiązującą normę PN-82/B-02020, przytacza stabelaryzowane informacje dla cegły ceramicznej, pustaków ceramicznych, cegły silikatowej oraz betonu komórkowego (tabela 2.1.2).

Tabela 2.1.2. Dopuszczalne wartości wilgotności wybranych materiałów budowlanych w zewnętrznych przegrodach (Trochonowicz, 2010 na podst. PN-82/B-02020)

Lp.	Nazwa materiału lub przegrody	Wilgotność przed zawilgoceniem	Dopuszczalny przyrost wilgotności
-	-	[%]	[%]
1	Ściana z cegły ceramicznej	1,5	1,5
2	Ściana z pustaków ceramicznych	1	2
3	Ściana z cegły silikatowej	3	2
4	Beton komórkowy	3	4

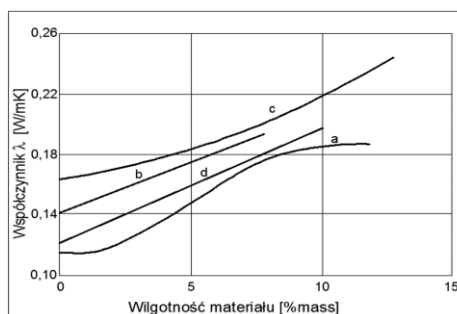
Więcej informacji w odniesieniu do murów ceglanych przedstawiono w literaturze przedmiotu (Adamowski, 2005; Hoła i in., 2009; Piotrowska, Żakowska, 2011). Podano tam przedziały wilgotności masowej oraz jakościową ocenę stanu przegrody (tabela 2.1.3).

Tabela 2.1.3. Stopnie zawilgocenia murów z cegły ceramicznej pełnej (wg Adamowski, 2005, Hoła i in., 2009; Piotrowska, Żakowska, 2011)

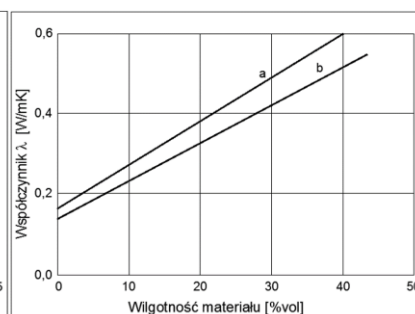
Stopień zawilgocenia muru ceglanego	Przedział wilgotności	Opis
-	[%]	-
I	0–3	Mury o dopuszczalnej wilgotności
II	3–5	Mury o podwyższonej wilgotności
III	5–8	Mury średnio wilgotne
IV	8–12	Mury mocno wilgotne
V	> 12	Mury mokre

Przy opisie właściwości wilgotnościowych materiałów budowlanych ważną rolę odgrywa ocena wpływu wilgotności materiału na współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]. Jest to podstawowy parametr w ocenie efektywności energetycznej budynków. Od jego wartości oraz konfiguracji warstw przegrody zależy w znacznej mierze współczynnik przewodzenia ciepła przegrody U [W/(m²·K)], którego wartość jest normowana przez zmianę do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków

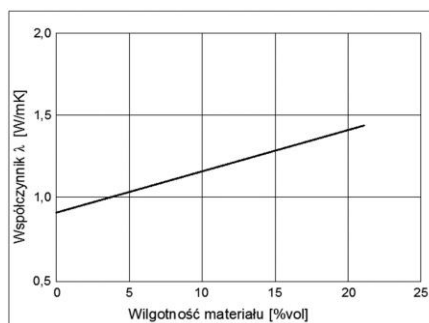
technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie w postaci *Rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (Dz.U. 2013 poz. 926). Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności ośrodka przedstawiono na rysunkach 2.1.3–2.1.6.



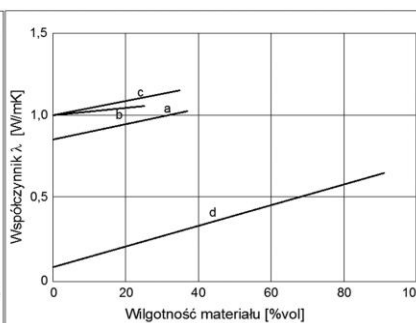
Rys. 2.1.3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ w zależności od wilgotności masowej ośrodka w betonie komórkowym. a) AAC400, b) AAC500, c) AAC600 wg Gawin i in., 2002, d) wg Williams, 2002



Rys. 2.1.4. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła λ w zależności od wilgotności objętościowej ośrodka w betonie komórkowym. a) AAC400, b) AAC600 (oprac. własne na podst. Suchorab i in., 2011a)



Rys 2.1.5. Zależność współczynnika λ od wilgotności – cegła ceramiczna pełna wg (Suchorab i in., 2010a)



Rys. 2.1.6. Zależność współczynnika λ od wilgotności wg TU Dresden, a) cegła ceramiczna 1900 (Wienerberger), b) cegła ceramiczna 2000, c) cegła silikatowa 1800, d) beton komórkowy 400

Z rysunków 2.1.3–2.1.6 wynika, że wraz ze wzrostem wilgotności wzrasta współczynnik przewodzenia ciepła λ , co w praktyce oznacza pogorszenie właściwości izolacyjnych przegrody. Jest to zjawisko niekorzystne z uwagi na jej parametry techniczne i izolacyjne. Uzasadnia to potrzebę detekcji wilgoci w przegrodach, w celu ustalenia przyczyn problemów eksploatacyjnych budynków dotkniętych zjawiskiem zawilgocenia i przeciwdziałania pogorszeniu jakości powietrza wewnętrznego.

2.1.4. Źródła wilgoci w przegrodach budowlanych

Budynki mieszkalne i obiektów użyteczności publicznej są stale narażone na zagrożenie wilgocią ze względu na ekspozycję na czynniki środowiskowe, takie jak opady atmosferyczne, zmiany pór roku oraz procesy zachodzące wewnątrz, związane z bytowaniem ludzi lub technologią w nich realizowaną. Jest to zazwyczaj wilgoć w postaci pary wodnej zgromadzonej wewnątrz porów materiałów budowlanych, ale również wilgoć higroskopijna i woda w postaci wolnej.

Źródła wilgoci w przegrodach budowlanych można podzielić na zewnętrzne i wewnętrzne (Voutilainen, 2005). Do źródeł zewnętrznych zaliczono wilgotność powietrza zewnętrznego, opady deszczu oraz wodę występującą w gruncie, oddziaływującą na niezabezpieczone fundamenty budynków, a następnie migrującą w głąb materiałów tworzących osłony zewnętrzne budynku.

Do źródeł wewnętrznych zaliczono natomiast procesy technologiczne oraz ludzi, zwierzęta i rośliny, które wskutek procesów metabolicznych emitują do powietrza wewnętrznego określone ilości wody.

Wilgotność powietrza wewnętrznego zależy od wilgotności powietrza zewnętrznego, ilości wilgoci generowanej wewnątrz pomieszczeń oraz stopnia wentylacji pomieszczeń wewnętrznych. Do ogólnego, długoterminowego szacowania wilgotności bezwzględnej [g/m^3] często stosowana jest uproszczona zależność (Voutilainen, 2005):

$$\rho_i = \rho_0 + \frac{G}{n \cdot V} \quad (2.1.4)$$

gdzie: ρ_i – wilgotność bezwzględna w pomieszczeniu [g/m^3], ρ_0 – wilgotność bezwzględna powietrza atmosferycznego [g/m^3], G – wilgoć wydzielana w pomieszczeniu [g/h], n – stopień wentylacji [$1/\text{h}$], V – ilość wymianianego powietrza [m^3].

Drugi człon wzoru (2.1.4) nazywany jest zyskiem wilgoci i przyjmuje następujące wartości (Voutilainen, 2005):

- 2 g/m^3 w pomieszczeniach biurowych,
- 3 g/m^3 w budynkach mieszkalnych,
- 4 g/m^3 w źle wentylowanych pomieszczeniach.

Z powyższych rozważań wynika, że jeśli wykluczyć stany podwyższonej wilgotności powietrza zewnętrznego spowodowane mgłą i opadami oraz możliwość uzdatniania powietrza w procesach klimatyzacji, wilgotność bezwzględna wewnątrz jest zawsze wyższa od wilgotności bezwzględnej powietrza zewnętrznego. To z kolei przekłada się na wyższe wartości wilgotności względnej, a tym samym na stopień zawilgocenia przegród związanych z dyfuzją pary wodnej.

Inne źródło zawilgocenia stanowią awarie instalacji sanitarnych, takie jak uszkodzenia rur wodociągowych zasilających obiekt w wodę bieżącą i uszkodzenia rur kanalizacyjnych (Chew, 2005). Coraz powszechniejszym zjawiskiem występującym we współczesnym mieszkalnictwie jest zawilgocenie osłon budowlanych wskutek niewłaściwie działającej wentylacji grawitacyjnej. Dotyczy to zawilgocenia ścian zewnętrznych w pobliżu ościeżnic okiennych z wbudowanymi zbyt szczelnymi oknami, nie zapewniającymi prawidłowej pracy wentylacji grawitacyjnej. W takich przypadkach para wodna zawarta w nadmiernych ilościach w powietrzu wewnętrznym dyfunduje do wnętrza przegród, a tam ze względu na niższą temperaturę ulega zjawisku kondensacji. Jest to zjawisko występujące powszechnie na ścianach kominowych, które nie są izolowane, więc ich powierzchnia ma niską temperaturę. Dodatkowo zjawisko to może być intensyfikowane przez odwrotny ciąg kominowy, spotykany w niewłaściwie wentylowanych pomieszczeniach o dużej szczelności skorupy zewnętrznej, w tym stolarki budowlanej.

2.1.5. Transport wilgoci w przegrodach budowlanych

Ze względu na to, że woda występuje w materiałach i przegrodach budowlanych pod różnymi, postaciami, a jej obecność jest warunkowana wieloma różnorodnymi czynnikami, może się ona przemieszczać wewnątrz struktur budowlanych. Mechanizmy tego transportu są skomplikowane. W przypadku pary wodnej transport realizowany jest w drodze dyfuzji oraz ruchu powietrza (konwekcji), natomiast dla wody wolnej główną przyczyną transportu jest grawitacja i siły kapilarne wynikające z porowatej struktury ośrodka (Joekar-Niasar, Hasanizadeh, 2011; Shargatov i in., 2015; Janssen i in., 2016).

Migracja wody wskutek konwekcji przebiega dzięki ruchom powietrza wywołanym różnicą ciśnień po przeciwnych stronach przegrody budowlanej. W ten sposób wilgotne powietrze może transportować parę wodną w głąb struktury (Chandra Mohan, Talukdar, 2010; Esfahani i in., 2015). Jest to zjawisko negatywne, szczególnie niekorzystne w okresie zimowym, gdy ciepłe, wilgotne powietrze przenoszone jest do chłodnych warstw przegrody, a wskutek jego ochłodzenia poniżej punktu rosy dochodzi do kondensacji pary wodnej.

Dyfuzja wynika z różnicy ciśnień parcjalnych pary wodnej po przeciwnych stronach struktury budowlanej oraz współczynnika dyfuzji materiałów, z których przegroda została wykonana (Korienic, Bednar, 2012; Litavcova i in., 2014). Zazwyczaj ciśnienie pary wodnej jest większe wewnątrz budynku, stąd wyrównywanie ciśnień cząstkowych zachodzi od wnętrza na zewnątrz. W przypadku budownictwa tradycyjnego jest to korzystne, gdyż umożliwia usuwanie wody zarówno ze struktur budowlanych, jak też z powietrza wewnętrznego. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że proces dyfuzji jest limitowany przez wodę wolną zawartą w przegrodzie oraz szczelność powłoki. Dlatego dyfuzja jest procesem charakterystycznym dla niskich wilgotności względnych powietrza wypełniającego pory materiału (Kubik, Wyrwał, 2005).

Dyfuzja pary wodnej przez warstwy przegród budowlanych może być opisana prawem Fick'a, które można wyrazić ogólnym wzorem (Lu, 2002):

$$\vec{q}_v = -D_v \nabla(P_v) \quad (2.1.5)$$

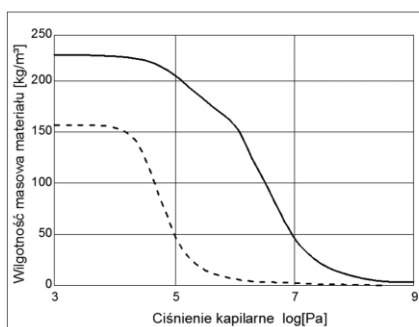
gdzie: q_v – strumień masy przenoszonej pary wodnej [kg/(m²·s)], D_v – współczynnik dyfuzji (proporcjonalności) [m²/s], P_v – ciśnienie parcjalne pary wodnej [Pa].

Dyfuzja w materiałach porowatych może mieć różny przebieg w zależności od wielkości porów materiału, co jest związane ze średnią drogą swobodną cząstek pary wodnej. W porach o promieniach większych od 1 μm występuje dyfuzja molekularna, zaś w porach mniejszych od 5 nm tak zwana dyfuzja Knudsena związana ze zderzeniami cząsteczek pary wodnej ze ściankami porów materiału (Kubik, Wyrwał, 2005).

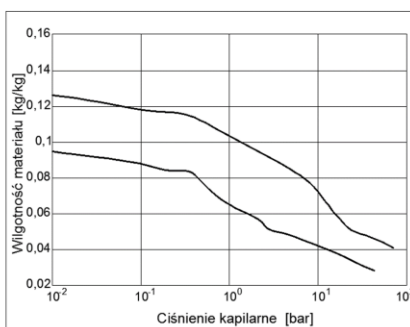
Transport wody wolnej wskutek grawitacji nie ma znaczącego wpływu na funkcjonowanie przegród budowlanych. Przebiega on głównie po powierzchniach przegród, ponieważ jego efekt wewnątrz materiału jest zazwyczaj kompensowany przez siły kapilarne porowatych materiałów budowlanych (Suchorab i in., 2010b; Suchorab, Barnat-Hunek, 2011a). W przypadku materiałów o niekorzystnych charakterystykach sorpcyjnych (na przykład hydrofobizowana wełna mineralna itp.) przepływ wody wolnej wskutek grawitacji może jednak dominować (Černý i in., 2001; Voutilainen, 2005).

Istotne znaczenie w ochronie budynków przed zawilgoceniem ma zjawisko podciągania kapilarnego wody wolnej. Zjawisko to występuje zazwyczaj w ośrodku porowatym o charakterze kapilarnym, typowym dla większości materiałów budowlanych spotykanych na rynku. Wskutek kontaktu materiału z wodą zachodzi proces absorpcji. Ruch kapilarny związany jest z potencjałem ciśnieniowym charakteryzującym każdy materiał porowaty. Potencjał ten wyrażony jest jako ujemna wartość ciśnienia wody. Wysoka wartość potencjału przyczynia się do transportu wody w górę, wbrew siłom grawitacji. Wartość potencjału ciśnieniowego zależy od struktury materiału, jego porowatości, wielkości i kształtu porów. W przypadku przegród budowlanych proces podciągania kapilarnego zachodzi w budynkach z niewłaściwie wykonaną poziomą lub rzadziej pionową izolacją przeciwwilgociową czy przeciwwodną, a także w budynkach z brakiem takiej izolacji (Suchorab i in., 2008; Barnat-Hunek i in., 2016).

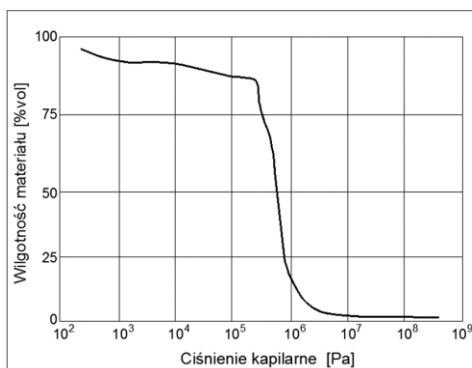
Powszechnie stosowanym sposobem parametryzacji ośrodków porowatych pod kątem właściwości kapilarnych jest krzywa retencji wodnej – krzywa pF (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Mallants i in., 1997), która uzależnia wielkość potencjału ciśnieniowego wody od wilgotności materiału. Przebieg krzywych zależy od wielu czynników – porowatości otwartej ośrodka, wielkości porów, dystrybucji porów, kształtu porów, maksymalnej wilgotności objętościowej itp. W związku z powyższym, każdy materiał może charakteryzować się innym zakresem wartości potencjału ciśnieniowego, a sam przebieg krzywej może przyjmować różne kształty, co przedstawiają charakterystyki pF wybranych materiałów budowlanych (rysunki 2.1.7–2.1.10).



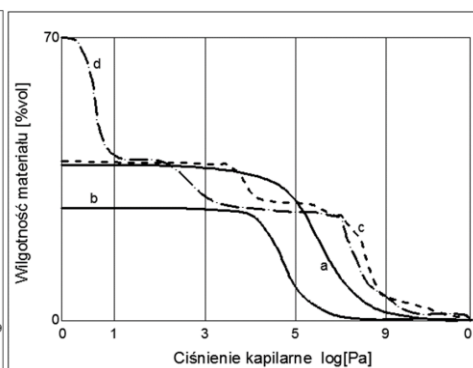
Rys. 2.1.7. Przebieg krzywych retencji wodnej a) linia ciągła – silikat wapienny, b) linia przerywana – cegła ceramiczna (oprac. własne na podst. Carmeliet, Roels, 2002)



Rys. 2.1.8. Krzywe retencji wodnej dla cegieł niewypalanych (oprac. wł. na podst. Hansen, Hansen, 2002a)



Rysunek 2.1.9. Przebieg krzywych retencji wodnych dla autoklawizowanego silikatu wapiennego (oprac. własne na podst. Koronthalyova, Matiasovsky, 2002).



Rys. 2.1.10. Przebieg krzywych retencji wodnych wg TU Dresden, a) cegła ceramiczna Wienerberger 1900, b) cegła ceramiczna 2060, c) cegła silikatowa 1800, d) beton komórkowy 400

Przebiegi krzywych retencji wodnej dla poszczególnych materiałów wyznaczone są doświadczalnie za pomocą aparatów ciśnieniowych z płytami ceramicznymi (ang. Pressure Plate Apparatus) (Richards, Ogata, 1961; Bittelli, Flury, 2009; Lins, 2009; Cresswell i in., 2008; Baker, Frydman, 2009; Scheffler, 2008) lub tensjometrów (Campbell, Campbell, 2005; Livingston, Topp, 2006). W ograniczonym zakresie charakterystyki retencjonowania wody mogą być również wyznaczone za pomocą sond psychrometrycznych (Kassem, 2005; Livingston, Topp, 2006; Reynolds, Topp, 2006; Globus, Neusypina, 2006; Guz i in., 2009; Guz i in., 2010; Guz i in., 2011).

Do matematycznego opisu krzywych retencji wodnej (pF) najczęściej stosowany jest model Mualem'a (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Shao, Horton, 1998; Ju, Kung, 1997) opisany następującym równaniem:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m} \quad (2.1.6)$$

gdzie: θ_r – zawartość wody rezydualnej (nie związanej siłami kapilarnymi, często pomijana) [cm^3/cm^3], θ_s – zawartość wody w stanie nasyconym [cm^3/cm^3], α – współczynnik proporcjonalności [m^{-1}], n , m – współczynniki kształtu wyznaczone empirycznie [-].

Transport w drodze sił kapilarnych opisany jest rozbudowanym równaniem Darcy (Zaradny, 1990) – równaniem Richards'a. Jest to równanie ruchu wody w stanie nienasyconym, do którego rozwiązania, poza znajomością krzywej

retencji wodnej, niezbędna jest znajomość przewodnictwa hydraulicznego w stanie nienasyconym. W układzie dwuwymiarowym równanie Richards'a przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{dk(\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (2.1.7)$$

gdzie: $D(\theta)$ – dyfuzyjność wilgoci – iloczyn przewodnictwa hydraulicznego i charakterystyki wilgotnościowej $k(\theta) \cdot (dh/d\theta)$,

lub

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{dk(h)}{dh} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.1.8)$$

gdzie: $C(h) = d\theta/dh$ – różniczkowa pojemność wodna materiału [m^{-1}].

Pierwszy z modeli Richards'a (2.1.7) opisuje transport wody, w którym przewodnictwo uzależnione jest od wilgotności ośrodka, zaś drugi (2.1.8) uzależnia transport wody od potencjału ciśnieniowego, co jest przydatne w opisie układów złożonych, do których należą wielowarstwowe przegrody budowlane (Suchorab, Zarzeka-Raczkowska, 2013).

Przewodnictwo wodne w stanie nasyconym w ośrodkach porowatych najczęściej wyznaczane jest przy wykorzystaniu pomiarów laboratoryjnych. Służy do tego między innymi aparat Wita, który stosowany jest powszechnie w gruntoznawstwie (Wit, 1967; Zawadzki, Olszta, 1981). Wykorzystano go również do pomiaru przewodnictwa wodnego w materiałach budowlanych (Suchorab, Zarzeka-Raczkowska, 2013).

Przewodnictwo w stanie nienasyconym wyznaczane jest na podstawie formuły van Genuchten'a (1980):

w zależności od wilgotności:

$$k(\theta) = k_s \sqrt{\theta} \cdot \left[1 - (1 - \theta^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (2.1.9)$$

w zależności od potencjału ciśnieniowego:

$$k(h) = k_s \frac{\left[(1 + |\alpha h|^n)^m - |\alpha h|^{n-1} \right]^2}{(1 + |\alpha h|^n)^{\frac{5}{2}m}} \quad (2.1.10)$$

gdzie: k_s – przewodnictwo w stanie nasyconym [cm/d], θ – wilgotność objętościowa [cm^3/cm^3], α , n , m – parametry empiryczne zależne od rodzaju ośrodka [-].

2.1.6. Wpływ wody zawartej w materiałach budowlanych na jakość przegród

Woda w przegrodach budowlanych w istotny sposób oddziałuje nie tylko na budynek jako całość, lecz również na poszczególne jego komponenty. Negatywne efekty oddziaływań można podzielić na skutki natury fizycznej, chemicznej oraz biologicznej.

Do oddziaływań fizycznych należy zaliczyć głównie obniżenie parametrów wytrzymałościowych przegród budowlanych, skutkujące uszkodzeniami budynków. Podstawowymi przyczynami tych uszkodzeń są (Nilsson, 1980; Oliver, 1997):

- procesy zamarzania i rozmarzania. Uszkodzenia są konsekwencją wzrostu objętości wody w trakcie przejścia fazowego ze stanu ciekłego do stałego. Powoduje to wzrost ciśnienia wewnątrz porów prowadzący do stopniowego niszczenia porowatej struktury ośrodka i obniżający jego charakterystyki wytrzymałościowe (Matsumoto i in., 2001; Wardeh i Perrin, 2008; Barnat-Hunek i in., 2016),
- procesy kurczenia i rozszerzania (Tang i in., 2013; Gagg, 2014). Zachodzą na skutek częstych fluktuacji wilgotności względnej powietrza wewnątrz porów oraz temperatury. Ze względu na różne parametry materiałów, z których wznoszone są przegrody wielowarstwowe, proces ten prowadzi do powstawania pęknięć, rys, nierówności powierzchni. Powszechną i widoczną konsekwencją powyższych zjawisk są wybrzuszenia podłóg, takich jak parkiet lub panele. Według Voutilainen'a (2005) zjawiska związane z kurczeniem i rozkurczaniem pojawiają się przy wilgotnościach względnych powietrza powyżej 75%,
- krystalizacja soli i zniszczenia mechaniczne wywołane tym zjawiskiem. Krystalizacja jest konsekwencją przenoszenia soli rozpuszczonych w wodzie, najczęściej wraz z transportem kapilarnym wody z gruntu, wnikaniem opadów atmosferycznych, a nawet przenoszeniem soli z wewnętrznych warstw materiału. Zjawisko to jest widoczne na powierzchniach murów w postaci wykwitów solnych. Krystalizacja występuje, gdy wolna woda, która przeniosła sole w dane miejsce przegrody, zaczyna odparowywać. Wówczas stężenie soli w roztworze wzrasta, co w konsekwencji prowadzi do jej krystalizacji wewnątrz porów ośrodka (Andrés i in., 2009; Linnow i in., 2007). Proces krystalizacji najczęściej

związany jest z rozsadzaniem porowatej struktury. W związku z powyższym negatywnie wpływa na wytrzymałość konstrukcji oraz powoduje powstanie lokalnych zniszczeń widocznych na elewacjach w postaci pęknięć lub odpadających fragmentów muru. Dodatkowo, niektóre sole zwiększają nasiąkliwość materiałów budowlanych ze względu na higroskopijność, co w rezultacie może prowadzić do wzrostu wilgotności konstrukcji (Morillas i in., 2015).

Chemiczny aspekt wpływu wody na budynki i ich przegrody wynika z tego, że woda bierze udział w wielu niekorzystnych dla konstrukcji reakcjach chemicznych. Ponadto jest dobrym rozpuszczalnikiem i przyspiesza lub umożliwia przebieg reakcji, które w rezultacie prowadzą do niszczenia materiałów konstrukcyjnych. Do oddziaływań chemicznych zaliczamy (Nilsson, 1980; Oliver, 1997):

- korozję metali (najczęściej stali zbrojeniowej) w konstrukcjach żelbetonowych, która zachodzi przy podwyższonej wilgotności, przekraczającej 80% wilgotności względnej. Obecność dodatkowych substancji – na przykład rozpuszczonych soli, stwarza środowisko bardziej agresywne i przyczynia się do przyspieszenia korozji oraz obniżenia jej progu poniżej 80% wilgotności względnej,
- niszczenie polimerowych substancji klejących stosowanych przy wykończeniu wnętrz. Najczęściej można to zaobserwować na podłogach pokrytych wykładzinami typu PCW. Wzrost wilgotności podłoża w obecności wodorotlenku wapnia Ca(OH)_2 daje odczyn alkaliczny, co w rezultacie niszczy właściwości substancji klejącej wykładzinę do podłoża i powoduje pofalowanie podłogi. Według Nilsson'a (1980) wspomniane zjawisko występuje przy wilgotności względnej powietrza w porach przekraczającej 90%.

Trzecią przyczyną zniszczeń przegród budowlanych wywołanych wzrostem wilgotności są oddziaływania natury biologicznej. Dotyczą one głównie wpływu mikroorganizmów oraz insektów rozwijających się w warunkach podwyższonej wilgotności. Porażenie przegród grzybami pleśniowymi jest zjawiskiem znanym od dawna w budownictwie mieszkaniowym. W ocenie stanu technicznego obiektów było ono traktowane jako problem wstydlivy, wynikający z braku dbałości gospodarzy o czystość i porządek (Zyska, 1999). Okazuje się jednak, że również w nowych budynkach notowano liczne przypadki porażenia mieszkań przez grzyby pleśniowe. Było to szczególnie widoczne w budownictwie wielko-

plytowym, którego największy okres rozwoju przypadał na lata 70. minionego stulecia. Stwierdzono wówczas, że przyczyną zawilgocenia, a tym samym porażenia budynków, była zła izolacyjność przegród i niedogrżanie budynków. Problem ten występuje do dzisiaj i związany jest głównie z niewłaściwą eksploatacją systemów wentylacji.

Należy podkreślić, że inaczej należy interpretować porażenie biologiczne budynków drewnianych, a inaczej murowanych. Drewno jest materiałem organicznym, zatem stanowi środowisko korzystne dla rozwoju form biologicznych (Szymański, 1997). Stąd nawet przy niewielkiej wilgotności względnej powietrza, w materiałach drewnianych pojawia się zagrzybienie (Oliver, 1997). Według Czajnika i in. (1970) grzyby domowe, które rozkładają drewno konstrukcyjne dzieli się na następujące grupy:

- grupa I – grzyby najbardziej szkodliwe, powodujące szybki rozkład drewna na dużej powierzchni w całym budynku. Są to: grzyb domowy właściwy – stroczek domowy (*Serpula lacrymans*), grzyb piwniczny – gnilica mózgowata (*Coniophora puteana*), grzyb domowy biały – jamkówka sznurowata (*Fibroporia vaillantii*) oraz grzyb kopalniany – purnik niekształtny (*Tapinella panuoides*),
- grupa II – grzyby mniej szkodliwe w budynkach, wywołujące zgniliznę brunatną drewna. Są to: jamkówka rzędowa (*Trametes serialis*), twarżdziak łuskowaty (*Lentinus lepideus*) oraz niszczyca płotowa (*Gloeophyllum sepiarium*),
- grupa III – grzyby mało szkodliwe, powodujące słaby powierzchniowy rozkład drewna, rozwijające się przy jego dużej wilgotności. Są to żylica olbrzymia (*Phlebiopsis gigantea*) i powłoczniczek gładki (*Cylindrobasidium laeve*).
- grupa IV – grzyby powodujące powierzchniowy rozkład drewna w warunkach wysokiej wilgotności, wywołujące szarą zgniliznę drewna. Jest to głównie czuprynka kulista (*Chaetomium globosum*).

W Polsce i innych krajach klimatu umiarkowanego najbardziej niebezpieczny jest grzyb domowy właściwy (*Serpula lacrymans*). Poraża on drewno iglaste i liściaste oraz materiały drewnopodobne. Optymalne wartości wilgotności dla rozwoju tego grzyba to 30% wilgotności drewna i 23°C. Drewno porażone traci na masie ok. 7% miesięcznie, a parametry wytrzymałościowe obniżają się o 20–50%.

Poza grzybami i mikroorganizmami, do zniszczeń drewnianych elementów konstrukcji budowlanych przyczyniają się insekty (Ważny, Karyś, 2001; Zyska,

1999). Zwykle są to postacie larwalne, które drążą kanały w strukturze drewna, a po przepoczwarczeniu opuszczają materiał drzewny. Optymalne warunki do rozwoju larw w strukturze drewna to wilgotność drewna około 30% i wilgotność powietrza wewnętrznego bliska 100%.

Tabela. 2.1.4. Udziały poszczególnych gatunków grzybów pleśniowych w zależności od rodzaju materiału budowlanego i jego wilgotności masowej (źródło: Piotrowska, Żakowska, 2011)

Materiał	Wilgotność masowa	Liczba grzybów jtk/100 cm ²	Gatunek	Udział %
Cegła ceramiczna pełna	0,1%	$4,9 \times 10^3$	<i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Acremonium butyri</i> <i>Alternaria tenuisima</i>	69,4 19,6 8,6 2,4
	5–9%	$4,2 \times 10^6$	<i>Aspergillus versicolor</i> <i>Acremonium butyri</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Aspergillus flavus</i> <i>Acremonium murorum</i>	71,2 24,8 2,02 1,01 0,59 0,42
Tynk z powłoką malarską	0,6%	$3,4 \times 10^2$	<i>Acremonium strictum</i>	100
	2,6%	$6,9 \times 10^4$	<i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Aspergillus versicolor</i>	59,4 40,6
	5,5%	$4,8 \times 10^5$	<i>Acremonium butyri</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Alternaria alternata</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Botrytis cinerea</i>	37,5 33,3 15,8 10,4 3,0
	7,2%	$1,6 \times 10^2$	<i>Acremonium butyri</i> <i>Chaetomium sp.</i> <i>Aspergillus sydowii</i> <i>Penicillium chrysogenum</i>	68,8 18,8 6,3 6,1
	7,8%	$9,9 \times 10^5$	<i>Acremonium butyri</i> <i>Aspergillus versicolor</i>	88,9 11,1
	Tynk pokryty tapetą	2,5%	$2,1 \times 10^7$	<i>Stachybotrys atra</i>
3,0%		$5,0 \times 10^5$	<i>Stachybotrys atra</i> <i>Cladosporium herbarum</i> <i>Aspergillus versicolor</i> <i>Penicillium chrysogenum</i>	80 10 5 5
7,6%		$2,8 \times 10^7$	<i>Stachybotrys atra</i> <i>Aspergillus versicolor</i>	96,4 3,6

Ceramika budowlana, betony, zaprawy i zaczyny, jako materiały nieorganiczne (Szymański, 1997) są również podatne na korozję warunkowaną nadmiernym zawilgoceniem ośrodka. Na materiałach nieorganicznych mogą rozwijać się drobnoustroje, wydzielające do otoczenia rodniki kwasów i innych substancji, które wywołują procesy chemiczne typowe dla korozji. Woda występująca w tych ośrodkach, podobnie jak w przypadku materiału organicznego jakim jest drewno przyczynia się do intensyfikacji korozji biologicznej, ponieważ zapewnia korzystne środowisko do rozwoju tych organizmów. Według Piotrowskiej i Żakowskiej (2011) dominującymi gatunkami w przegrodach budowlanych są: *Aspergillus versicolor*, *Penicillium chrysogenum* i *Cladosporium cladosporioides*. Tabela 2.1.4 przedstawia udziały poszczególnych gatunków w przegrodach w zależności od wilgotności masowej.

2.1.7. Wpływ wody zawartej w materiałach budowlanych na jakość powietrza wewnętrznego i zdrowie ludzi

Zagadnienie powietrza wewnętrznego (ang. Indoor Air) należy do aktualnych kierunków badań z zakresu inżynierii środowiska. Uzyskanie właściwych parametrów powietrza wewnętrznego warunkowane jest stosowaniem prawidłowo zaprojektowanych i wykonanych systemów wentylacji i klimatyzacji. Na jakość powietrza w pomieszczeniach wpływają czynniki takie jak komfort cieplny (odczucia związane z temperaturą i wilgotnością), odory (substancje wyczuwalne zapachowo) oraz inne substancje, niewyczuwalne zapachowo (Ling i in., 2010; Raczkowski i in., 2011; Kelley i in., 2014; Blazy i in., 2015).

Według WHO (ang. World Health Organization) jakość powietrza wewnętrznego w większym stopniu wpływa na stan zdrowia człowieka niż jakość powietrza zewnętrznego. Jest to spowodowane tym, że ludzie większość czasu spędzają w środowisku wewnętrznym – nawet 90% (Guo i in., 2004). Poza tym stężenia zanieczyszczeń w środowisku wewnętrznym są znacznie wyższe niż w zewnętrznym (ECA, 1990; Dudzińska i in., 2012; Staszowska, Dudzińska, 2011; Południk., Dudzińska, 2011a; Południk., Dudzińska, 2011b; Dudzińska i in., 2009; Staszowska, Dudzińska, 2008; Rożej i in., 2008).

Charakterystycznym efektem wynikającym z niewłaściwej jakości powietrza wewnętrznego jest zespół SBS, przejawiający się dolegliwościami mieszkańców, takimi jak: zapalenie śluzówek, astma oskrzelowa, przewlekłe zapalenia krtani i oskrzeli (Mudarri, Fisk, 2007; ASHRAE, 2012), a także migreny, rozdrażnienie, zaburzenia koncentracji prowadzące do spadku motywacji, zaangażowania

żowania w pracę i jej efektywności, itp. (Wargocki, 2005). Według badań i ekspertyz przedstawionych przez Mudarri i Fisk'a (2007), zwiększona wilgotność przegród budowlanych oraz obecność pleśni zwiększa ryzyko problemów układu oddechowego o ok. 30–50%.

Jednym z największych problemów jest zagrożenie emisji zanieczyszczeń z materiałów budowlanych, wykończeniowych oraz elementów wyposażenia wnętrz. Zanieczyszczenia te mogą mieć charakter makrocząsteczkowy, gazowy, organiczny i nieorganiczny (Voutilainen, 2005). Wśród substancji zanieczyszczających powietrze wewnętrzne ważną grupę stanowią lotne związki organiczne LZO, z ang. VOC – Volatile Organic Compounds (Molhave, 1991; Molhave, Nielsen, 1992), obejmujące ponad 900 różnych substancji (Salonen i in., 2009a; Salonen i in., 2009b). Według Voutilainen'a (2005), emisję z materiałów budowlanych i wykończeniowych dzieli się na pierwotną i wtórną. Pierwotna emisja wiąże się z normalnym odparowaniem substancji zanieczyszczającej z materiału. Zwykle jej natężenie maleje po pewnym okresie. Emisje wtórne są wywoływane przez czynniki zewnętrzne, do których zaliczamy wilgotność. Wilgotne materiały budowlane przyczyniają się do wzrostu emisji formaldehydu, amoniaku oraz innych substancji typu VOC (Voutilainen, 2005; Salonen i in., 2009a; Salonen i in., 2009b). Przyczyn emisji wtórnej może być kilka, w tym prowadzenie prac wykończeniowych na murach obciążonych wilgocią technologiczną, związaną z procesem wznoszenia budynków. Szczególną rolę w tym przypadku odgrywają tutaj emisje z rozkładu klejów w wyniku reakcji z wodą, betonem i zaprawą.

Istotnym problemem jakości powietrza wewnętrznego jest zanieczyszczenie mikroorganizmami (Kuske i in., 2005b; Suchorab i in., 2015). Ich rozwój zachodzi głównie w wilgotnych materiałach budowlanych, stanowiących dobrą pożywkę. Powietrze atmosferyczne zawsze zawiera określoną ilość mikroorganizmów i zarodni grzybowych. Zazwyczaj ilość i rodzaj mikroorganizmów w powietrzu wewnętrznym jest zbliżona do stanu obserwowanego w powietrzu zewnętrznym. W budynkach zagrożonych zawilgoceniem obserwuje się tendencję przeciwną, ponieważ cechy takie jak ilość i rodzaj mikroorganizmów wykazują znaczne zróżnicowanie (Żukiewicz-Sobczak i in., 2012). Tabela 2.1.5 przedstawia listę mikroorganizmów podzielonych na grupy w zależności od wilgotności względnej, w której się rozwijają.

Tabela 2.1.5. Przedstawiciele grzybów w zależności od wilgotności względnej powietrza (wg Samson i in., 1994)

Wilgotność względna	Mikroorganizmy
Wysoka, powyżej 90%	<i>Asperigulus fumigatus</i> <i>Trichoderma</i> <i>Exophiala</i> <i>Stachybotrys</i> <i>Phialophora</i> <i>Fusarium</i> <i>Ulocladium</i> <i>Rhodotorula</i> <i>Actinomycetes</i>
Średnia, 85% < 90%	<i>Aspergillus versicolor</i>
Niska, poniżej 85%	<i>Aspergillus versicolor</i> <i>Eurotium</i> <i>Wallemia</i> <i>Penicillia</i>

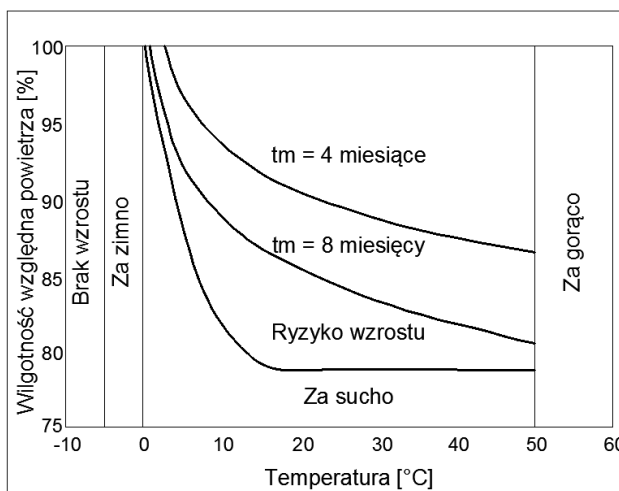
Według danych literaturowych (Piotrowska i in., 2001; Eggleston, Bush, 2001; Żukiewicz-Sobczak i in., 2012), stężenie spor grzybów w silnie zawilgotnionych i porażonych pomieszczeniach może przekraczać nawet 1000 jednostek/m³. Do oceny stopnia zagrożenia należy przytoczyć wartości dopuszczalne. Według Książek (2011) dopuszczalna ilość grzybów pleśniowych wynosi 50 jednostek/m³ (jeśli są to grzyby pleśniowe) lub 150 jednostek/m³ jeśli (jest to mieszanina różnych gatunków z wyłączeniem patogenów). W przypadku grzybów pleśniowych z rodzajów *Cladosporium* i *Alternaria*, dopuszczalne stężenie wynosi 300 jednostek/m³. Natomiast występowanie gatunków *Aspergillus fumigatus* i *Stachybotrys atra* jest niedopuszczalne (Jagjit, Jagjit, 1994).

Obciążenie środowiska wewnętrznego mikroorganizmami może być wywołane przez wiele czynników. Zaliczyć do nich należy obecność mikrobiologicznych lotnych związków organicznych, stanowiących podgrupę lotnych związków organicznych (ang. MVOC – Microbial Volatile Organic Compounds), a także obecność mykotoksyn, alergenów, zarodników i fragmenty grzybów. Związki typu MVOC są miarą inwazji pleśni we wnętrzach, ponieważ uwalniają się jako produkty metabolizmu grzybów (Morath i in., 2012). Powodują one zapach pleśni i mogą prowadzić do różnych dolegliwości (Heinzow, 2011). Mykotosyny to toksyczne substancje produkowane przez mikroorganizmy, głównie przez *Stachybotrys*, *Fusarium* oraz *Aspergillus versicolor* (Samson i in., 1994; Frąc i in., 2010; Żukiewicz-Sobczak, 2012). Innymi toksynami produkowanymi przez grzyby pleśniowe są aflatoksyny (AF), ochratoksyna A (OT), zeralenon (ZEN), trichoteceny oraz fumonizyny (F) (Wiszniewska i in., 2004; Dutkiewicz, Górny,

2002; Żukiewicz-Sobczak, 2012; Kotowicz i in., 2014). Związki toksyczne wytwarzane przez grzyby obejmują także alkohole, ketony, terpeny, estry i związki siarki. Wśród nich wyróżniono (Canhoto i in., 2004, Kuske i in., 2005a, Kuske i in., 2005b, Wilkins i in., 2000):

- alkohole: 2-metylo-propanol, 3-metyl-1-butanol, 2-metylo-1-butanol, 3-oktanol, 1-okten-3-ol, 1-heksanol, 1-pentanol, 2-metyloisoborneol, geosmina,
- terpeny i seskwiterpeny: limonen, pinen,
- ketony: 3-oktanon, 2-heptanon, 2-pentanon,
- furany: 3-metylofuran,
- związki siarki: disiarczki dimetylu,
- węglowodory: alkany, alkeny, dieny, trieny.

Przedziały wilgotności najkorzystniejsze dla rozwoju mikroorganizmów różnią się w zależności od ich gatunku i rodzaju podłoża itp. Można jednak przyjąć, że wilgotność względna powietrza przekraczająca 75% sprzyja rozwojowi grzybów pleśniowych (rys. 2.1.11), tym samym może się przyczyniać do porażenia biologicznego budynków (Pasanen i in., 1994).



Rys. 2.1.11. Warunki korzystne do rozwoju grzybów pleśniowych w zależności od wilgotności względnej (RH), temperatury i czasu rozwoju (opracowanie własne na podst. Viitanen , 2001)

2.2. Postawy funkcjonowania techniki TDR

Problemy z zawilgoceniem powietrza i murów stanowią o konieczności pomiarów wilgotności w przegrodach budowlanych, dzięki czemu możliwa jest ilościowa ocena skali tego zjawiska, określenie jego źródeł, oraz co najistotniejsze – ustalenie sposobów przeciwdziałania jego negatywnym skutkom i zapewnienie wymaganej jakości powietrza wewnętrznego.

Z tego powodu rozwój technik pomiarowych umożliwiających szybką i możliwie bezinwazyjną detekcję wilgoci wydaje się być istotnym zagadnieniem zarówno z punktu widzenia inżynierii środowiska jak też budownictwa. Istnieje wiele technik pomiaru wilgotności. Stosowane są metody (Hoła i in., 2007; Hoła i in., 2012):

- bezpośrednie: metoda grawimetryczna, suszarkowa,
- pośrednie: chemiczne (metoda papierków wskaźnikowych, metoda karbidowa – CM), elektryczne (elektrooporowa, dielektryczna, mikrofalowa, tomografia impedancyjna), jądrowe (neutronowa, metoda prześwietlania promieniowaniem γ) oraz metoda termowizyjna.

Obecnie najczęściej stosowane są metody elektryczne: rezystancyjna (elektrooporowa), dielektryczna – pojemnościowa (FD z ang. Frequency Domain Technique, technika pomiaru wilgotności w domenie częstotliwości) oraz dielektryczna – reflektometryczna (TDR – z ang. Time Domain Reflectometry – reflektometria w domenie czasu). Wszystkie wymienione techniki pomiaru wilgotności zaliczane są do grupy metod pośrednich, co oznacza, że badany jest parametr nie będący wilgotnością, ale wielkość pośrednia, zależna od wilgotności.

W przypadku techniki rezystancyjnej mierzonym parametrem jest przewodnictwo elektryczne lub opór elektryczny ośrodka porowatego umieszczonego pomiędzy elektrodami pomiarowymi. Wielkość przewodnictwa lub oporu elektrycznego bezpośrednio wiąże się ze stopniem zawilgocenia badanego ośrodka, co, po uprzedniej kalibracji, może służyć za podstawę do oznaczania wilgotności ośrodka (Bryson, 2005; Damasceno i in., 2009; Piotrowski, 2009; Calamita i in., 2012; Toll i in., 2013; Hassan, Toll, 2014). Technika ta ze względu na prostą konstrukcję czujników i niewielkie koszty jest obecnie bardzo popularna. Z tego względu na rynku dostępnych jest wiele stosunkowo tanich urządzeń pomiarowych, umożliwiających szacowanie wilgotności materiałów budowlanych, głównie drewna. Zakres pomiarowy techniki zawiera się w przedziale od 6%_{mass}

do 60%_{mass}, zaś niepewność pomiaru waha się od 1%_{mass} do 10%_{mass} w zależności od stopnia zawilgocenia materiału (Piotrowski, 2009).

Innym podejściem do pośredniego określania wilgotności ośrodka porowatego charakteryzuje się technika pojemnościowa. Pomiar w tym przypadku polega na pomiarze pojemności kondensatora wypełnionego badanym materiałem jako dielektrykiem. Pojemność zależy od rozmiarów i kształtu okładzin kondensatora, dystansu między nimi oraz przenikalności dielektrycznej ośrodka między okładzinami. Wartość przenikalności dielektrycznej jest uzależniona od wilgotności materiału. Znając pojemność kondensatora, na podstawie indywidualnej kalibracji przyrządu, istnieje możliwość oszacowania wilgotności danego materiału (Sobczuk, Plagge, 2007; Piotrowski, 2009). Zakres pomiarowy metody wynosi od 0%_{mass} do 90%_{mass} przy dokładności 1–2%_{mass} w zależności od rodzaju materiału, wilgotności i jego granulacji (Piotrowski, 2009). Na rysunku 2.2.1. przedstawiono przykładowe urządzenie służące do pomiaru wilgotności materiałów budowlanych, wykorzystujące technikę rezystancyjną oraz pojemnościową.



Rys. 2.2.1. Miernik wilgotności materiałów budowlanych (Producent LABEL, Polska) działający na zasadzie techniki pojemnościowej FD (a), sonda młotkowa wykorzystywana w technice rezystancyjnej (elektrooporowej) (b) (źródło: fot. własne autora)

Metody pomiarowe przedstawione powyżej cechują dwie zalety: niska cena oraz możliwość wykonania szybkich, bezinwazyjnych pomiarów wilgotności. Należy jednak zaznaczyć, że są one obarczone poważną wadą, która często utrudnia pomiar, a czasem wręcz go uniemożliwia. Jest to wrażliwość na zasolenie badanego materiału, wynikająca z niskiej częstotliwości roboczej urządzenia. W związku z powyższym, czas interwału pomiarowego jest długi, co skutkuje przepływem jonów soli między okładzinami kondensatora, i wpływa na niesta-

bilność pomiaru (Sobczuk, Plagge, 2007; Nasraoui i in., 2009; Černý, 2009; Skierucha, Wilczek, 2010).

Problem zasolenia zawilgoconych ośrodków jest istotny i nie powinien być pomijany przy doborze techniki pomiarowej. W czasie eksploatacji obiektu dotkniętego zawilgoceniem, stężenie soli w przegrodach zmienia się wskutek transportu roztworów soli oraz krystalizacji, co jest zjawiskiem negatywnym, prowadzącym do zniszczenia struktury materiału (Lubelli i in., 2004; Suchorab i in., 2008; Suchorab i in., 2009a; Franzoni, Bandini, 2012).

Sole rozpuszczone w wodzie w ilościach trudnych do szybkiej detekcji zmieniają właściwości pola elektrycznego i stanowią dodatkową zmienną, niemożliwą do zweryfikowania w drodze pomiarów wilgotnościowych. Wszystko to powoduje, że oznaczenia wilgotności ośrodków dotkniętych zasoleniem są niedokładne, a przez to niesatysfakcjonujące.

W celu minimalizacji wpływu zasolenia na pomiary za pomocą technik FD stosowane są współczynniki korygujące (Turski, Malicki, 1974; Malicki, Hanks, 1989; Malicki i in., 1989). Ich wykorzystanie umożliwia prowadzenie pomiarów wilgotności ośrodka z dokładnością do $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Sobczuk, Plagge, 2007), wymaga jednak indywidualnej kalibracji miernika pod kątem badanego ośrodka, którego zasolenie może ulegać zmianie.

Wada ta nie dotyczy techniki pomiarowej TDR, stanowiącej przedmiot niniejszej pracy.

2.2.1. Przenikalność dielektryczna

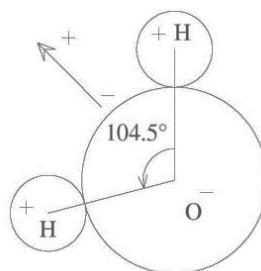
Strukturę porowatych materiałów budowlanych tworzą trzy fazy – stała, ciekle i gazowa. Każdą z nich charakteryzuje się pewna wartość przenikalności dielektrycznej. Przenikalność dielektryczna mieszaniny trójfazowej jest wypadkową przenikalności dielektrycznych poszczególnych faz.

Wartości przenikalności dielektrycznej poszczególnych faz struktur budowlanych kształtują się następująco: powietrze – 1 [-], faza stała 1 – 15 [-], woda – 80 [-]. W tabeli 2.2.1 przedstawiono wartości przenikalności dielektrycznej różnych materiałów.

Tabela 2.2.1. Wartości dielektryczne materiałów z których zbudowane są ośrodki porowate

Materiał	Przenikalność dielektryczna [-]				
	Curtis, Defandorf, 1929	Davis, Annan, 1989	Daniels, 1996	Korhonen i in., 1997	Mohamed, 2006
Powietrze	1	1	1	1	-
Woda	80 (20°C)	80	80–81	80	80
Lód	3 (-5°C)	3–4	4	-	3,4
Bazalt	12	-	-	-	-
Śnieg	-	-	8–12	-	-
Granit	7–9	4–6	5	-	-
Piaskowiec	9–11	-	2–3	-	-
Gлина	-	5–10	2–6	-	-
Piasek	-	3–5	4–6	2,9	-
Cement	-	-	-	2,7	-
Suchy beton	-	-	-	5,4	-
Sucha zaprawa	-	-	-	3,9	-
Kalcyt	-	-	-	-	6,4–8,5
Gips	-	-	-	-	6,5
Ortoklaz	-	-	-	-	5,6
Kwarc	-	-	-	-	4,5

Według danych przedstawionych w tabeli 2.2.1, przenikalność dielektryczna wody wyraźnie odbiega od przenikalności pozostałych ośrodków. Jest to konsekwencją asymetrycznego rozkładu ładunków w jej cząsteczce (rys. 2.2.2) i jej polarną budową.



Rys. 2.2.2. Asymetryczna budowa cząsteczki wody (opracowanie własne na podst. Skierucha, Malicki, 2004; Skierucha, 2005)

Przenikalność dielektryczna ϵ [-], jest miarą zachowania cząstek materii po przyłożeniu zewnętrznego, zmiennego pola elektrycznego (Topp i in., 1980). Na skutek przyłożenia do ośrodka pola elektrycznego, cząsteczki wody obracają się zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola. Konsekwencją takiego porządkowania

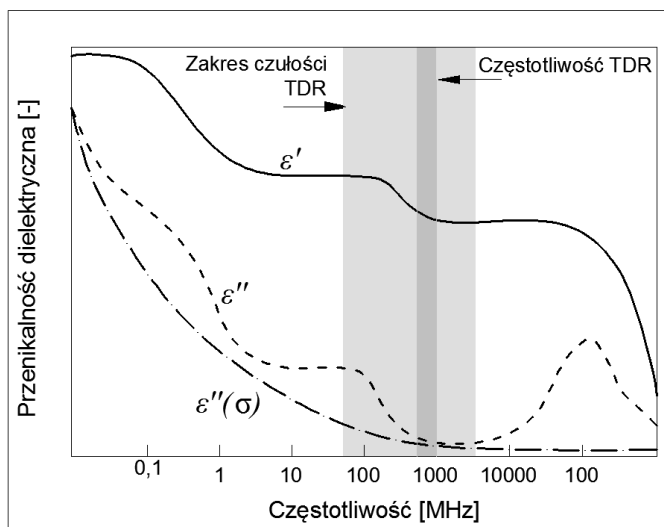
dipoli jest gromadzenie energii wyzwalanej w chwili, gdy pole elektryczne zanika. Energię tą wyraża się w postaci rzeczywistej części względnej przenikalności elektrycznej ośrodka ε' . Jest to wielkość podstawowa przy pomiarach wilgotności ośrodków porowatych metodami elektrycznymi. Z kolei urojona część zespolonej przenikalności dielektrycznej (ε'') wyraża straty energii zewnętrznego pola elektrycznego, wywołane przewodnictwem ośrodka zależnym głównie od koncentracji soli. Przenikalność dielektryczna ośrodka o niezerowym przewodnictwie elektrycznym wyraża równanie zespolone (Böttcher, Bordewijk, 1978; Skierucha, Malicki, 2004; Wraith i in., 2005; Skierucha, 2005; Sobczuk, Plagge, 2007; Solecki i in., 2013):

$$\varepsilon_{\omega} = \varepsilon'_{\omega} - i \left(\varepsilon''_{\omega} + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right) \quad (2.2.1)$$

gdzie: ε'_{ω} - rzeczywista część przenikalności dielektrycznej ośrodka w danej częstotliwości ω [-], ε''_{ω} - urojona część przenikalności dielektrycznej w danej częstotliwości ω [-], i - jednostka urojona ($i^2 = -1$), σ_0 - przewodnictwo elektryczne dla niskich częstotliwości [S/m], ε_0 - przenikalność dielektryczna próżni, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m], ω - częstość kołowa zewnętrznie przyłożonego pola elektrycznego [1/s].

Straty energii pola elektrycznego związane z jonowym przewodnictwem elektrycznym (czyli urojona część przenikalności dielektrycznej) obserwowane są przede wszystkim przy niskich częstotliwościach pola (Chełkowski A., 1972). Jako że technika TDR funkcjonuje przy znacznie wyższych częstotliwościach można uznać, że przewodnictwo elektryczne nie ma znaczącego wpływu na mierzoną wartość przenikalności dielektrycznej. Cecha ta stanowi podstawę, aby w określonych warunkach pomiaru pomijać wpływ zasolenia. Według Jones'a i in. (2002) możliwy jest pomiar zasolenia ośrodka na podstawie analizy odpowiedzi sensora TDR.

Z wykresu przedstawionego na rysunku 2.2.3 wynika, że technika TDR stosowana jest w przedziale częstotliwości blisko 1GHz, w którym urojona część przenikalności dielektrycznej, będąca pochodną zasolenia ośrodka, jest najniższa i nie wpływa na całkowitą wartość zespolonej wartości przenikalności dielektrycznej. Dominująca jest natomiast wartość rzeczywista zespolonej całkowitej przenikalności dielektrycznej, która jest stała, dzięki czemu dokładność pomiaru z wykorzystaniem techniki TDR jest wysoka.



Rys. 2.2.3. Zależność parametrów dielektrycznych wilgotnych ośrodków porowatych od częstotliwości pola (opracowanie własne na podst. Hilhorst, Dirksen, 1994; Sobczuk, Plagge, 2007)

Przenikalność dielektryczną materiału porowatego wyznacza się za pomocą formuły (Malicki, Skierucha, 1989; Wraith i in., 2005; Skierucha, 2005):

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{V} \right)^2 \quad (2.2.2)$$

gdzie: ε – przenikalność dielektryczna badanego materiału [-], c – prędkość światła w próżni [$3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$], V – prędkość propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż prętów pomiarowych [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. W praktyce pomiarowej wykorzystuje się zależność:

$$\varepsilon = \left(\frac{c \cdot t_p}{2L} \right)^2 \quad (2.2.3)$$

gdzie: t_p – czas propagacji sygnału wzdłuż pręta sondy pomiarowej wyznaczony miernikiem TDR [s], L – długość sondy [m].

Podstawienie w mianowniku liczby 2 jest konieczne, ponieważ impuls elektromagnetyczny propaguje wzdłuż pręta w obie strony i ten czas przelotu jest mierzony przez miernik reflektometryczny.

2.2.2. Pomiary za pomocą techniki TDR

Istotą pomiaru za pomocą techniki TDR jest określenie przenikalności dielektrycznej ośrodka na podstawie pomiaru czasu przelotu impulsu elektromagnetycznego przez pręty sond pomiarowych.

Podstawowym wyposażeniem każdego urządzenia TDR wykorzystywanego do pomiaru zawartości wody w ośrodku porowatym jest analizator sygnału elektromagnetycznego i jego odbić. Zestaw pomiarowy składa się z czterech podstawowych komponentów: generatora impulsu elektrycznego, kabla koncentrycznego (przewodnik sygnału elektromagnetycznego), zestawu sond oraz oscyloskopu (do rejestracji oraz wizualizacji sygnału elektromagnetycznego).



Rys.2.2.4. Miernik laboratoryjny TDR Multimeter MTS-1 (LOM) stosowany w badaniach, pełniący funkcję generatora i odbiornika impulsów (źródło: fotografia własna)



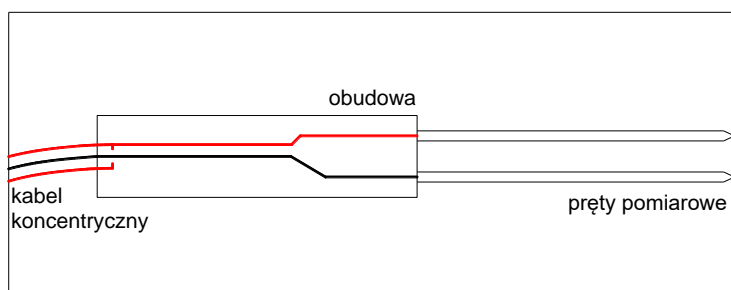
Rys. 2.2.5. Miernik przenośny (FOM) (ETest, Lublin) stosowany w badaniach terenowych (źródło: fotografia własna)

Urządzenia przedstawione na rysunkach 2.2.4 i 2.2.5 to w pełni funkcjonalne mierniki TDR. Pierwszy z nich (LOM – ang. Laboratory Operated Multimeter), wyposażony w multiplexer umożliwiający pomiary za pomocą 8 sond pomiarowych, jest urządzeniem stacjonarnym. Drugi to miernik przenośny, wyposażony we własne źródło zasilania. Służy do badań terenowych (FOM – ang. Field Operated Multimeter) i umożliwia pomiar z wykorzystaniem tylko jednego sensora.

Istotnym elementem każdego zestawu TDR są sondy pomiarowe. Pręty sond TDR należy traktować jako przewodniki sygnału elektromagnetycznego, tj. jako przedłużenie kabla koncentrycznego (rys. 2.2.6). Istnieje wiele typów sond TDR, które różnią się kształtem, wykonaniem materiałowym oraz liczbą prętów.

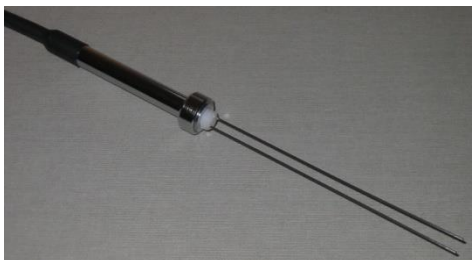
Konstrukcja typowej sondy TDR jest następująca (ETest):

- kabel koncentryczny RG58, łączący element pomiarowy z miernikiem. Elementy budowy to izolowana żyła oraz otaczający ją metalowy oplot (ekran). Impedancja przewodu 50 Ω ,
- pręty ze stali nierdzewnej wprowadzane inwazyjnie do badanego ośrodka,
- obudowa, w której osadzone są pręty stalowe, połączone z kablem koncentrycznym.



Rysunek 2.2.6. Schemat ideowy budowy dwuprętowej sondy TDR
(źródło: oprac. własne)

Koncepcja dwuprętowej sondy pomiarowej TDR jest dobrze znana od dziesięcioleci. Wzmianki o tego typu konstrukcjach pojawiają się w artykułach Topp'a i in. (1982) oraz Malickiego i Skieruchy (1989). Poza tym w literaturze światowej przedstawiono kilka odmiennych koncepcji budowy sond TDR, między innymi sondy współosiowe, będące bezpośrednim rozwinięciem kabla koncentrycznego w układ o większej średnicy (Topp i in., 1980; Zegelin i in., 1989), lub sondy trójprętowe, w których oplot kabla koncentrycznego przechodzi w dwa pręty, a przewód osiowy w jeden (Nissen, Moldrup, 1995; Ren i in., 1999; Blonquist i in., 2005). Jones i in. (2002) przedstawili koncepcję sondy siedmioprętowej z prętami osiowym i sześcioma prętami zewnętrznymi rozmieszczonymi równomiernie. Davis (1980) i Noborio (2001) zaproponowali sondę dwuprętową, w której falowodami pomiarowymi wprowadzanymi w badany ośrodek są rurki PCW o średnicy 32 mm z paskami aluminiowymi, długość prętów wynosi 85 cm, a rozstaw 10 cm. Innym przykładem są sondy, w których elementami pomiarowymi są metalowe, elastyczne wstążki stosowane do pomiarów wilgotności ośrodków gruntowych pod ulicami (Schleager, 2005; Bhuyan i in., 2015).



Rys. 2.2.7. Laboratoryjna sonda LP/ms (ETest)



Rys. 2.2.8. Terenowa sonda FP/mts (ETest)

Na rysunkach 2.2.7 i 2.2.8 zaprezentowano przykłady sond polskiego producenta aparatury TDR – firmy ETest. Przedstawiony na rysunku 2.2.7 czujnik to mini sonda do zastosowań laboratoryjnych LP/ms, umożliwiająca pomiary wilgotności oraz zasolenia materiału. Na rysunku 2.2.8 pokazano sondę terenową (FP/mts) wzbogaconą o pomiar temperatury z wykorzystaniem czujnika AD592C.

Do istotnych parametrów sondy należą: materiał, z którego wykonano pręty, długość pręta, rozstaw osi prętów oraz ich średnica. Materiałem, z którego wykonuje się sondy, jest najczęściej stal nierdzewna. Sondę laboratoryjną LP/ms zbudowano z dwóch równoległych prętów ze stali nierdzewnej o długości 10 cm i średnicy pręta równej 0,8 mm. Rozstaw między prętami wynosi 5 mm. Obudowa sondy jest stalowa z możliwością demontażu plastikowego, gwintowanego zakończenia.

Długość pręta pomiarowego ma duży wpływ na oznaczanie położenia pików pomiarowych na reflektogramie, a tym samym na wyznaczenie przenikalności dielektrycznej ośrodka (Noborio, 2001). Sondy o krótkich falowodach pomiarowych (o długości poniżej 0,1 m) są niezalecane, ze względu na wysoką niepewność pomiarową (Topp i in., 1984). Długość typowych sond TDR zawiera się w przedziale od 2,1 cm do 100 cm (Topp i in., 1982; Amato, Ritchie, 1995; Ren i in., 1999). Średnice prętów pomiarowych wahają się od 0,13 cm do 1,27 cm (Topp i in., 1982; Hudson in., 1996), zaś rozstaw prętów między 0,5 cm, a 10 cm (Zegelin i in., 1989; Malicki i in., 1992).

Według Zegelin'a i in. (1992) oraz Ren'a i in. (1999) istnieją określone zasady doboru wymiarów prętów: średnicy, długości oraz ich rozstawu. Minimalną długością zalecaną do badań jest 5 cm, krótsze wymiary powodują zmniejszenie dokładności pomiaru, natomiast maksymalna długość waha się w przedziale

10–200 cm (Zegelin i in., 1989), co jest uwarunkowane stratą energii sygnału wzdłuż pręta umieszczonego w niejednorodnym, zasolonym ośrodku. Według Dalton'a (1992) maksymalna długość pręta pomiarowego może być opisana następującym wzorem:

$$L_{max} = \frac{\ln(V_1/V_2)\sqrt{\varepsilon}}{12\pi\sigma} \quad (2.2.4)$$

gdzie: L_{max} – maksymalna długość pręta [m], V_1 , V_2 – napięcie prądu wzbudzącego, napięcie odbicia [V], ε – przenikalność dielektryczna ośrodka [-], σ – konduktywność ośrodka [dS/m].

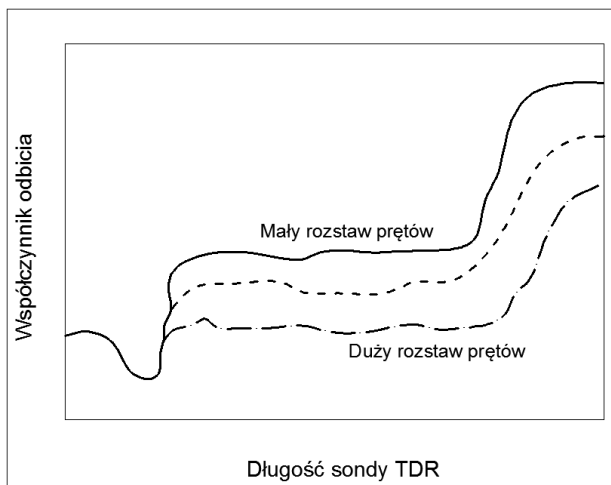
Minimalną długość opisuje formuła (Zegelin i in., 1992):

$$L_{min} = \frac{tc}{2\sqrt{\varepsilon}} \quad (2.2.5)$$

gdzie: L_{min} – minimalna długość pręta [m], t – czas propagacji impulsu w ośrodku porowatym równy podwójnej długości pręta [s].

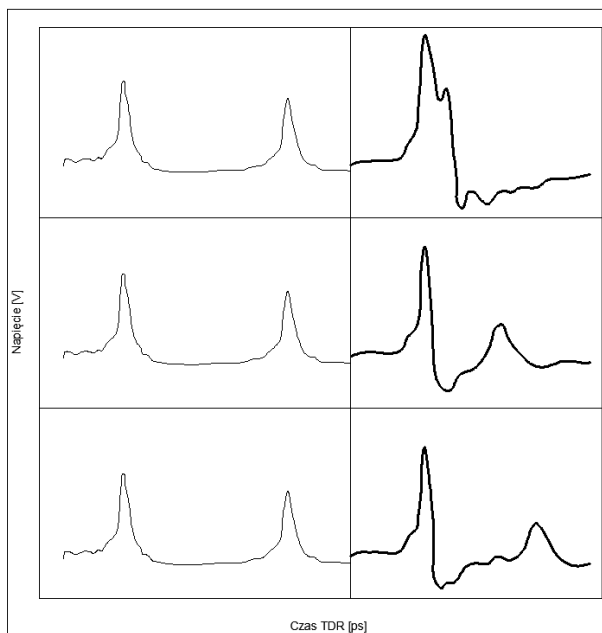
Kolejnym istotnym kryterium dotyczącym geometrii sensora TDR jest objętość pomiarowa zależna od rozstawu prętów pomiarowych. Według Knight'a (1992) mały rozstaw prętów skutkuje małym zasięgiem pomiaru. Dla odmiany, duży rozstaw prętów zwiększa zasięg pomiaru sondy, ale ma wpływ na czas narastania sygnału powracającego. W związku z powyższym, maksymalny dopuszczalny rozstaw prętów pomiarowych wynosi ok. 10 cm (Knight, 1992; Zegelin i in., 1992). Dodatkowym kryterium, które powinno być rozważone przy doborze wymiarów czujnika, jest stosunek rozstawu prętów pomiarowych do średnicy pręta (r/d). Według Knight'a (1992) stosunek ten nie powinien być większy niż 10. Natomiast dla sond trójprętowych, centralny pręt nie powinien być mniejszy niż 10-krotność średnicy średniej cząsteczki badanego ośrodka (Zegelin i in., 1989; Knight, 1992; Mohamed, 2006).

Rozstaw prętów ma wpływ na zasięg obszaru pomiarowego sensora. Obrazuje to rysunek 2.2.9, z którego wynika, że większy rozstaw wpływa na większy obszar pomiarowy (Mohamed, 2006).



Rys. 2.2.9. Współczynnik odbicia przy stałej wilgotności materiału w zależności od długości rozstawu prętów pomiarowych (źródło: opracowanie własne na podstawie Mohamed, 2006)

Zasadę pomiaru przy wykorzystaniu zestawu miernik-sonda produkowanego przez ETest można opisać następująco. Impuls elektromagnetyczny o czasie narastania i opadania ok. $3 \cdot 10^{-10}$ s (300ps) emitowany przez generator propaguje wzdłuż kabla koncentrycznego o stałej i niezmienniej wartości przenikalności dielektrycznej (Malicki, Skierucha, 1989). Zmiany impedancji w układzie przewód-sonda wywołują odbicia sygnału wykorzystywane do oznaczania czasu propagacji impulsu wzdłuż prętów pomiarowych. Jedno odbicie (początkowe) pojawia się w miejscu przejścia kabla w sondę, a drugie na końcu sondy. Odbicia sygnału są odbierane przez miernik w postaci tak zwanego reflektogramu (rys. 2.2.10), który może być interpretowany automatycznie przez specjalne algorytmy komputerowe, może być również analizowany w oscyloskopie.



Rys. 2.2.10. Reflektogramy TDR w zależności od zawartości wody w układzie – sonda laboratoryjna LP/ms, ETest (opracowanie na podstawie własnych badań kalibracyjnych)

Rysunek 2.2.10 przedstawia typowe reflektogramy TDR uzyskane na mierniku z wykorzystaniem sond produkcji firmy ETest. Wykonano je dla trzech ośrodków różniących się wilgotnością, a tym samym – wartością przenikalności dielektrycznej. Pierwszy z prezentowanych reflektogramów wskazuje na ośrodek suchy. Dwa piki z lewej strony mają charakter kontrolny i służą zdefiniowaniu skali czasowej przebiegu sygnału. Są one rezultatem celowego zaburzenia ciągłości przewodu i są niezależne od warunków, w jakich wykonywane są pomiary, dlatego odgrywają istotną rolę przy kalibracji czujników. Kolejne piki są znaczące dla pomiarów i są rezultatem zmian impedancji na skutek zmian charakterystyki materiału dielektrycznego. Pierwszy z nich oznacza początek sondy, a drugi jej zakończenie. W materiale suchym, gdzie przenikalność dielektryczna jest niska, czas propagacji sygnału jest niewielki, co skutkuje małą odległością pomiędzy pikami. Reflektogram środkowy charakteryzuje materiał częściowo nasycony wodą (stan typowy dla większości ośrodków porowatych). Wzrost przenikalności dielektrycznej ośrodka zmniejsza prędkość impulsu, czego skutkiem jest wydłużenie czasu propagacji sygnału. Dolny reflektogram uzyskano wprowadzając czujnik do wody, której przenikalność dielektryczna ma największą wartość 80.

2.2.3. Charakterystyki dielektryczne ośrodków porowatych

2.2.3.1. Modele fizyczne

Materiały stosowane w budownictwie są w większości ośrodkami porowatymi, różniącymi się porowatością, gęstością, strukturą i rodzajem fazy stałej. W stanach powietrznie suchych dominuje faza stała i powietrzna. Biorąc pod uwagę wartości przenikalności dielektrycznej przedstawione w tabeli 2.2.1 należy mieć świadomość, że na wypadkową wartość przenikalności dielektrycznej mają wpływ wartości przenikalności poszczególnych faz oraz ich udziały w materiale.

Przenikalność dielektryczna materiałów w stanie nienasyconym zależy od udziałów poszczególnych faz, głównie wody (Skierucha, 2005; Suchorab, Sobczuk, 2009; Černý, 2009). W stanach nasyconych na wartość przenikalności wpływa przenikalność dielektryczna wody (wynosząca 80 [-]) oraz porowatość materiału.

Relacja pomiędzy parametrami dielektrycznymi wykazywanymi przez wilgotne ośrodki porowate, a wilgotnością ośrodka, obrazowana jest najczęściej w postaci modeli fizycznych oraz empirycznych (Suchorab, Sobczuk, 2009; Černý, 2009).

Zaletą modeli fizycznych jest pewne uniezależnienie od badań kalibracyjnych. Do wad zaliczyć należy ogólny, często skomplikowany opis matematyczny.

Według pierwotnych opracowań opisujących parametry dielektryczne ośrodków porowatych, traktowanych jako mieszanina trójskładnikowa (Wiener, 1912), wypadkową (efektywną) przenikalność dielektryczną ośrodka porowatego można opisać następującymi formułami:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{f_1}{\varepsilon_1} + \frac{f_2}{\varepsilon_2} + \frac{f_3}{\varepsilon_3}} \quad (2.2.6)$$

$$\varepsilon_{eff} = f_1\varepsilon_1 + f_2\varepsilon_2 + f_3\varepsilon_3 \quad (2.2.7)$$

gdzie: ε_j – przenikalności dielektryczne poszczególnych faz, f_j – udziały objętościowe poszczególnych faz.

Wzór (2.2.6) opisuje tak zwaną dolną granicę, a wzór (2.2.7) – górną granicę efektywnej przenikalności dielektrycznej mieszaniny. Rzeczywiste mieszaniny wykazują efektywną przenikalność o wartości należącej do przedziału wyznaczonego tymi równaniami.

Inny popularny model dielektryczny ośrodka porowatego, proponuje Lichteneker (1926). W zasadzie model ten należy rozpatrywać w kategoriach uproszczonej formuły Wiener'a. Jego postać matematyczna jest następująca:

$$\varepsilon_{eff}^k = f_1 \varepsilon_1^k + f_2 \varepsilon_2^k + f_3 \varepsilon_3^k \quad (2.2.8)$$

gdzie: k jest parametrem odpowiadającym wartościom granicznym modelu Wiener'a. Przyjmuje on wartości z przedziału od -1 do 1 i zależy od izotropii/anizotropii ośrodka (Goncharenko i in., 2000).

Innymi modelami opisującymi parametry dielektryczne ośrodków porowatych są modele: Rayleigh'a (Rayleigh, 1892) – wzór (2.2.9), Maxwell Garnett'a (Maxwell Garnett, 1904) – wzór (2.2.10) oraz Bruggeman'a (Bruggeman, 1935) – wzór (2.2.11):

$$\frac{\varepsilon_{eff}-1}{\varepsilon_{eff}+2} = \sum_{j=1}^3 f_j \left(\frac{\varepsilon_j-1}{\varepsilon_j+2} \right) \quad (2.2.9)$$

$$\frac{\varepsilon_{eff}-\varepsilon_1}{\varepsilon_{eff}+2\varepsilon_1} = \sum_{j=2}^3 f_j \left(\frac{\varepsilon_j-\varepsilon_1}{\varepsilon_j+2\varepsilon_1} \right) \quad (2.2.10)$$

$$\frac{\varepsilon_{eff}-\varepsilon_1}{\varepsilon_{eff}+2\varepsilon_{eff}} = \sum_{j=2}^3 f_j \left(\frac{\varepsilon_j-\varepsilon_1}{\varepsilon_j+2\varepsilon_{eff}} \right) \quad (2.2.11)$$

Model zaproponowany przez Polder'a i van Santen'a (1946) uwzględnia kształt i morfologię ośrodków. Z tego powodu wyrażony jest w postaci trzech równań, z których pierwsze (2.2.12) dotyczy ośrodków o ziarnach w kształcie sferycznym, drugie (2.2.13) – porów w kształcie igieł, a trzecie (2.2.14) – ziaren w kształcie dysków:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 + \sum_{j=2}^3 f_j (\varepsilon_j - \varepsilon_1) \cdot \frac{3\varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_j} \quad (2.2.12)$$

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 + \sum_{j=2}^3 f_j (\varepsilon_j - \varepsilon_1) \cdot \frac{5\varepsilon_{eff} + \varepsilon_j}{3\varepsilon_{eff} + 3\varepsilon_j} \quad (2.2.13)$$

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_1 + \sum_{j=2}^3 f_j (\varepsilon_j - \varepsilon_1) \cdot \frac{2\varepsilon_j + \varepsilon_{eff}}{3\varepsilon_j} \quad (2.2.14)$$

Model autorstwa Tinga (Tinga i in., 1973) opisany jest następującym równaniem:

$$\varepsilon_a = \left[\theta \cdot \varepsilon_w^\beta + (1-\phi)\varepsilon_s^\beta + (\phi-\theta)\varepsilon_g^\beta \right]^{1/\beta} \quad (2.2.15)$$

gdzie: ε_w , ε_s , ε_g – przenikalność dielektryczna poszczególnych faz, odpowiednio ciekłej, stałej i gazowej [-], θ – wilgotność ośrodka [cm^3/cm^3], ϕ – porowatość [cm^3/cm^3], β – wskaźnik geometryczny, nie posiadający znaczenia fizycznego [-]. Należy przyjmować $\beta = -1$ dla materiałów uwarstwionych, $\beta = 1$ dla ośrodków izotropowych oraz $\beta = 2$ dla mieszanin poszczególnych faz, $\beta = 0,5$ dla ośrodków jednorodnych i izotropowych, $\beta = 0,46$ dla różnych materiałów (Birchak i in., 1974).

Równanie Whalley'a (1993) jest następujące:

$$\sqrt{\varepsilon_a} = \theta(\sqrt{\varepsilon_w} - 1) + \frac{\rho_b}{\rho_p}(\sqrt{\varepsilon_s} - 1) + 1 \quad (2.2.16)$$

gdzie: ρ_b – gęstość ośrodka w stanie suchym [g/cm^3], ρ_p – gęstość cząstki [g/cm^3].

Model Birchak'a i in. (1974) uwzględnia obecność w mieszaninie zarówno wody wolnej, jak też związanej fizycznie (sorpcyjnej), o niższej wartości przenikalności dielektrycznej od wody wolnej. Równanie zaproponowane w modelu jest następujące:

$$\varepsilon_a = [(\theta - \theta_{bw}) \cdot \varepsilon_{fw}^\beta + \theta_{bw} \cdot \varepsilon_{bw}^\beta + (1 - \phi) \varepsilon_s^\beta + (\phi - \theta) \varepsilon_g^\beta]^{1/\beta} \quad (2.2.17)$$

gdzie: θ – całkowita wilgotność objętościowa [cm^3/cm^3], θ_{bw} – zawartość wody związanej fizycznie [cm^3/cm^3], ε_{fw} – przenikalność dielektryczna wody wolnej [-], ε_{bw} – przenikalność dielektryczna wody związanej fizycznie [-].

Ważnym w opisie parametrów dielektrycznych wilgotnych ośrodków porowatych jest model de Loor'a (De Loor, 1968). Jest to model geometryczny, uwzględniający dyspersję czterech komponentów modelowanego ośrodka. Model ten bazuje na modelu Polder'a - van Santen'a (Polder, van Santen, 1946) i równaniu z ziarnami w kształcie dysków. Może być stosowany do opisu ośrodków porowatych, do których zaliczamy materiały budowlane. Ogólna postać równania de Loor'a jest następująca:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_s + \sum_{i=1}^3 \frac{V_i}{3} (\varepsilon_i - \varepsilon_s) \sum_{j=1}^3 \frac{1}{\left(A_j \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon^e} - 1 \right)} \quad (2.2.18)$$

gdzie: ε_m , ε_s , ε_i , ε_e – przenikalności dielektryczne mieszaniny fazy stałej, wody kapilarnej i wolnej, powietrza oraz względna przenikalność na powierzchniach granicznych [-], V_i – objętość odpowiedniej fazy [cm^3], A_j – parametr reprezentujący wpływ geometrii [-].

Inny model, stanowiący rozszerzenie modelu Lichtenecker'a (1926), zaproponowano w artykule Dobson'a i in. (1985). Opisany jest on równaniem, które uwzględnia wodę związaną fizycznie oraz wolną:

$$\theta = \frac{\varepsilon_{eff}^\alpha - \theta_{bw}(\varepsilon_{bw}^\alpha - \varepsilon_{fw}^\alpha) - (1 - \psi)\varepsilon_s^\alpha - \psi\varepsilon_a^\alpha}{\varepsilon_{fw}^\alpha - \varepsilon_a^\alpha} \quad (2.2.19)$$

gdzie: ε_{bw} , θ_{bw} oznaczają przenikalność dielektryczną i zawartość wody związanej fizycznie (ang. bound water), ε_{fw} , θ_{fw} - przenikalność dielektryczną i zawartość wody wolnej (ang. free water).

Popularnym w literaturze światowej modelem właściwości dielektrycznych ośrodka porowatego jest model Roth'a (Roth i in., 1990), według którego przenikalność dielektryczna może być wyrażona wzorem:

$$\varepsilon = \left[(1 - \phi) \varepsilon_s^\gamma + \theta \varepsilon_w^\gamma + (\phi - \theta) \varepsilon_a^\gamma \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.2.20)$$

gdzie: ε_s , ε_w i ε_a , –przenikalności dielektryczne odpowiednio fazy stałej, wody i powietrza. Wartości graniczne dla wykładnika γ należą do przedziału od -1 (dla układu szeregowego trzech faz) do 1 (dla układu równoległego trzech faz).

Wilgotność materiału można wyznaczyć ze wzoru:

$$\theta = \frac{1}{\varepsilon_w^{0,5} - 1} \varepsilon^{0,5} - \frac{\rho_b}{\rho_s} \cdot \frac{\varepsilon_s^{0,5} - 1}{\varepsilon_w^{0,5} - 1} - \frac{1}{\varepsilon_w^{0,5} - 1} \quad (2.2.21)$$

Model Roth'a dobrze odwzorowuje zależność pomiędzy wilgotnością oznaczaną miernikiem TDR, a danymi uzyskanymi z badań grawimetrycznych. Jednak ze względu na dużą liczbę parametrów jest trudny do zastosowania w praktyce.

W literaturze znany jest również trójfazowy model sferyczny Friedmana, w którym wewnętrzna faza oznaczona jako ε_3 otoczona jest przez fazę ε_2 , która z kolei otoczona jest przez fazę ε_1 . Model opisuje następujące równanie:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{3\varepsilon_1[(\varphi_3 + \varphi_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(2\varepsilon_2 + \varepsilon_3) - \varphi_3(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)(2\varepsilon_2 + \varepsilon_1)]}{\zeta} \quad (2.2.22)$$

oraz

$$\zeta = (2\varepsilon_2 + \varepsilon_2)(2\varepsilon_2 + \varepsilon_3) - \frac{2\varphi_3}{(\varphi_3 + \varphi_2)} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3) - (\varphi_3 + \varphi_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(2\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + \varphi_3(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)(2\varepsilon_2 + \varepsilon_1) \quad (2.2.23)$$

gdzie: współczynniki φ_1 , φ_2 , φ_3 oznaczają udziały objętościowe faz zewnętrznej, pośredniej i wewnętrznej. Według autora modelu jako fazę wewnętrzną można traktować suchą glebę ($\varphi_3 = 1 - \Phi$), fazę pośrednią stanowi woda ($\varphi_2 = \theta$), a fazę zewnętrzną - powietrze ($\varphi_1 = \Phi - \theta$).

Interesującym, prostym modelem o charakterze fizycznym jest model zaproponowany przez Noborio i in. (1999), w którym wilgotność ośrodka porowatego uzależniono od przenikalności dielektrycznej za pomocą następującej formuły:

$$\theta = a + b \cdot \varepsilon^c \quad (2.2.24)$$

gdzie: a , b i c są stałymi wynikającymi z kalibracji.

2.2.3.2. Modele empiryczne

Inne podejście stanowią modele empiryczne, tworzone na podstawie pomiarów laboratoryjnych i bazujące na korelowaniu wyników pomiarów wilgotności metodą grawimetryczną z odczytami przenikalności dielektrycznej. Wśród modeli empirycznych wyróżniamy modele uniwersalne oraz indywidualne. Modele uniwersalne wyprowadzono na podstawie badań wielu różnorodnych ośrodków, modele indywidualne dotyczą danego materiału, czujnika lub związane są z daną procedurą badawczą.

Do najczęściej cytowanych modeli empirycznych, stosowanych w praktycznej ocenie wilgotności ośrodka, zaliczamy model Topp'a (Topp i in., 1980), który przyjmuje postać wielomianu trzeciego stopnia:

$$\theta = \frac{-530 + 292\varepsilon - 5.5\varepsilon^2 + 0.043\varepsilon^3}{10000} \quad (2.2.25)$$

gdzie: θ – objętościowa zawartość wody w badanym ośrodku porowatym [cm^3/cm^3], ε – przenikalność dielektryczna ośrodka zmierzona techniką TDR [-].

Wilgotność objętościowa w równaniu (2.2.25) zależy wyłącznie od przenikalności dielektrycznej. W praktyce, model ten pozwala na szybkie szacowanie wilgotności wielu ośrodków bez konieczności dokładnej znajomości charakteru badanego ośrodka oraz kalibracji czujnika względem danego materiału. Metoda ta nie zawsze daje jednak zadawalające wyniki. Według Schapp'a i in. (1996) niepewność pomiaru z wykorzystaniem techniki TDR i formuły Topp'a może zawierać się nawet w przedziale od 0,05 do 0,15 cm^3/cm^3 a główną przyczyną są różnice w budowie fazy stałej badanego ośrodka. Według badań Černý'ego (2009), niepewność standardowa pomiaru wynosi 0,0468 cm^3/cm^3 . Dodatkowo należy mieć na uwadze, iż wzór (2.2.25) powinien być stosowany dla materiałów o gęstości nasypowej zbliżonej do 1500 kg/m^3 . Według Jones'a i in. (2002) oraz Skieruchy (2005), formuła Topp'a dotyczy tylko stanów wilgotnościowych poniżej 0,5 cm^3/cm^3 i nie nadaje się do stosowania w glebach organicznych oraz mineralnych z dużą zawartością materii organicznej i gliny.

Alternatywny model, który pozwolił na zwiększenie dokładności pomiaru, został zaproponowany w pracy Malickiego i in. (1996). Model ten uwzględniał gęstość materiału w stanie suchym, co pozwoliło na dokładniejsze odwzorowanie zależności wilgotność-przenikalność dielektryczna w materiałach charakteryzujących się różnymi cechami fazy stałej (Skierucha, 2005). Model wyrażono w postaci pół-empirycznej formuły matematycznej:

$$\theta = \frac{(\varepsilon^{0.5} - 0.819 - 0.168\rho - 0.159\rho^2)}{7.17 + 1.18\rho} \quad (2.2.26)$$

gdzie: ρ – gęstość materiału w stanie suchym [g/cm^3].

Pół-empiryczne modele przedstawione powyżej charakteryzują się dużą uniwersalnością, dlatego są powszechnie stosowane w badaniach reflektometrycznych. Umożliwiają pomiary wilgotności ośrodków porowatych z akceptowalną dokładnością. Według Černý'ego (2009) niepewność standardowa szacowania wilgotności wynosi $0,0269 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Większość doniesień literaturowych podaje, że niepewność standardowa wynosi około $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, czyli $2\%_{\text{vol}}$ (Noborio, 2001; Evett, 2003; Piotrowski, 2009). Według Amato i Ritchie (1995) niepewność ta wynosi $0,023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co koresponduje z niepewnością standardową wykazywaną przez Topp'a i in. (1984) rzędu $0,022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ w warunkach polowych.

Interesującym modelem, który można zaliczyć do grupy modeli empirycznych, jest model zaproponowany przez Wu i in. (2010). Jest to model bazujący na odwrotnym modelu Van Genuchten'a, odzwierciedlającym charakterystyki retencjonowania wody (van Genuchten i in., 1980). Jego podstawę stanowi wzór (2.1.6) przedstawiony w rozdziale 2.1, poświęconym problemom zawilgocenia przegród. Matematyczny zapis jest następujący:

$$\varepsilon = A \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(1-\theta)]^n} \right\}^{1 - \frac{1}{n}} + B \quad (2.2.27)$$

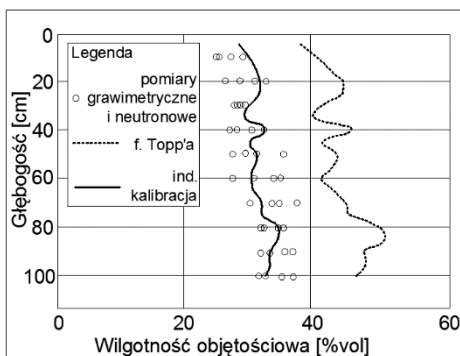
gdzie: A , B , α , n – parametry empiryczne.

Zdaniem Wu i in. (2010) model ten lepiej odwzorowuje zmniejszenie przenikalności dielektrycznej w stanach zbliżonych do nasycenia, co nie jest uwzględniane w innych modelach.

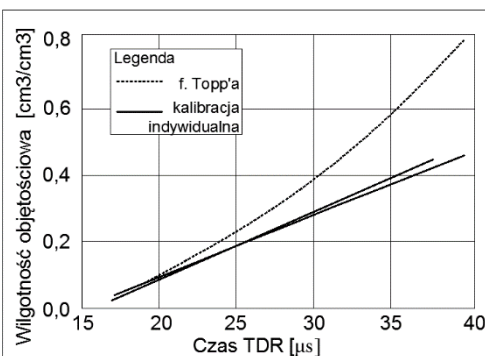
Modele empiryczne przedstawione w dalszej części podrozdziału pochodzą z literatury światowej oraz krajowej i są efektem indywidualnej kalibracji dla przyjętego ośrodka porowatego. Zdaniem wielu autorów, takie podejście umożliwia uzyskanie bardziej dokładnych odczytów. Jak wykazuje Černý (2009), podstawienie pod formułę Topp'a (2.2.25) wartości przenikalności dielektrycznej ε zbliżonej do 1 daje odczyty wilgotności θ poniżej zera, co jest sprzecznością. Również dla pewnych konfiguracji przenikalności dielektrycznej i gęstości objętościowych ośrodka, formuła Malickiego (2.2.26) daje niezadowolające wyniki (szczególnie dla ośrodków o nietypowej budowie, kapilarności lub składzie chemicznym). Potwierdzają to również badania przeprowadzone na betonie komórkowym (Fiala i in., 2006). W tym przypadku nie sprawdziło się równanie

Topp'a (Topp i in., 1980), podobnie równanie Malickiego (Malicki i in., 1996) generowało fałszywe wyniki w wysokich zakresach wilgotności. Quinones i Ruelle (2001) wykazali rozbieżności pomiędzy wilgotnością oznaczaną w glebie techniką grawimetryczną i neutronową, co wskazuje na potrzebę indywidualizowania formuł kalibracyjnych. Interesująca jest wizualizacja tego problemu, przedstawiona na rysunku 2.2.11. Profil wilgotnościowy w kolumnie wskazuje, iż wilgotność oznaczana tradycyjnym równaniem daje zafałszowane wartości. Zastosowanie indywidualnego równania kalibracyjnego eliminuje ten problem i pozwala uzyskać prawidłowe wartości wilgotności ośrodka.

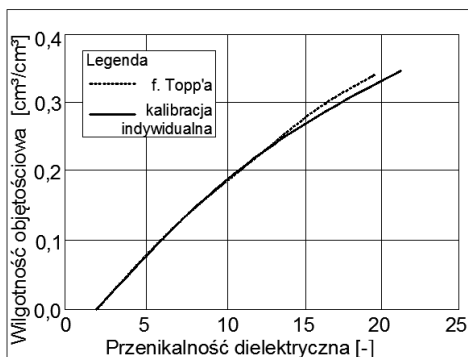
Na rysunkach 2.2.11–2.2.16 przedstawiono zależności, wykazujące znaczące rozbieżności pomiędzy odczytami rzeczywistymi, a pół-empirycznymi formułami proponowanymi w literaturze.



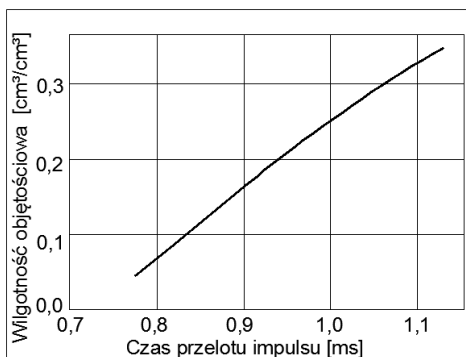
Rys. 2.2.11 Profil wilgotnościowy kolumny z odczytami wilgotności za pomocą technik grawimetrycznych, neutronowych oraz TDR z zastosowaniem dwóch formuł kalibracyjnych – standardowej (Topp'a) oraz indywidualnej (źródło: opracowanie własne na podst. Quinones, Ruelle, 2001).



Rys. 2.2.12. Zależność pomiędzy czasem propagacji zmierzonym przyrządem CS616 firmy Campbell Sci. Inc., Logan, UT, a wilgotnością dwóch przebadanych gleb (źródło: opracowanie własne na podstawie Udawatta i in., 2011)



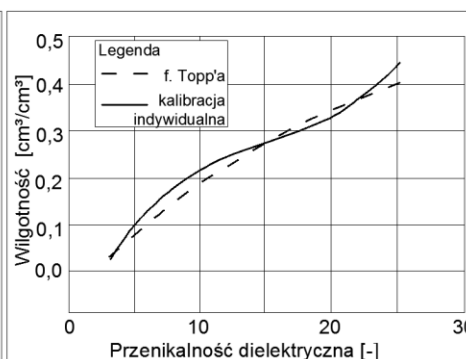
Rys. 2.2.13. Zależność pomiędzy wilgotnością objętościową i przenikalnością dielektryczną wg (Mastrorilli i in., 1998)



Rys.2.2.14. Zależność pomiędzy czasem propagacji impulsu (milisekundy), a wilgotnością gleby (na podst. Quinones, Ruelle, 2001)



Rys. 2.2.15. Zależność pomiędzy przenikalnością dielektryczną, a wilgotnością ośrodka (na podst. Lins i in., 2009)



Rys. 2.2.16. Zależność pomiędzy przenikalnością dielektryczną, a wilgotnością ośrodka (na podst. Ren i in., 2009)

W związku z niedoskonałościami uniwersalnych modeli, zasadnym wydaje się prowadzenie indywidualnej kalibracji względem danego materiału lub wykorzystanie formuł empirycznych dostępnych w literaturze, a określonych dla danego materiału. Kilka z nich przedstawiono poniżej.

Tabela 2.2.2. zawiera zestawienie formuł kalibracyjnych dla różnego rodzaju materiałów glebowych.

Tabela.2.2.2. Formuły kalibracyjne do wyznaczania wilgotności ośrodków porowatych na podstawie pomiarów TDR (opracowanie własne)

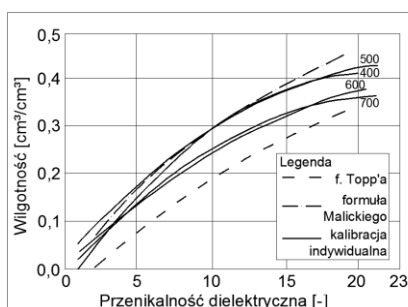
Równanie kalibracyjne	Badany ośrodek	Uwagi	Źródło
$\theta = 8,76 \cdot 10^{-5} \varepsilon^3 - 4,03 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2 + 7,01 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 0,161$	Gleby piaszczyste, piaski gliniaste	-	Reni in., 1999
$\theta = 0,034 \varepsilon^3 - 1,077 \varepsilon^2 + 12,7 \varepsilon - 25,83$	Gleby muliste z dużą ilością gliny	-	Mastrorilli i in., 1998
$\theta = 0,335 \tau^2 + 0,037 \tau - 0,187$	Aeolian sand	Równanie opisane względem czasu przelotu impulsu wzdłuż sondy TDR (τ)	Quinones, Ruelle, 2001
$\theta = 0,0197 \tau - 0,309$ ($R^2=0,92$) $\theta = -0,0011 \tau^2 + 0,0259 \tau - 0,387$ ($R^2=0,92$)	Putnam A	Równanie opisane względem czasu przelotu impulsu wzdłuż sondy TDR (τ)	Udawatta i in., 2011
$\theta = 0,0206 \tau - 0,278 - 0,0024 T$ ($R^2=0,96$) $\theta = 0,00012 \tau^2 + 0,0141 \tau - 0,193 - 0,0026 T$ ($R^2=0,96$)	Putnam A*		
$\theta = 0,0198 \tau - 0,339$ ($R^2=0,89$) $\theta = -0,0058 \tau^2 + 0,0115 \tau - 0,637$ ($R^2=0,91$)	Menfro A		
$\theta = 0,0206 \tau - 0,315 - 0,0020 T$ ($R^2=0,93$) $\theta = 0,00012 \tau^2 + 0,0141 \tau - 0,193 - 0,0026 T$ ($R^2=0,92$)	Menfro A*		
$\theta = 0,0103 \varepsilon - 0,19$	Distroferric Red Latosol	-	Soncela i in., 2013
$\theta = 0,1228 \varepsilon^{0,5} - 0,1322 \rho_b - 0,0152$ ($R^2=0,98$)	Gleby różnego typu	-	Ju i in., 2010
$\theta = -4,56 \cdot 10^{-5} \varepsilon^3 + 1,84 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2 + 5,01 \cdot 10^{-4} \varepsilon + 9,79 \cdot 10^{-2}$ $w = -3,3 \cdot 10^{-5} \varepsilon^3 + 1,7 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2 + 1,18 \cdot 10^{-2} \varepsilon + 9,55 \cdot 10^{-2}$	Gleba gliniasto-piaszczysta	- Wilgotność masowa [kg/kg]	Najm i in., 2008

* plus uwzględnienie wpływu temperatury

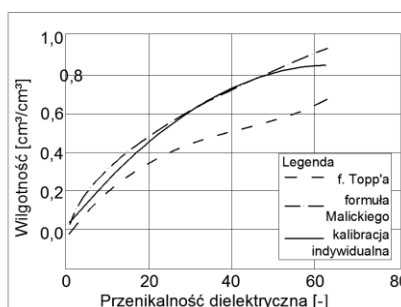
Udawatta i in. (2011) zaproponowali indywidualną procedurę kalibracji zastosowanego miernika. Formuły kalibracyjne przedstawione w tabeli 2.2.2 uzależniały wilgotność nie od przenikalności dielektrycznej ośrodka, a od czasu propagacji impulsu elektromagnetycznego przez pręty sondy pomiarowej CS616 firmy Campbell Sci. Inc., Logan, UT. W konsekwencji wyniki miały mało uniwersalny charakter. Należy jednak zwrócić uwagę, że autorzy artykułu (Udawatta i in., 2011) dla wybranych typów gleb podali dwa warianty modeli regresji – liniowy i wielomianowy drugiego stopnia z porównaniem współczynnika determinacji R^2 . Dodatkowo w rozważaniach teoretycznych uwzględniony został efekt temperaturowy, opisany zmienną T , oznaczającą temperaturę ($^{\circ}\text{C}$).

Z punktu widzenia problematyki, której poświęcona jest niniejsza praca, istotne są formuły empiryczne uzależniające wilgotność materiałów budowlanych od przenikalności dielektrycznej zmierzonej techniką TDR. Przedstawiono je między innymi w następujących pracach (Hansen, Hansen, 2002a; Sobczuk, Suchorab, 2005; Spalitabaka i in., 2007; Suchorab, Sobczuk, 2009; Pavlik i in., 2008).

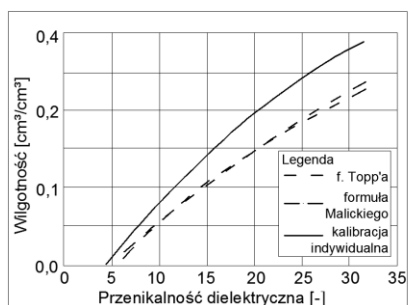
Na rysunkach 2.2.17–2.2.24 pokazano różnice pomiędzy odczytami wilgotności za pomocą TDR według klasycznych formuł oraz za pomocą badań grawimetrycznych. W tabeli 2.2.3 zamieszczono formuły kalibracyjne do wyznaczenia wilgotności niektórych materiałów za pomocą techniki TDR.



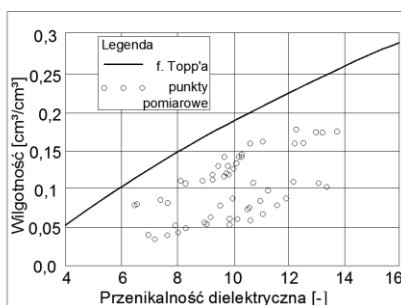
Rys. 2.2.17. Zależność pomiędzy przenikalnością dielektryczną odczytaną metodą TDR, a wilgotnością objętościową betonu komórkowego o gęstościach 400, 500, 600 i 700 kg/m³ (opracowanie na podst. Sobczuk, Suchorab, 2005)



Rys. 2.2.18. Zależność pomiędzy przenikalnością dielektryczną wyznaczoną techniką TDR oraz wilgotnością objętościową wyznaczoną w badaniach grawimetr., materiał – autoklawizowany silikat wapienny (Suchorab, Sobczuk, 2009)



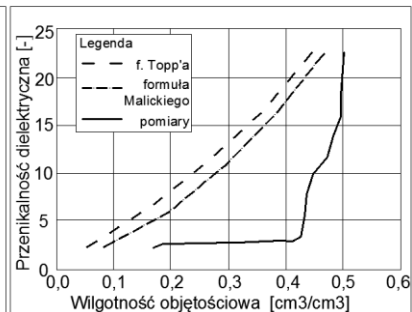
Rys. 2.2.19. Zależność pomiędzy przenikalnością dielektryczną i wilgotnością odczytaną techniką TDR, materiał – cegła ceramiczna pełna (Spalitabaka i in., 2007)



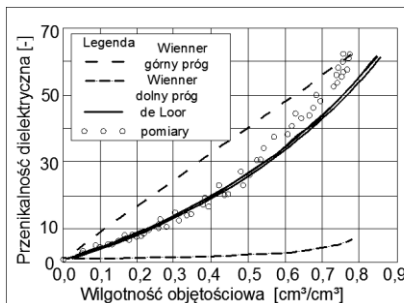
Rys. 2.2.20. Zależność przenikalności dielektrycznej od wilgotności w betonach oraz zaprawach (opracowanie własne na podst. Korhonen i in., 1997)



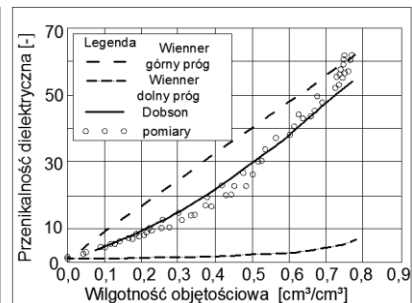
Rys. 2.2.21. Kalibracja sondy TDR do pomiarów wilgotności betonu komórkowego (opracowanie własne na podst. Hansen, 2002a)



Rys. 2.2.22. Zależność przenikalności dielektrycznej od wilgotności w gipsie – porównanie formuł empirycznych i pomiarów własnych (oprac. własne na podst. Pavlík i in., 2008)



Rys. 2.2.23. Zależność między przenikalnością dielektryczną wynikającą z badań TDR autoklawizowanego silikatu wapiennego, a modelem de Loor'a (oprac. własne na podst. Pavlík, 2006a)



Rys. 2.2.24. Zależność między przenikalnością dielektryczną wynikającą z badań TDR autoklawizowanego silikatu wapiennego, a modelem de Dobson'a (oprac. własne na podst. Pavlík, 2006a)

Na rysunku 2.2.22 poza rozbieżnościami między równaniami kalibracyjnymi, a odczytami za pomocą aparatury TDR, ukazano specyficzne cechy typowego materiału budowlanego, jakim jest gips nasycony wodą. Widoczny jest efekt hydratacji. Wzrost wilgotności ośrodka nie powoduje wzrostu wartości przenikalności dielektrycznej. Jest to spowodowane wiązaniem wody w sposób chemiczny do stanu hydratu $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Dopiero przekroczenie pewnej wartości krytycznej (ok. 45% vol) powoduje wyraźny wzrost przenikalności dielektrycznej, co należy rozumieć jako pojawienie się wody w postaci wolnej.

Tabela. 2.2.3. Formuły kalibracyjne do wyznaczania wilgotności materiałów budowlanych na podstawie pomiarów TDR (opracowanie własne)

Równanie kalibracyjne	Badany ośrodek	Uwagi	Źródło
$\theta = 0,0438\varepsilon + 0,120$	Beton komórkowy	Wilgotność ośrodka masowa [kg/kg] Regresja liniowa	Hansen, Hansen, 2002a
$\theta = 0,0001928\varepsilon^2 + 1,146\varepsilon + 4,425$	Cement portlandzki	-	Korhonen i in., 1997
$\theta = -0,001\varepsilon^2 + 0,0426\varepsilon - 0,0337$	Beton komórkowy 400 kg/m ³	-	Sobczuk, Suchorab, 2005
$\theta = -0,007\varepsilon^2 + 0,0336\varepsilon + 0,00202$	Beton komórkowy 500 kg/m ³	-	
$\theta = -0,0005\varepsilon^2 + 0,0287\varepsilon + 0,0068$	Beton komórkowy 600 kg/m ³	-	
$\theta = -0,0007\varepsilon^2 + 0,0329\varepsilon - 0,0105$	Beton komórkowy 700 kg/m ³	-	
$\theta = -0,0002\varepsilon^2 + 0,0266\varepsilon - 0,0034$	Autoklawizowany silikat wapienny	-	Suchorab, Sobczuk, 2009
$\theta = -0,0002\varepsilon^2 + 0,0261\varepsilon - 0,0069$	Autoklawizowany silikat wapienny	-	Pavlík i in., 2012
$\theta = -0,001\varepsilon^2 + 0,0408\varepsilon - 0,067$	Cegła ceramiczna pełna, gęstość pozorna 1600 kg/m ³	-	Spalibaka i in., 2007

2.2.4. Kalibracja urządzeń TDR do pomiarów wilgotności ośrodków porowatych

Przez pojęcie kalibracji w odniesieniu do urządzeń TDR należy rozumieć:

- kalibrację czujnika pod kątem wyznaczanych parametrów TDR,
- kalibrację pod kątem zależności wilgotności od przenikalności dielektrycznej (θ - ε).

Kalibracja czujnika pod kątem wyznaczanych parametrów TDR jest procedurą indywidualną, wynikającą z podstaw funkcjonowania techniki TDR, między innymi z tego, że fizyczna długość sondy nie zawsze pokrywa się z jej długością elektryczną. Zwracają na to uwagę między innymi Pavlík i Cerný (2004), Skierucha i in. (2008), Černý (2009). Długość ta zależy od kilku czynników, między innymi od długości poszczególnych interwałów pomiarowych odczytywanych przez konkretny egzemplarz miernika TDR, ale również od czasu propagacji impulsu w głowicy sondy, która jest elementem praktycznie każdego czujnika. W niektórych opracowaniach polsko- i anglojęzycznych czas propagacji impulsu

wewnątrz obudowy sondy nazywany jest „czasem martwym”, ang. „*dead time*” (Malicki, Skierucha, 1989).

Czas propagacji impulsu przez pręty pomiarowe sondy TDR zainstalowanej w wilgotnym materiale można opisać równaniem (Černý, 2009):

$$t_R = t_{TDR} - t_M \quad (2.2.28)$$

gdzie: t_{TDR} – czas zmierzony przez miernik TDR [ps], t_M – czas przepływu impulsu elektromagnetycznego przez obudowę sondy, „czas martwy” [ps].

Należy uznać, że wartość „czasu martwego” oraz czas trwania pojedynczego interwału pomiarowego są parametrami charakterystycznymi danego oprzyrządowania TDR, zależnymi od geometrii czujnika. Są one niewiadomymi, których wartość należy wyznaczać w drodze kalibracji indywidualnej. Kalibrację prowadzi się najczęściej przy wykorzystaniu mediów takich jak woda i powietrze (Hejmoavaara, de Water, 1993) lub, co jest zalecane, woda i benzen (Plagge i in., 1996). W artykule Skieruchy i in. (2008) zaleca się kalibrację przez zestawienie dwóch ośrodków o znacząco różnej przenikalności dielektrycznej. Mogą to być: powietrze, teflon, benzen, ertacetal, aceton, etanol, metanol i woda. Tabela 2.2.4 przedstawia wartości przenikalności dielektrycznej substancji stosowanych do kalibracji sond TDR.

Tabela 2.2.4. Wartości przenikalności dielektrycznej substancji stosowanych do kalibracji sond TDR

Substancja	Przenikalność dielektryczna [-]		
	Malicki, Skierucha, 1989	Skierucha i in., 2008	Mohamed A.M.O., 2006
Powietrze	0,96	1	-
Teflon	-	2,1	-
Benzen	2,21	2,3	2,3
Ertacetal	-	3,8	-
Aceton	20,7	21,2	20
Etanol	-	25,5	-
Metanol	-	33,6	33,6
Woda	83,8	80	80

2.2.5. Zastosowanie techniki TDR w badaniach parametrów środowiskowych

Metoda pomiarowa TDR od wielu lat jest z powodzeniem stosowana do pomiarów zawartości wody w ośrodkach gruntowych (Topp i in., 1980; Malicki i in., 1996; Schapp i in., 1996; Topp, Reynolds, 1998; Ponizovsky i in., 1999;

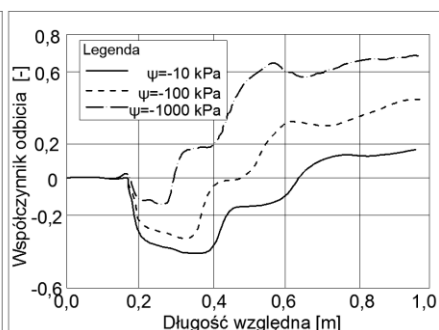
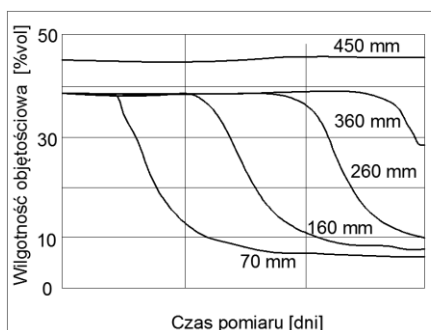
Robinson i in., 1999; Noborio, 2001; Mojid, Cho, 2002; Skierucha, Malicki, 2004; Chomczyńska, Suchorab, 2008; Suchorab i in., 2009c; Topp i in., 2003).

Istota techniki jest szczegółowo omówiona w literaturze przedmiotu (Noborio, 2001; Jones i in., 2002; Moret, i in., 2004; Topp, Reynolds, 1998; Jones, Or, 2003; Skierucha, 2000; Skierucha i in., 2008; Černý, 2009, Skierucha i in., 2012).

Technikę TDR wykorzystuje się do pomiarów wilgotności w zastosowaniach takich jak:

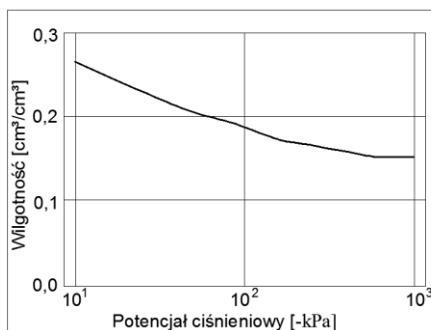
- laboratoryjne pomiary procesów transportu wody w ośrodkach gruntowych (Lee i in., 2001; Nissen, Moldrup, 1995),
- badanie procesów sorpcji-desorpcji w ośrodkach gruntowych na różnych głębokościach (Lins i in., 2009). Rysunek 2.2.25 przedstawia przebiegi tych procesów w postaci krzywych,
- sterowanie procesami automatycznego nawadniania (Wilczek i in., 2013),
- monitoring wilgotności, temperatury i zasolenia gleb (Skierucha i in., 2012; Jones i in., 2002, Robinson i in., 2003),
- określanie fizycznych parametrów ośrodków porowatych, takich jak gęstość objętościowa, porowatość (Ochsner i in., 2001), określanie zawartość wody związanej fizycznie siłami kapilarnymi w glebie (Lee i in., 2000),
- wyznaczanie krzywych retencji wodnej przy wykorzystaniu sond ψ - θ TDR do jednoczesnego pomiaru wilgotności objętościowej oraz potencjału ciśnieniowego, dzięki czemu możliwe jest ustalenie częściowego przebiegu krzywej retencji wodnej (Noborio i in., 1999). Na rysunku (2.2.26) przedstawiono reflektogramy dla ośrodków różniących się potencjałem ciśnieniowym. Inna możliwość to sprzężenie techniki TDR z sondą tensjometryczną (Malicki i in., 1989; Noborio i in., 1999; Toll i in., 2013) – rysunek 2.2.27, psychrometryczną (Guz i in., 2010) lub aparatem ciśnieniowym – rysunek 2.2.28 (Lins i in., 2009). Toll i in. (2013) zaprezentowali konstrukcję alternatywnego czujnika wyposażonego w ceramiczną sondę tensjometryczną oplecioną falowodami TDR,
- rekultywacja składowisk odpadów – laboratoryjna ocena właściwości wilgotnościowych gleb (Yanful i in., 2003; Chomczyńska, Suchorab, 2008), oraz prowadzenie badań terenowych (Quinones, Ruelle, 2001; Börner i in. 1996),

- badania procesów zamarzania i rozmarzania w ośrodkach glebowych (O'Connor, Dowding, 1999),
- badania transportu soli w ośrodkach glebowych (Nissen in., 1998; Wraith, Das, 1998)
- badania procesów ewapotranspiracji (Mastrorilli i in., 1998),
- badania przewodnictwa wodnego w stanie nienasyconym (Malicki i in., 1989).

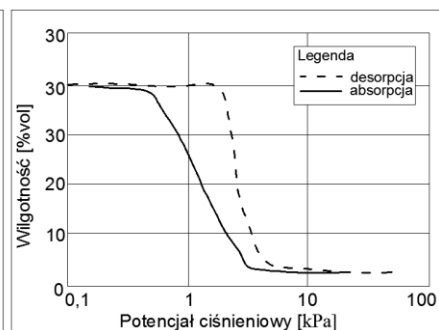


Rys. 2.2.25. Desorpcja wody w kolumnie glebowej monitorowana za pomocą techniki TDR (oprac. własne na podst. Lins i in., 2009)

Rys. 2.2.26. Reflektogramy TDR w glebach ilastych w zależności od potencjału ciśnieniowego (opracowanie własne na podstawie Noborio i in., 1999)



Rys. 2.2.27. Fragment krzywej retencji wodnej dla łu gliniastego wyznaczonej za pomocą sondy TDR sprzężonej z tensjometrem (oprac. własne na podst. Noborio i in., 1999).



Rys. 2.2.28. Krzywa retencji wodnej wyznaczona w przy zastosowaniu techniki TDR i aparatu płytowego (oprac. własne na podst. Lins i in., 2009)

2.3. Badania parametrów materiałów budowlanych za pomocą techniki TDR

Dysponując aparaturą TDR, stosownym oprogramowaniem i równaniami kalibracyjnymi, istnieje możliwość prowadzenia badań wilgotności w materiałach, oraz przegrodach budowlanych (Hansen, Hansen, 2002a; Plagge i in., 2005; Suchorab i in., 2005b; Fiala i in., 2006; Pavlík i in., 2006a; Pavlík, Cerný, 2004; Pavlík, Černý, 2005; Pavlík i in., 2005; Pavlík i in., 2006b; Pavlík i in., 2006c; Pavlík i in., 2007a, Pavlík i in., 2007b; Fiala i in., 2007; Fiala i in., 2008; Wróbel i in., 2007).

Technikę TDR wykorzystuje się do pomiarów wilgotności w materiałach i przegrodach budowlanych przez:

- laboratoryjny monitoring procesów podciągania kapilarnego wody przez próbki materiałów budowlanych, takich jak beton komórkowy (Hansen, Hansen, 2002a; Suchorab i in., 2010b; Suchorab in. 2011b; Suchorab, 2013b), FDG gips (Pavlík i in., 2008), silikat wapienny (Pavlík, i in., 2006c; Suchorab, Barnat-Hunek, 2011a), cegła ceramiczna pełna (Suchorab i in., 2009b; Suchorab, 2013a; Suchorab, 2013b; Barnat-Hunek i in., 2016), cegła silikatowa (Suchorab, 2013b) oraz keramzytobeton (Suchorab i in., 2016),
- określanie współczynnika dyfuzyjności (Hansen, Hansen, 2002b; Pavlík i in., 2006b),
- laboratoryjny monitoring procesów wilgotnościowych i cieplnych w wielowarstwowych przegrodach budowlanych (Cerný i in., 2001; Pavlík, Černý, 2005),
- określanie wpływu wilgotności na współczynnik przewodzenia ciepła materiałów budowlanych (Suchorab i in., 2011a),
- badanie procesów ciepło-wilgotnościowych w przegrodach budowlanych o różnej konstrukcji (Pavlík i in., 2006d) lub badanie nietypowych rozwiązań przegród budowlanych, takich jak przegrody z zagęszczonej ziemi lub z gliny ze słomą (Chabriac i in., 2014),
- pomiary terenowe służące do oceny stopnia zawilgocenia przegród budowlanych (Suchorab i in., 2008; Suchorab, 2011; Suchorab, Barnat-Hunek, 2011b; Suchorab, 2012; Suchorab i in., 2013),
- ocenę procesów transportu soli w materiałach budowlanych (Pavlík i in., 2009; Suchorab i in., 2009a; Suchorab, Widomski, 2011).

2.4. Koncepcja sondy powierzchniowej

Konstrukcja tradycyjnych sond TDR, których budowę omówiono w podrozdziale 2.2.2, znacząco utrudnia badania wilgotnościowe twardych materiałów porowatych, do których zaliczyć należy większość materiałów budowlanych. Wynika to z właściwości geometrycznych i mechanicznych elementów pomiarowych – czyli stalowych prętów. Są one cienkie i długie, a w przypadku sond LP/ms firmy ETest – wiotkie. Wspomniana konstrukcja umożliwia wygodne pomiary wilgotności w ośrodkach gruntowych, lecz w przypadku twardych materiałów budowlanych lub skał nie może być stosowana.

W związku z powyższym, większość badań wilgotnościowych materiałów budowlanych prowadzono w warunkach laboratoryjnych, które umożliwiały odpowiednie przygotowanie próbek. W tym celu prowadzono szereg działań przygotowawczych – nawiercano otwory pilotowe, w które wprowadzano pręty sond, wiercono otwory o większej średnicy, a pustki powietrzne pomiędzy prętami i materiałem wypełniano pyłem wiertniczym (Hansen, Hansen, 2002a; Pavlík i in., 2008; Spalítabaka i in., 2007; Pavlík i in., 2009; Černý i in., 2009). Niestety wszystkie te zabiegi zmieniały strukturę badanego materiału, a tym samym jego właściwości wodne. W związku z powyższym, uzyskane odczyty nie oddawały rzeczywistego stanu wilgotnościowego próbki, ponieważ charakteryzowały materiał przetworzony.

Rozwiązaniem problemu pomiarów wilgotności w twardych ośrodkach porowatych wydają się dwie koncepcje:

- konstrukcja sond TDR o odpowiednio dużych gabarytach, wykonana z prętów stalowych o odpowiednio dużej średnicy, dużym rozstawie prętów i wytrzymałej głowicy, taką konstrukcję przedstawiono m in. w opracowaniu (Sobczuk, Plagge, 2007),
- konstrukcję powierzchniowych sond TDR.

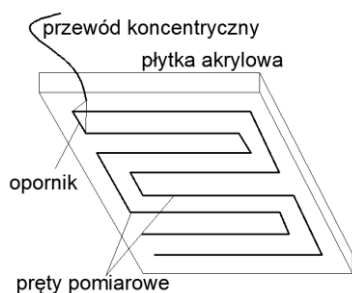
Pierwsze koncepcje powierzchniowego czujnika TDR pojawiły się w latach 90. minionego stulecia (Selker i in., 1993; Perrson, Berndtsson, 1998). Sonda zaproponowana przez Selker'a i in. (1993) była sondą z długiego mosiężnego przewodu ukształtowanego w sposób przedstawiony na rysunku 2.4.1 i przykrytego płytką akrylową. Sonda taka wymagała indywidualnej kalibracji $\varepsilon-\theta$, a niepewność pomiarowa czujnika wahała się w przedziale $\pm 0,02$ [cm^3/cm^3]. Z kolei idea działania sond zaproponowanych przez Perrson'a i Berndtsson'a (1998) polegała na zastosowaniu typowych sond trójprętowych, przykrywanych odpo-

wiednio wyżłobionym dielektrykiem o określonej grubości i parametrach dielektrycznych, dzięki czemu na zasadzie dotykowej możliwe było określenie parametrów dielektrycznych ośrodka poniżej przykrycia, a tym samym jego wilgotność (rys. 2.4.2). Było to rozwiązanie dosyć prymitywne, jednak umożliwiało w pewnym stopniu bezinwazyjną ocenę wilgotności ośrodka porowatego.

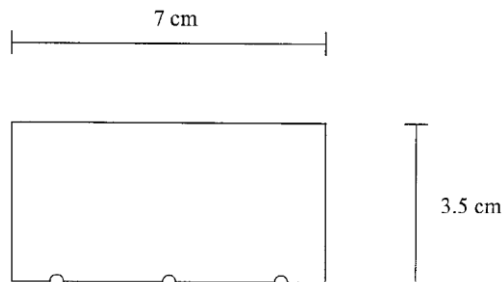
Interesujące rozwiązania sond powierzchniowych przedstawili Wraith i in. (2005), którzy zaproponowali odmienną konstrukcję czujnika do pomiaru wilgotności powierzchniowej warstwy gleby. Sonda w kształcie sanek mogła być ciągnięta po powierzchni ziemi podobnie jak georadar. Na tej podstawie odczytywano wilgotność górnych warstw gleby.

Inna konstrukcja sondy TDR do pomiarów ewaporacji wody z powierzchni gruntu została przedstawiona przez Ito i in. (2010). Jest to tak zwana sonda multi-TDR wykonana z uwarstwionego kompozytu szkła i żywicy epoksydowej, w której zatopiono 17 miedzianych elektrod w formie pasków o długości 100 mm, szerokości 0,02 mm i grubości 0,01 mm. Urządzenie składało się z 8 sprzężonych sond. Konieczne było wykonanie uprzedniej indywidualnej kalibracji przyrządu.

Nowym pomysłem z punktu widzenia bezinwazyjnych pomiarów z wykorzystaniem czujników TDR jest konstrukcja zaproponowana przez Choi i in. (2016), gdzie trójprętową sondę powierzchniową wyposażono dodatkowo w czujnik piezoelektryczny oraz akcelerometr, dzięki czemu możliwe są pomiary takich parametrów glebowych jak gęstość w stanie suchym, wilgotność oraz moduł elastyczności. Wszystkie badania można przeprowadzić bez konieczności naruszania powierzchni gruntu.



Rys. 2.4.1. Konstrukcja do pomiarów wilgotności powierzchniowych warstw gleby zaproponowana przez Selker'a i in. (1993)



Rys. 2.4.2. Blok powierzchniowy do pomiarów reflektometrycznych, opracowanie własne na podst. Perrson'a i Berndtsson'a (1998)

Koncepcja sondy powierzchniowej TDR do pomiaru wilgotności twardych materiałów została przedstawiona w zastrzeżeniu patentowym (Sobczuk, 2008). Jej prototyp i możliwości praktycznego zastosowania przedstawiono w literaturze przedmiotu (Sobczuk, Plagge, 2007; Suchorab i in., 2011c). Modyfikacje tego rozwiązania sond powierzchniowych TDR pozwalające na pomiary wilgotności w twardych ośrodkach porowatych o nieregularnej powierzchni przedstawiono w zastrzeżeniach patentowych (Sobczuk, Suchorab, 2011a; Sobczuk, Suchorab, 2011b; Sobczuk, Suchorab, 2011c).

Na podstawie badań literaturowych wykazano, że reflektometria w domenie czasu może być wykorzystywana w badaniach środowiskowych. Wykazano również, że istnieje potrzeba kontynuacji badań rozwojowych w celu zastosowania jej do diagnostyki stanu zawilgocenia przegród budowlanych, co wymaga zbudowania czujników odpowiedniej konstrukcji, a także opracowania odpowiedniej metodyki pomiarowej.

3. Część badawcza

3.1. Charakterystyka prototypowych sond

Technika TDR używana w gruntoznawstwie, po odpowiedniej adaptacji może być zastosowana w badaniach stanów wilgotnościowych twardych ośrodków porowatych, takich jak materiały i przegrody budowlane oraz skały. Opracowano autorskie prototypy sond powierzchniowych do pomiaru wilgotności tych ośrodków. Przedmiotem badań były

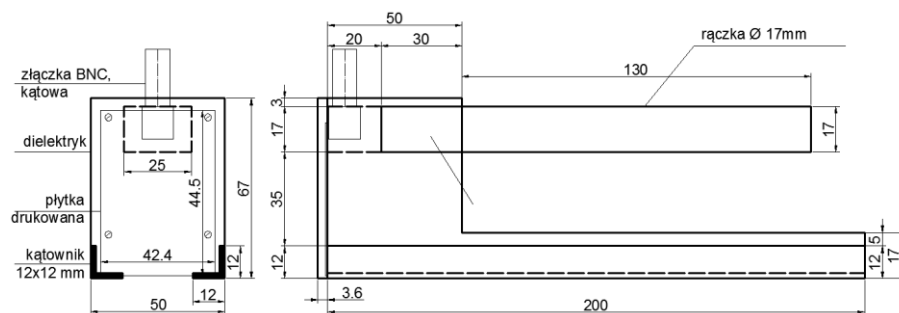
- sondy powierzchniowe, bezinwazyjne, oznaczone w dalszej części pracy symbolem „B”. Są to cztery konstrukcje (B1–B4) zróżnicowane z uwagi na rozstaw prętów, kształt falowodów, ilość prętów itp.,
- sondy powierzchniowe, bezinwazyjne, oznaczone symbolem „C”. Są to uproszczone konstrukcje składające się z prętów pomiarowych zdystansowanych cienkim dielektrykiem wykonanym z polichloru winylu (PCW).

3.1.1. Sonda powierzchniowa B1

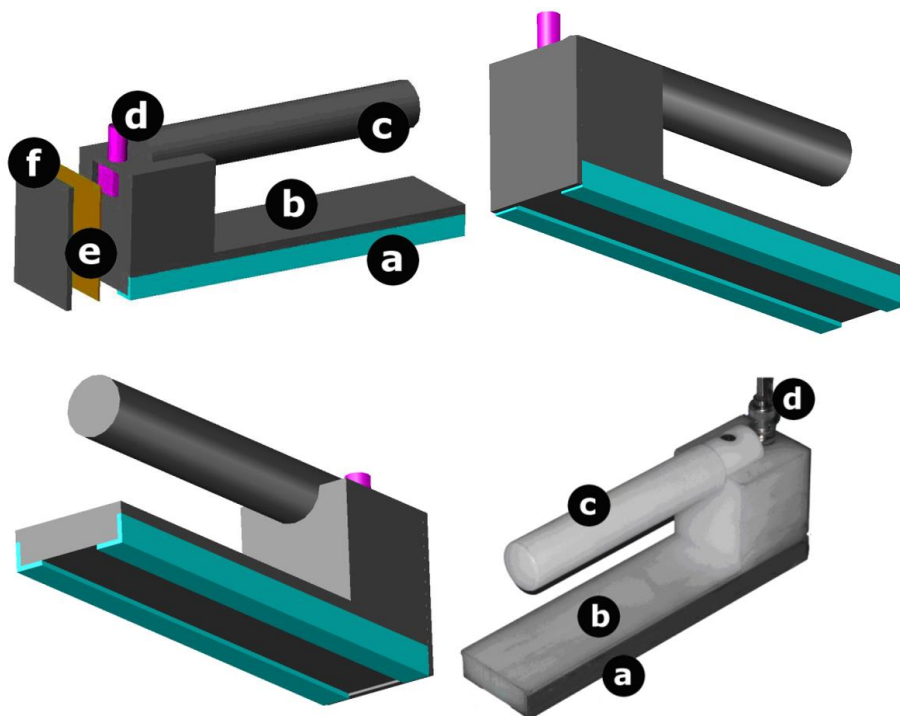
Sonda powierzchniowa B1 wykonana jest z białego politlenku metylenu (polioksymetyleny – ang. POM – polyoxymethylene), tworzywa sztucznego znanego na rynku pod nazwą handlową „ertacetal”. Jest to termoplast o korzystnych parametrach mechanicznych, takich jak wytrzymałość, sztywność i ciągliwość, stosowany jako tworzywo konstrukcyjne do produkcji napędów (rolek, wałków, kół zębatach, cięgien), a także obudów, korpusów, uchwytów itp. Z punktu widzenia realizowanych badań, poza wytrzymałością mechaniczną, ważnym parametrem materiału, stanowiącym o możliwości jego zastosowania, jest wartość przenikalności dielektrycznej na poziomie 3,8 [-] (Skierucha i in., 2008).

Długość sondy, a tym samym falowodu pomiarowego wynosi 200 mm, szerokość (rozstaw prętów pomiarowych) – 50 mm. Falowody wykonano z mosiężnego kątownika o wymiarach 12×12 mm i długości 200 mm. Sondę B1 wyposażono w uchwyt o przekroju okrągłym. Komunikacja z miernikiem TDR realizowana jest za pomocą kątowej złączki BNC przylutowanej do płytki drukowanej łączącej pręty pomiarowe ze złączką.

Rysunek 3.1.1 przedstawia schemat konstrukcyjny prototypowej sondy B1, na rysunku 3.1.2 przedstawiono modele 3D oraz fotografię przyrządu pomiarowego.

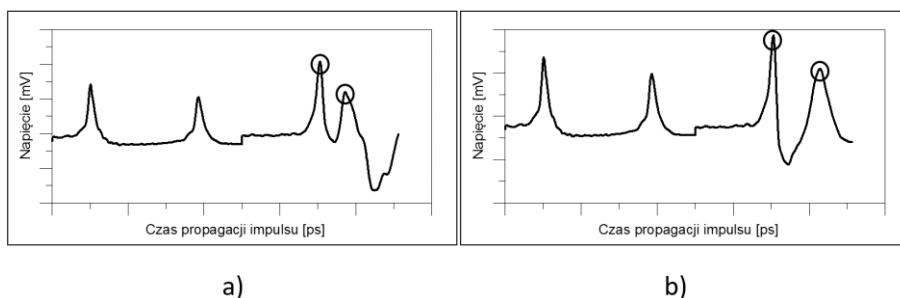


Rys. 3.1.1. Schemat konstrukcyjny prototypowej sondy powierzchniowej TDR B1



Rys. 3.1.2. Modele 3D oraz zdjęcie sondy powierzchniowej B1: a) element pomiarowy (kątownik), b) dielektryk (obudowa sondy), c) rączka, d) złącze BNC, e) płytką drukowaną, f) pokrywa

Rysunek 3.1.3 przedstawia reflektogramy uzyskane w badaniach testowych z wykorzystaniem sondy B1. W prawej części diagramów widoczne są dwa dodatnie piki znaczące. Pierwszy (o stałej pozycji) oznacza wejście do sondy, pik drugi oznacza koniec sensora. Widoczne jest przesunięcie drugiego piku względem piku pierwszego dla próbki nasyconej (b) w porównaniu do próbki suchej (a). Różnica w czasie pomiędzy dwoma pikami jest podstawą estymacji wilgotności osrodka.

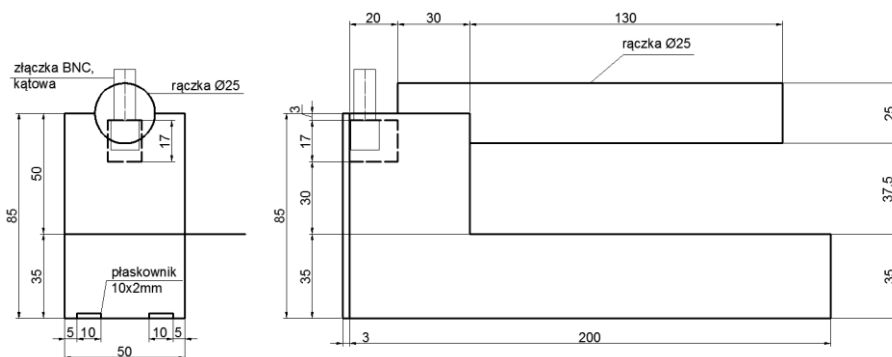


Rys. 3.1.3. Reflektogramy sondy B1. a) próbka powietrznie sucha, b) próbka nasycona

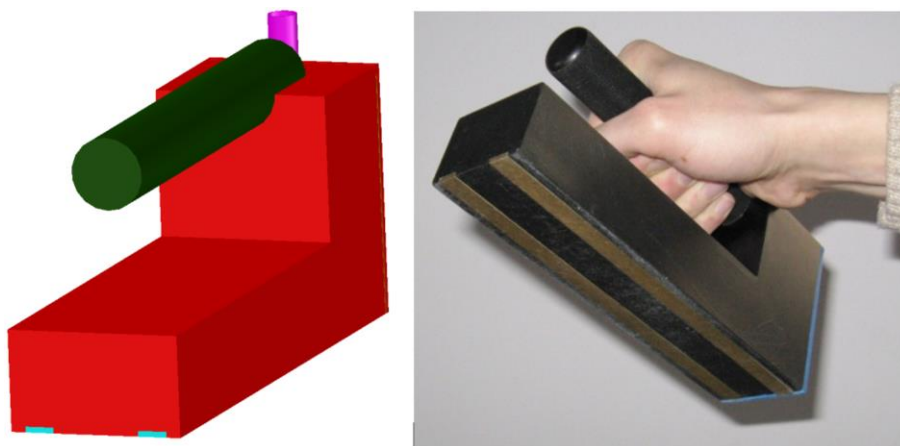
3.1.2. Sonda powierzchniowa B2

Sonda powierzchniowa B2 wykonana jest z czarnego ertacetalu (POM, charakterystyka dielektryczna analogiczna jak dla materiału w kolorze białym). Długość sondy, a tym samym falowodu pomiarowego, podobnie jak w przypadku poprzedniej konstrukcji wynosi 200 mm, zaś szerokość 50 mm. Pręty pomiarowe wykonano z mosiężnego płaskownika o przekroju 2×10 mm. W odróżnieniu od poprzedniej konstrukcji, płaskownik jest umieszczony w dielektryku, dzięki czemu całkowicie wyeliminowano wpływ otoczenia na pomiar – pręt pomiarowy ma kontakt tylko z badanym osrodkiem oraz ertacetalem stanowiącym obudowę czujnika. Pozostałe elementy sondy wykonano analogicznie, jak w przypadku sondy B1.

Rysunek 3.1.4 przedstawia schemat konstrukcyjny prototypowej sondy B2. Na rysunku 3.1.5 przedstawiono model 3D oraz fotografię przyrządu pomiarowego.

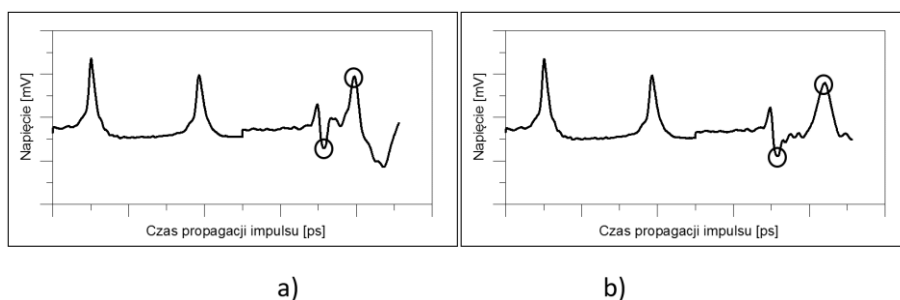


Rys. 3.1.4. Schemat konstrukcyjny prototypowej sondy powierzchniowej TDR B2



Rys. 3.1.5. Wizualizacja 3D oraz fotografia prototypu sondy powierzchniowej B2

Rysunek 3.1.6 przedstawia reflektogramy uzyskane za pomocą sondy B2. Pierwszy, ujemny pik wejściowy charakteryzuje się stałą pozycją i wynika z obecności rezystora w danym miejscu sondy. Pik drugi jest dodatni i oznacza koniec czujnika. W tym przypadku podstawą szacowania wilgotności ośrodka jest różnica pomiędzy pozycją pików dodatniego i pików ujemnego (czasem propagacji impulsu pomiędzy obydwojma pikami).

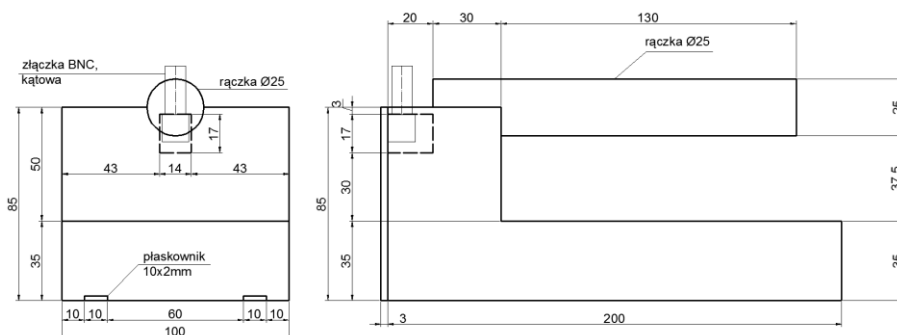


Rys. 3.1.6. Reflektogramy uzyskane przy wykorzystaniu sondy B2: a) próbka powietrznie sucha, b) próbka nasycona

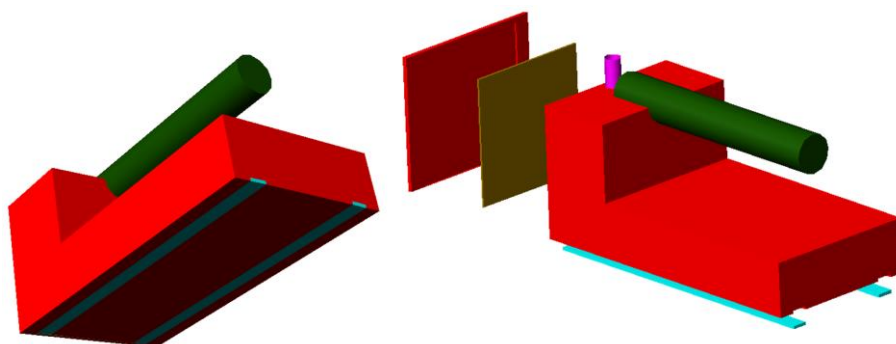
3.1.3. Sonda powierzchniowa B3

Sonda powierzchniowa B3, podobnie jak B2, wykonana jest z czarnego ertacetalu (POM). Długość sondy wynosi 200 mm, natomiast szerokość (rozstaw prętów) jest dwukrotnie większa i wynosi 100 mm. Falowody wykonano z mosiężnego płaskownika o przekroju 2×10 mm.

Rysunek 3.1.7 przedstawia schemat konstrukcyjny prototypowej sondy B3, zaś na rysunku 3.1.8 przedstawiono jej model trójwymiarowy.

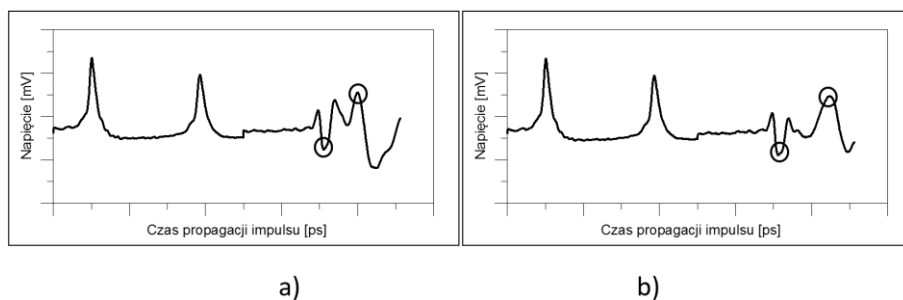


Rys. 3.1.7. Schemat konstrukcyjny prototypowej sondy powierzchniowej TDR B3



Rysunek 3.1.8. Trójwymiarowy model sondy powierzchniowej B3

Rysunek 3.1.9 przedstawia reflektogramy uzyskane za pomocą sondy B3. W prawej części przebiegu widoczne dwa piki znaczące. Pierwszy pik ujemny o stałej pozycji wynika z umiejscowienia rezystora w danym miejscu sondy. Ostatni, dodatni pik odzwierciedla koniec czujnika. W przypadku materiału suchego (rysunek 3.1.9a) jest to najwyższy z pików dodatnich. W przypadku ośrodków wilgotnych (rysunek 3.1.9b) jest to wyraźnie najwyższy pik w pomiarowej części reflektogramu. Podobnie jak w przypadku sondy B2, podstawą szacowania wilgotności ośrodka jest różnica pozycji pików dodatniego i pików ujemnego (wejściowego).



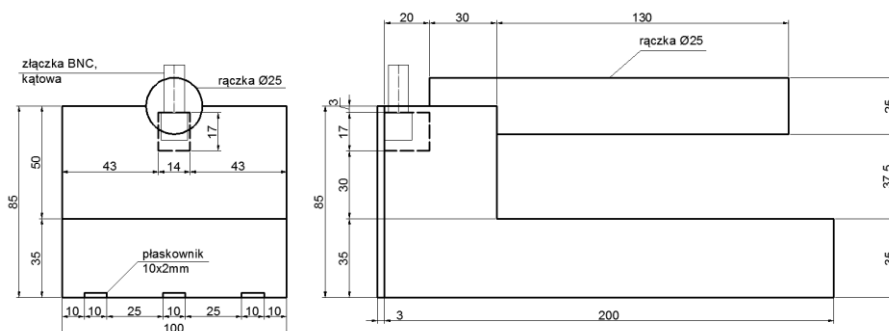
Rys. 3.1.9. Reflektogramy uzyskane przy wykorzystaniu sondy B3: a) próbka powietrznie sucha, b) próbka nasycona

3.1.4. Sonda powierzchniowa B4

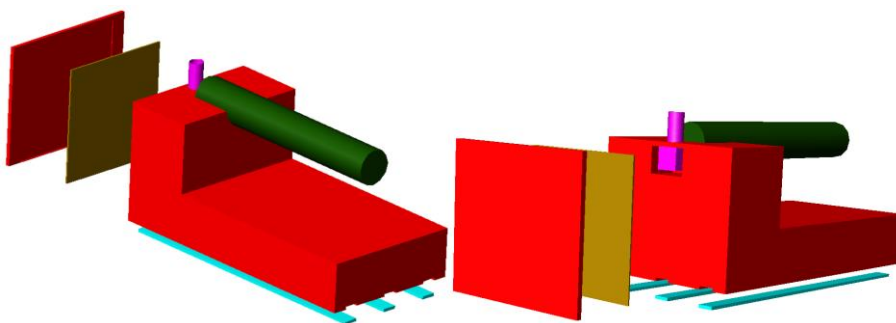
Sonda powierzchniowa B4 również wykonana jest z czarnego ertacetalu (POM). Długość sondy wynosi 200 mm, a szerokość – 100 mm. Sonda B4 posiada 3 pręty pomiarowe. Rdzeń przewodu koncentrycznego jest połączony z falowodem środkowym, a falowody zewnętrzne stanowią przedłużenie oplotu.

Pręty pomiarowe wykonano z mosiężnego płaskownika o przekroju 2×10 mm. Podobnie jak w prototypach B2 i B3, płaskownik w całości umieszczono w dielektryku.

Rysunek 3.1.10 przedstawia schemat konstrukcyjny prototypowej sondy B4, zaś na rysunku 3.1.11 przedstawiono model 3D przyrządu.

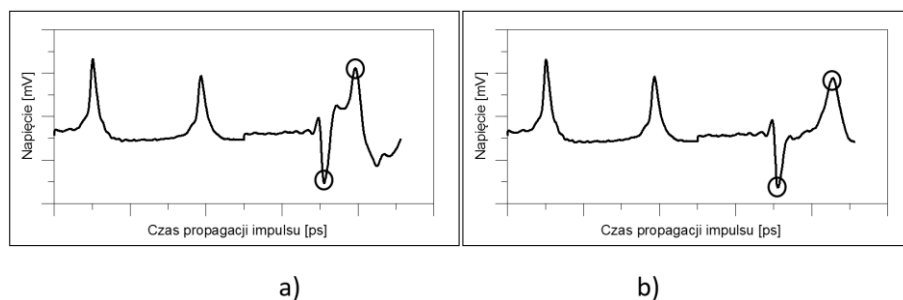


Rysunek 3.1.10. Schemat konstrukcyjny prototypowej sondy powierzchniowej B4



Rysunek 3.1.11. Model 3D sondy powierzchniowej B4

Rys. 3.1.12 przedstawia reflektogramy uzyskane z wykorzystaniem sondy B4. Wprowadzenie dodatkowego pręta wychodzącego z oplotu nie spowodowało znaczących zmian w przebiegu impulsu elektromagnetycznego. W prawej, pomiarowej części przebiegu widoczne są dwa piki znaczące: pierwszy pik ujemny o stałej pozycji (zastosowano rezystor o większym oporze niż w przypadku sondy B3, dzięki czemu pik wejściowy jest bardziej widoczny) oraz wyraźny pik dodatni. Szacowanie wilgotności ośrodka odbywało się analogicznie, jak w przypadku sond B2 i B3.

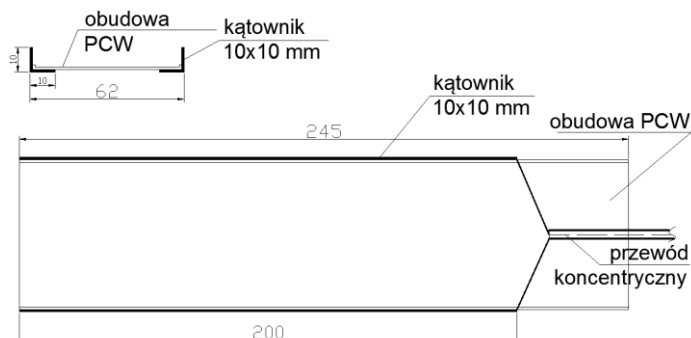


Rys. 3.1.12. Reflektogramy uzyskane przy wykorzystaniu sondy B4: a) próbka powietrznie sucha, b) próbka nasycona

3.1.5. Sonda powierzchniowa C

Sondę powierzchniową typu C opracowano na potrzeby monitoringu procesów wilgotnościowych (podciąganie kapilarne, desorpcja) zachodzących w materiałach i przegrodach budowlanych.

Sondę wykonano z płaskiego elementu będącego częścią listwy maskującej przewody elektryczne. Element ten wykonano z polichlorku winylu (PCW) o przenikalności dielektrycznej 3.0 – 3.3 (<http://www.matweb.com/>). Rysunek 3.1.13 przedstawia schemat konstrukcyjny sondy C. Na rysunku 3.1.14 zamieszczono fotografię sondy, a na rysunku 3.1.15 reflektogramy uzyskane przy jej wykorzystaniu.

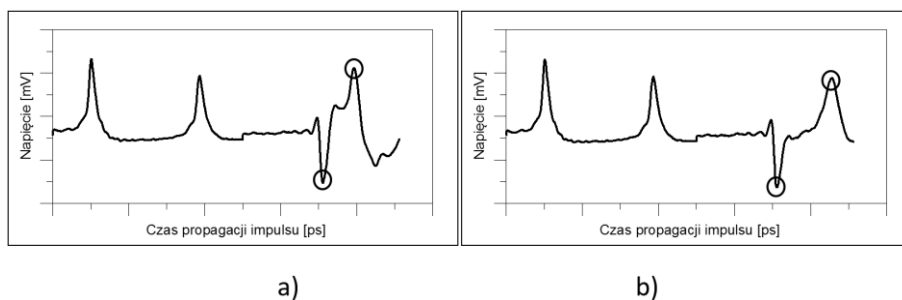


Rys. 3.1.13. Schemat konstrukcyjny prototypowej sondy powierzchniowej TDR C



Rys. 3.1.14 Fotografia sondy powierzchniowej C

Należy zaznaczyć, że każdy z prototypowych egzemplarzy sondy C różnił się nieznacznie od pozostałych z uwagi na reżim technologiczny wytwarzania czujników. Nie miało wpływu na jakość generowanych wyników, wymagało jednak dodatkowych zabiegów związanych z kalibracją czujnika. Szczególnie istotne było ustalenie czasu martwego sondy, który dla poszczególnych egzemplarzy różnił się o kilkadziesiąt pikosekund. W prawej, pomiarowej części przebiegu widoczne są dwa piki znaczące. Charakterystyczny jest wejściowy pik dodatni oraz ostatni, wyraźny pik dodatni. Czas pomiędzy tymi dwoma pikami jest podstawą szacowania efektywnej przenikalności dielektrycznej, a tym samym wilgotności materiału.



Rys. 3.1.15. Reflektogramy uzyskane przy wykorzystaniu sondy C: a) próbka powietrznie sucha, b) próbka nasycona

3.1.6. Zbiorcza charakterystyka sond pomiarowych

W tabeli 3.1.1 przedstawiono zbiorczą charakterystykę prototypowych sond powierzchniowych.

Tabela 3.1.1. Charakterystyka prototypowych powierzchniowych sond B1–4 oraz C

Oznaczenie	B1	B2	B3	B4	C
Liczba prętów	2	2	2	3	2
Długość sondy [mm]	200	200	200	200	200
Rozstaw prętów, szerokość sondy [mm]	50	50	100	100	62
Materiał	Ertacetal (POM – biały)	Ertacetal (POM – czarny)	Ertacetal (POM – czarny)	Ertacetal (POM – czarny)	Polichlorek winylu (PCW)
Kształt falowodu	Kątownik (12×12 mm)	Płaskownik (2×10 mm)	Płaskownik (2×10 mm)	Płaskownik (2×10 mm)	Kątownik (10×10 mm)
Czas martwy [ps]	650	650	1030	1030	600-700*

* w zależności od egzemplarza czujnika

3.2. Badania zasięgu prototypowych sond powierzchniowych

Prawidłowe wykonanie pomiarów kalibracyjnych oraz monitoringowych wymaga ustalenia zasięgu oddziaływania pola elektromagnetycznego sondy powierzchniowej. Jest to istotne z metodycznego punktu widzenia ponieważ:

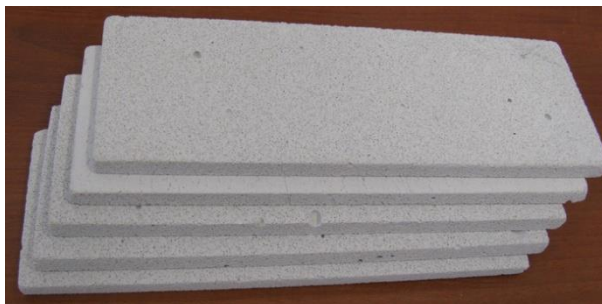
- wpływa na dobór wymiarów próbek materiału na potrzeby badań kalibracyjnych – zbyt mała grubość próbki w stosunku do pola oddziaływania sondy może generować błędy pomiarowe; zbyt duże wymiary próbek utrudniają uzyskanie stanu równomiernego ich nasycenia, co może prowadzić do błędów pomiarowych wynikających z niejednorodności badanego ośrodka,
- wpływa na świadomość osoby wykonującej pomiar, ponieważ wilgotność mierzona danym czujnikiem jest adekwatna do wielkości rzeczywistej tylko w strefie określonej zasięgiem oddziaływania czujnika.

3.2.1. Metodyka pomiaru

Badania zasięgu prototypowych sond powierzchniowych TDR (B1, B2, B3, B4 oraz C) prowadzono z wykorzystaniem stanowiska, w skład którego wchodzi:

- zestaw prototypowych sond powierzchniowych TDR,
- przewód koncentryczny,
- miernik TDR (TDR Multimeter),
- komputer PC do sterowania miernikiem i przetwarzania danych,

- aplikacja TDR Reflectometer v.1
- zestaw próbek betonu komórkowego o wymiarach 230×80×10 mm (dla sond B1, B2 oraz C – rysunek 3.2.1) oraz o wymiarach 230×130×10 mm (dla sond B3 i B4),
- waga WPT 6C/1 firmy RADWAG.



Rys.3.2.1. Próbkki betonu komórkowego wykorzystywane do oznaczeń zasięgu impulsu elektromagnetycznego oraz w badaniach kalibracyjnych



Rysunek 3.2.2. Eksperyment wyznaczania zasięgu oddziaływania pola sondy powierzchniowej TDR B2

3.2.2. Opis eksperymentu

Przygotowano dwa zestawy po 10 próbek z betonu komórkowego. Beton komórkowy wybrano do badań ze względu na łatwość obróbki oraz dużą nasiąkliwość materiału. Próbkki przygotowano metodą mechaniczną przez docinanie i szlifowanie papierem ściernym do uzyskania maksymalnie gładkiej i równej powierzchni.

W celu wykonania badań zasięgu oddziaływania poszczególnych sond TDR próbki nasycono wodą do stanu maksymalnej wilgotności, która w przypadku użytego materiału wynosiła 42%_{vol}. Nasycanie było procesem stopniowym i powolnym. W pierwszej kolejności próbki położono na powierzchni zwierciadła wody w celu usunięcia powietrza z porów, a następnie zanurzono. Niewielka grubość próbek (10 mm) umożliwiła uzyskanie stanu nasycenia po upływie kilku godzin, co stwierdzono na podstawie braku zauważalnego przyrostu masy po kolejnym ważeniu. Wysoka wilgotność próbki betonu komórkowego umożliwiła wyodrębnienie parametrów dielektrycznych badanego materiału i otaczającego go z każdej strony powietrza.

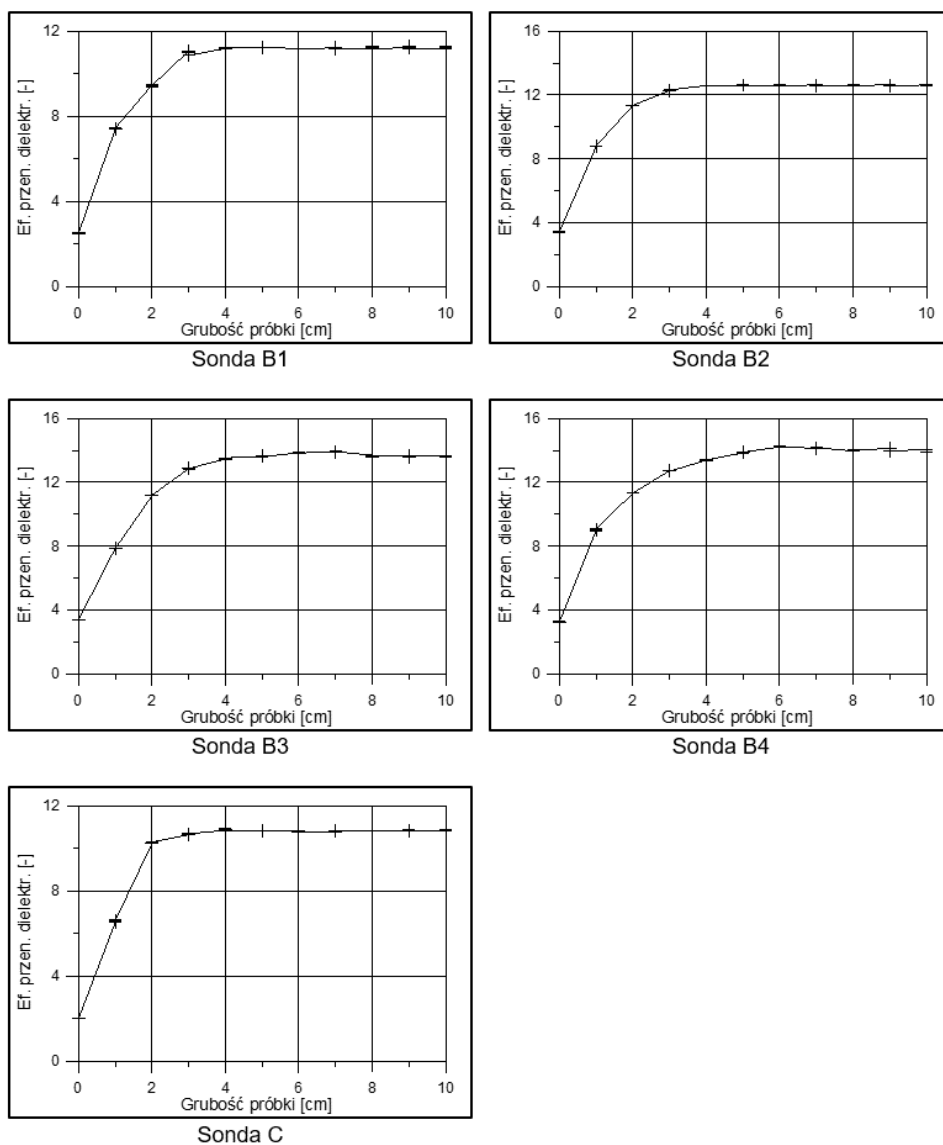
Pomiary prowadzono przy następujących założeniach:

- echo sygnału powracającego od sondy TDR zależy od właściwości dielektrycznych nasyczonej próbki (wysoka wartość przenikalności dielektrycznej), przenikalności dielektrycznej dielektryka stanowiącego obudowę sondy oraz, co istotne, od przenikalności dielektrycznej powietrza otaczającego próbkę (równiej 1 [-]),
- wpływ parametrów dielektrycznych materiału znajdującego się po przeciwnej stronie próbki (w stosunku do miejsca przyłożenia sondy powierzchniowej) będzie tym większy, im mniejsza będzie grubość całkowita próbki,
- zwiększenie grubości próbki powoduje wzrost efektywnej przenikalności dielektrycznej mierzonej sondą powierzchniową, ponieważ sonda obejmuje zasięgiem oddziaływania coraz większą głębokość próbki,
- dla pewnej wartości grubości wzrost efektywnej przenikalności dielektrycznej nie będzie zauważalny, w tym przypadku zasięg sondy powierzchniowej TDR będzie odpowiadał tej grubości.

Istotą eksperymentu było uzyskanie dla każdej z sond informacji o czasie propagacji impulsu elektromagnetycznego i obserwacja jego wzrostu wraz ze wzrostem grubości całkowitej próbki. W pierwszym kroku wykonano pomiary dla próbki suchej. Następnie przykładano sondę TDR do cienkiej, jednocentymetrowej próbki i odczytywano czas propagacji impulsu wzdłuż prętów sondy pomiarowej. Ilość powtórzeń odczytów wynosiła 5. W dalszej kolejności dokładano do dolnej podstawy następną próbkę o grubości 10 mm, realizowano odczyt (rysunek 3.2.2) i analizowano przyrost czasu propagacji impulsu.

3.2.3. Wyniki badań

Wyniki w postaci zależności pomiędzy grubością próbki (ilością warstw), a efektywną przenikalnością dielektryczną odczytaną powierzchniowymi sondami TDR przedstawiono na rysunku 3.2.3.



Rys. 3.2.3. Zmiany wartości średniej efektywnej przenikalności dielektrycznej wraz z grubością badanej próbki w zależności od prototypu sondy

Maksymalne wartości odchyłeń standardowych dla każdej jednorodnej grupy pomiarowej (grubości) były następujące:

- sonda B1: 0,088 [-],
- sonda B2: 0,027 [-],
- sonda B3: 0,039 [-],
- sonda B4: 0,101 [-],
- sonda C: 0,047 [-].

Taka niepewność pomiarowa odpowiada różnicom w odczytach wilgotności poniżej $0,001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Jest to wartość zdecydowanie niższa niż niepewność metody TDR, określona na poziomie $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Topp i in., 1984; Selker i in., 1993; Amato, Ritchie, 1995).

Wartości współczynnika zmienności (V) we wszystkich przypadkach nie przekraczały wartości 1%. Dla każdej z sond B1, B2, B3, B4 i C maksymalne wartości zmienności wynosiły odpowiednio: 0,8%, 0,22%, 0,29%, 0,73% i 0,72%.

3.2.4. Analiza wyników

Do interpretacji wyników zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji (ang. analysis of variance – ANOVA). Jest to test statystyczny powszechnie stosowany do porównywania średnich w populacjach pomiędzy poszczególnymi grupami i do oceny prawdopodobieństwa, czy różnice pomiędzy średnimi nie są dziełem przypadku. Obliczenia statystyczne wykonano w programie Statistica 12, firmy StatSoft (www.statsoft.pl). Przyjęto normalność rozkładu populacji w podgrupach (odczytów przenikalności dielektrycznej dla danej grubości próbki) oraz jednorodność wariancji (wariancje w obrębie różnych grup układu są sobie równe) (Wątroba, 2002).

W przypadku badań wpływu grubości próbki na odczyty efektywnej przenikalności dielektrycznej jako grupę przyjęto grubość płytki [cm] (liczbę warstw), a jako populację – efektywne przenikalności dielektryczne (ϵ_{eff}) [-], liczba wykonanych powtórzeń w ramach grupy wynosiła 5.

Hipoteza zerowa zakładała, że wartości średnich grupowych p populacji są takie same – równe wartości średniej ogólnej:

$$H_0: \epsilon_{\text{eff} 1} = \epsilon_{\text{eff} 2} = \epsilon_{\text{eff} 3} = \epsilon_{\text{eff} 4} = \epsilon_{\text{eff} 5} = \epsilon_{\text{eff} 6} = \epsilon_{\text{eff} 7} = \epsilon_{\text{eff} 8} = \epsilon_{\text{eff} 9} = \epsilon_{\text{eff} 10} = \epsilon_{\text{eff}}$$

W przypadkach, w których hipoteza zerowa została odrzucona, wykonano testy post-hoc mające na celu wykazanie istotnych statystycznie różnic pomiędzy poszczególnymi grupami (grubościami próbek). Dzięki temu możliwe było określenie, jaka powinna być minimalna grubość próbki do badań i maksymalny

zasięg oddziaływania czujnika. Przeprowadzono testy NIR Fishera (Najmniejsza Istotna Różnica, ang. LSD – Least Significant Difference) oraz test Tukeya. W przypadku, gdy testy te nie dawały jednoznacznych odpowiedzi, stosowano test Scheffego (Page i in., 2003; Williams i in., 2010; Abdi i in., 2010). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.2.1.

Tabela 3.2.1. Wyniki analizy wariancji i testów post-hoc

	B1	B2	B3	B4	C
ANOVA	Wykazano istotność różnic pomiędzy średnimi jednorodnych grup na poziomie $p=0,00$.				
Test NIR Fishera	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach od 4 do 10 cm. Wyodrębniono dodatkową grupę dla próbek o grubości 6 cm.	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach od 4 do 10 cm.	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach 5, 8, 9, 10 cm. Pozostałe grubości sklasyfikowano jako grupy odrębne.	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach 8 i 10 cm. Pozostałe grubości, począwszy od próbki pustej do próbki o grubości 7 i 9 cm znalazły się w odrębnych grupach.	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach od 5 do 10 cm, przy czym wyodrębniona została dodatkowo grupa dla próbek o grubości 6 cm.
Test Tukeya	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach od 4 do 10 cm.	Wykazano istnienie jednorodnej grupy dla próbek o grubościach od 4 do 10 cm.	Wykazano istnienie dwóch jednorodnych grup - pierwszej o grubościach 5, 8, 9, 10 cm oraz drugiej o grubościach 6 i 7 cm.	Wyodrębniono jednorodną grupę dla próbek o grubościach 5 i 10 cm. Jednocześnie wyodrębniono jednorodne grupy o grubościach 8 i 10 cm oraz 7 i 8 cm.	Wykazano istnienie trzech jednorodnych grup dla próbek o grubościach od 4 do 10 cm.
Test Scheffe	Nie wykonano.	Nie wykonano.	Wykazano istnienie dwóch jednorodnych grup - pierwszej o grubościach 5, 8, 9, 10 cm oraz drugiej o grubościach 6 i 7 cm.	Wyodrębniono cztery grupy jednorodne w obszarze grubości próbek od 5 do 10 cm.	Nie wykonano.
Uwagi	Przypisanie próbek o grubości 6 cm do odrębnej grupy w teście NIR Fishera jest konsekwencją procesu desorpcji na powierzchni próbek.	Brak.	Przypisanie próbek o grubości 6 i 7 cm do odrębnych grup jest konsekwencją procesu desorpcji na powierzchni próbek.	Brak jednorodności grup powyżej grubości 5 cm wynikał z procesu desorpcji.	Brak.

Z uzyskanych danych wynika, że po osiągnięciu maksymalnego zasięgu sondy, przy określonej ilości warstw materiału, przyrost wartości przenikalności dielektrycznej nie był notowany, a w niektórych przypadkach miernik zarejestrował nawet spadek przenikalności. Należy to tłumaczyć szybkim procesem desorpcji na powierzchni badanych próbek. Zjawisko to miało wpływ na sposób obróbki statystycznej uzyskanych wyników.

Normalność rozkładu potwierdzono za pomocą analizy rozkładu zmiennych zależnych w obrębie grup oraz analizy normalności reszt w obrębie podklas. Jednorodność wariancji potwierdzono za pomocą testów jednorodności wariancji: Hartleya, Cochrańa oraz Bartletta, lub za pomocą analizy odchyłeń standardowych względem średnich.

Na podstawie wyników analizy ANOVA oraz testów post-hoc, dla każdego czujnika wyznaczono minimalne grubości próbek, wynikające z głębokości zasięgu impulsu elektromagnetycznego (tabela 3.2.2.).

Tabela 3.2.2. Głębokości zasięgu impulsu elektromagnetycznego poszczególnych sond powierzchniowych TDR

Typ sondy powierzchniowej	Szerokość rozstawu prętów [mm]	Zasięg oddziaływania impulsu [mm]
B1	50	40
B2	50	40
B3	100	50
B4	100	50
C	62	40

3.2.5. Dyskusja wyników

W eksperymencie wykazano wzrost pola oddziaływania czujnika w zależności od szerokości rozstawu prętów pomiarowych. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi (Knight, 1992; Mohamed, 2006), im większy rozstaw prętów w czujniku, tym większy obszar pola jego oddziaływania. Sondy B3 i B4 o większym rozstawie prętów wykazują zasięg impulsu wynoszący 50 mm, zaś sondy B1, B2 oraz sondy typu C charakteryzują się zasięgiem równym 40 mm. Wartości wyznaczone w eksperymencie należy traktować jako parametry techniczne każdej z sond. W trakcie pomiarów należy mieć na uwadze to, że odczyty są miarodajne tylko i wyłącznie dla danej grubości muru. W trakcie badań kali-

bracyjnych należy tak dobierać próbki, aby ich grubość była nie mniejsza niż wyznaczona.

3.3. Badania kalibracyjne

Konieczność przeprowadzenia indywidualnych badań kalibracyjnych wynikała z:

- nietypowej konstrukcji sond powierzchniowych,
- odmiennych rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych czujników,
- niejednorodności badanych ośrodków,
- niedostatecznej praktycznej weryfikacji typowych formuł kalibracyjnych stosowanych w gruntoznawstwie pod kątem określania wilgotności materiałów budowlanych,
- konieczności indywidualnej kalibracji wykazanej w literaturze przedmiotu w odniesieniu do niestandardowych konstrukcji sond (Selker i in., 1993; Ito i in., 2010).

Przed przystąpieniem do badań określono podstawowe parametry fizyczne badanych ośrodków według normy PN-EN 1936:2010. Były to: gęstość objętościowa w stanie suchym oraz wilgotność maksymalna.

Dla potrzeb kalibracji urządzeń przebadano szereg materiałów budowlanych konstrukcyjnych oraz wykończeniowych (tabela 3.3.1).

Pierwszą grupę stanowiły materiały, z których wznoszone są przegrody budowlane: beton komórkowy, cegła ceramiczna pełna, klinkierowa oraz silikato-wa. Dodatkowo badano samonośny materiał termoizolacyjny – autoklawizowany silikat wapienny, stosowany do izolacji budynków od wewnątrz (Häupl i in., 1999; Pavlík i in., 2006a; Pavlík i in., 2006c; Pavlík i in., 2012 Van Belleghema i in., 2014). Jego podstawowymi cechami fizycznymi są: wysoka kapilarność oraz bardzo duża wartość maksymalnej wilgotności (ponad 90%_{vol}), co czyni go niezwykle interesującym z punktu widzenia prowadzonych badań. Drugą grupę materiałów stanowiły tynki, które pokrywają zewnętrzną lub wewnętrzną powierzchnię badanych przegród budowlanych i odpowiadają za szereg procesów związanych z wymianą wody pomiędzy przegrodą, a środowiskiem zewnętrznym lub wewnętrznym. Grubość powłoki tynkarskiej zawiera się zazwyczaj w przedziale od 20 do 35 mm, co sprawia, że to tynki znajdują się w głównym obszarze zasięgu (ok. 90%) prototypowych sond stanowiących przedmiot niniejszej pracy, szczególnie tych z mniejszym rozstawem prętów (B1, B2 oraz C).

Tabela 3.3.1. Charakterystyka materiałów budowlanych użytych w badaniach kalibracyjnych

Oznaczenie	Materiał	Gęstość w stanie suchym	Wilgotność maksymalna
		[kg/m ³]	[cm ³ /cm ³]
BK	Beton komórkowy	600	0,42
CK	Cegła klinkierowa	2100	0,16
CC	Cegła ceramiczna	1500	0,36
ASW	Autoklawizowany silikat wapienny	220	0,92
CS	Cegła silikatowa	1850	0,27
Tynk A	Gładź wapienna	1100	0,36
Tynk B	Tynk maszynowy cementowo-wapienny lekki (1)	1300	0,33
Tynk C	Tynk maszynowy cementowo-wapienny (super)lekki (2)	1200	0,28
Tynk D	Tynk mineralny na bazie cementu	1700	0,15
Tynk E	Tynk ręczny cementowo-wapienny (wewnętrzny i zewnętrzny)	1750	0,26

Celem badań kalibracyjnych sond powierzchniowych było opracowanie formuł empirycznych, umożliwiających wyznaczenie wilgotności materiałów budowlanych za pomocą pomiarów TDR. Ze względu na specyficzną budowę sond powierzchniowych badania te są niezwykle istotne, ponieważ element pomiarowy kontaktuje się z ośrodkiem złożonym z badanego materiału i otoczenia falowodu (dielektryk, powietrze). W badaniach przyjęto założenie (Ferré i in., 1998), że odczytana przez miernik TDR przenikalność dielektryczna jest wypadkową przenikalności ośrodków otaczających pręty pomiarowe:

$$\varepsilon_{eff} = 0,5\varepsilon_1 + 0,5\varepsilon_2 \quad (3.3.1)$$

gdzie: ε_{eff} – efektywna przenikalność dielektryczna odczytana z miernika TDR [-], ε_1 , ε_2 – przenikalności dielektryczne dwóch materiałów otaczających pręt pomiarowy [-].

Założenie to jest dużym uogólnieniem, ponieważ:

- sonda B1 posiada falowody pomiarowe o przekroju kątownika, w związku z czym na wartość przenikalności dielektrycznej ma wpływ dodatkowy ośrodek – powietrze,
- w przybliżeniu można uznać, że sondy typu C nie posiadają dodatkowego dielektryka, a obudowa dystansująca pręty nie ma wpływu na wartość ε_{eff} , która zależy tylko od wilgotności materiału oraz przenikalności dielektrycznej powietrza,

- pręty pomiarowe w sondach B2–B4 mają przekrój prostokątny i są w całości zagłębione w obudowie z ertacetalu, tylko jedna powierzchnia styka się z badanym materiałem.

3.3.1. Metodyka pomiaru

3.3.1.1. Opis przyjętej metodyki badawczej

Do wykonania badań kalibracyjnych sond powierzchniowych TDR wykorzystano stanowisko opisane w podrozdziale 3.2.1, uzupełnione o suszarkę Memmert VO-500 oraz atomizer i kuwety do nawilżania próbek.

Próbki materiałów budowlanych (tabela 3.3.1) przygotowano w postaci płytek. Wymiary próbek dla sond B1, B2 oraz sond typu C były następujące: 220×120×10 mm. Dla sond typu B3 i B4 zastosowano próbki o wymiarach 230×130×10 mm. W przypadku próbek zapraw tynkarskich zostały one wcześniej przygotowane w specjalnie do tego celu wykonanych pojemnikach, w których osiągnęły stan dojrzałości.

W celu wykonania pomiarów kalibracyjnych, powierzchnie zewnętrzne próbek wyrównano i wypolerowano, ponieważ do uzyskania dokładnego wyniku pomiaru wymagane jest ścisłe przyleganie elementu pomiarowego do materiału. Próbki suszono w suszarce do stałej masy. Następnie cienkie płytki zestawiano w większe aglomeraty o grubości całkowitej wynikającej z wyników badań przedstawionych w rozdziale 3.2. Umieszczano na nich sondę powierzchniową i wykonywano odczyt efektywnej przenikalności dielektrycznej miernikiem TDR. W kolejnych krokach pomiarowych próbki stopniowo nasycano określoną ilością wody destylowanej za pomocą atomizera, a pod koniec eksperymentu zanurzano w kuwetach do osiągnięcia stanu całkowitego nasycenia.

3.3.1.2. Model regresji

Na podstawie badań literaturowych (Topp i in., 1980; Ren i in., 1999; Mastorilli i in., 1998; Udawatta i in., 2011; Najm i in., 2008) oraz prób własnych przeanalizowano wiele wariantów modeli odwzorowania zależności pomiędzy wilgotnością objętościową, a TDR. Stwierdzono, że najkorzystniejszy jest model regresji wielomianowej. Pomimo wad, związanych z problematycznym odwzorowaniem wartości przenikalności dielektrycznej w stanach zbliżonych do nasycenia (Wu, 2010), jakość dopasowania danych pomiędzy odczytami z urządze-

nia TDR, a badaniami referencyjnymi (grawimetrycznymi) jest zadawalajacy w modelu wielomianowym w porownaniu do innych spotykanych modeli.

3.3.1.3. Analiza niepewności pomiaru

Przeprowadzono analizę mającą na celu ustalenie niepewności pomiarowej poszczególnych czujników dla wszystkich badanych materiałów. Niepewność pomiarową wyrażono za pomocą pierwiastka średniego błędu kwadratowego RMSE oraz niepewności rozszerzonej. Wyznaczono wartości RMSE (ang. Root Mean Squared Error) dla przyjętych modeli regresji. Jest to powszechnie stosowana metoda określania niepewności, która dotyczy oceny jakości dopasowania przyjętego modelu do danych uzyskanych w drodze pomiaru. Zastosowanie RMSE do określania niepewności pomiarowej oprzyrządowania TDR spotykane jest w większości opracowań dostępnych w literaturze światowej (Roth i in., 1990; Malicki i in., 1996; Ju i in., 2010; Udawatta i in., 2011; Chai, 2014).

Dodatkowo, analizę niepewności pomiarowej przeprowadzono na podstawie wytycznych EA (ang. *European cooperation for Accreditation*, Europejska współpraca w dziedzinie akredytacji) zawartych w *EA, 2001*, a także *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, GUM* (JCGM 100:2008). Dzięki temu możliwe było wyznaczenie całkowitej i rozszerzonej niepewności pomiarowej, na których wartości wpływa niepewność pomiarowa typu A i B. Obliczenia niepewności pomiarowej wykonano w programie R (<https://www.r-project.org>).

Ustalenie modelu regresji

Ogólna postać formuł kalibracyjnych ma charakter wielomianu drugiego stopnia. Danymi wejściowymi do modelu były: wilgotność objętościowa wyznaczana w drodze bezpośrednich badań grawimetrycznych oraz średnia wartość efektywnej przenikalności dielektrycznej uzyskana w drodze pomiarów reflektometrycznych. Ogólna postać formuły regresji jest następująca:

$$\theta = \beta_0 + \beta_1 \cdot \overline{\varepsilon_{eff}} + \beta_2 \cdot \overline{\varepsilon_{eff}}^2 \quad [\text{cm}^3/\text{cm}^3] \quad (3.3.2)$$

(p) (p) (p)

gdzie: θ – wilgotność objętościowa wyznaczona za pomocą modelu wielomianowego; $\overline{\varepsilon_{eff}}$ – średnia wartość efektywnej przenikalności dielektrycznej

w próbie z pomiarów reflektometrycznych [-], p – krytyczny poziom istotności (*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001)

Niepewności pomiarowe typu A i B, niepewność całkowita

Niepewności typu A określają jakość dopasowania modelu do danych eksperymentalnych. Źródłem niepewności pomiarowej typu B są niepewności pomiarowe przyrządów zastosowanych w pomiarach kalibracyjnych. W niniejszych rozważaniach jako niepewność pomiarową przyjęto rozdzielczość miernika TDR stosowanego w badaniach, wyrażoną mianem przenikalności dielektrycznej, równą 0,06 [-]. Niepewności pomiarowych przyrządów stosowanych do badań referencyjnych (grawimetrycznych) nie uwzględniono w analizie.

W przyjętym modelu obliczeniowym na niepewność pomiarową mają wpływ cztery parametry – estymatory β_0 , β_1 , β_2 , oraz efektywna przenikalność dielektryczna (JCG M 100:2008):

$$\theta = f(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \overline{\varepsilon_{eff}}) \quad [\text{cm}^3/\text{cm}^3] \quad (3.3.3)$$

Korzystając z prawa propagacji błędów, całkowitą niepewność pomiarową (zawierającą niepewności typu A i B) można zapisać w następujący sposób:

$$u_c(\theta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} u(\varepsilon)\right)^2 + \sum_{i=0}^2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial \beta_i} u(\beta_i)\right)^2 + 2 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=i+1}^2 \frac{\partial \theta}{\partial \beta_i} \frac{\partial \theta}{\partial \beta_j} u(\beta_i, \beta_j)} \quad (3.3.4)$$

czyli:

$$u_c^2(\theta) = \left(\frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon}\right)^2 \cdot u^2 \varepsilon + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \beta_0}\right)^2 \cdot u^2 \beta_0 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \beta_1}\right)^2 \cdot u^2 \beta_1 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \beta_2}\right)^2 \cdot u^2 \beta_2 + 2 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \beta_0} \frac{\partial \theta}{\partial \beta_1} \cdot u^2_{(\beta_0, \beta_1)} + 2 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \beta_0} \frac{\partial \theta}{\partial \beta_2} \cdot u^2_{(\beta_0, \beta_2)} + 2 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \beta_1} \frac{\partial \theta}{\partial \beta_2} \cdot u^2_{(\beta_1, \beta_2)} \quad (3.3.5)$$

Rozszerzona niepewność pomiarowa

Rozszerzoną niepewność pomiarową wyznaczono według wzoru:

$$U(\theta) = k_p \cdot u_c(\theta) \quad (3.3.6)$$

gdzie: k_p – współczynnik rozszerzenia (ang. coverage factor), dla przyjętego poziomu ufności 95% przyjmujący wartość równą 2.

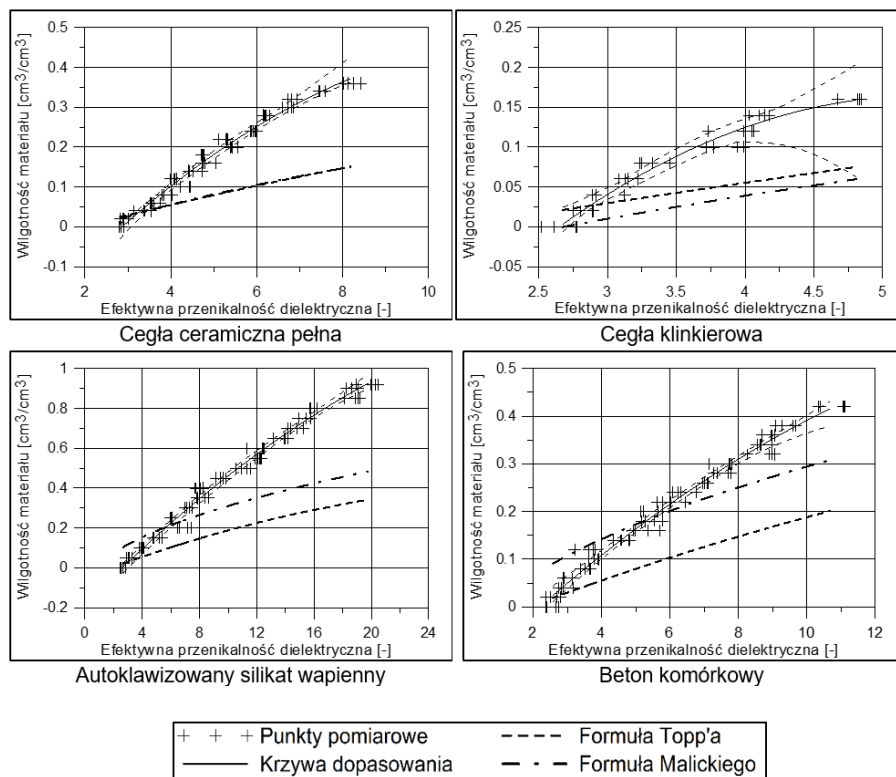
Niepewność rozszerzona, podobnie jak całkowita, jest to wartość zmienna, zależna od stanu wilgotnościowego materiału. Wyróżniono trzy zakresy niepewności pomiarowej w zależności od stanu nasycenia materiału wodą: zakres dolny (materiał suchy), zakres środkowy (materiał umiarkowanie wilgotny), zakres górny (materiał bardzo wilgotny lub w stanie nasycenia). Na-

leży zaznaczyć, że zakresy pomiarowe różnią się w zależności od badanego materiału i konstrukcji sondy.

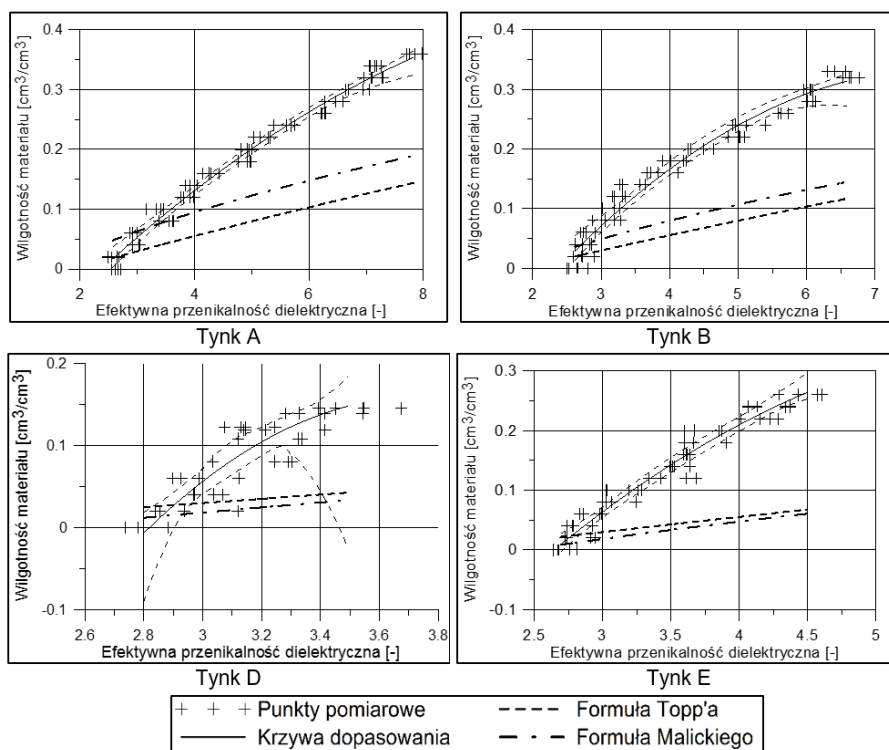
3.3.2. Wyniki badań

3.3.2.1. Wyniki badań kalibracyjnych sondy B1

Wyniki badań kalibracyjnych prototypowej sondy B1 z użyciem wybranych materiałów stanowiących elementy przegród budowlanych przedstawiono na rysunku 3.3.1.



Rys. 3.3.1a. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzoną przez sondę B1, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów



Rys. 3.3.1b. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzoną przez sondę B1, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów

Na rysunku 3.3.1 przedstawiono linie regresji estymowane na podstawie średnich z próby. Są to krzywe stopnia drugiego, opisane równaniem (3.3.2), których charakterystyki zamieszczono w tabeli 3.3.2. Dodatkowo na wykresach przedstawiono przedziały ufności 95% dla estymowanego modelu. W celu wyeksponowania różnic pomiędzy odczytami uzyskanymi sondą B1, a sondami tradycyjnymi, na wykresach przedstawiono wartości wilgotności dla odpowiednich przenikalności dielektrycznych wyznaczone za pomocą formuł Topp'a i in. (1980) i przez Malickiego i in. (1996). Zaobserwowano wyraźny wpływ wzrostu wilgotności próbki na odczyty efektywnej przenikalności dielektrycznej.

Podstawowe różnice w przebiegach krzywych dla sond inwazyjnych i sondy powierzchniowej B1 są następujące:

- w przypadku próbek suchych (0%_{vol}) efektywna przenikalność dielektryczna wyznaczona sondą B1 jest mniejsza od 3 [-]. W większości przypadków zawiera się ona w przedziale 2,6–2,7 [-]. Z przebiegu krzywych wynika, że dla suchych próbek (0%_{vol}) w przypadku formuły Topp'a i in. (1980) odczyty przenikalności dielektrycznej wynoszą ok. 1,9 [-], natomiast w przypadku formuły Malickiego i in. (1996) wahają się w przedziale 1,2–2,0 [-] w zależności od gęstości pozornej badanego materiału,
- odczyty sondą B1 są zbliżone do danych mierzonych sondami inwazyjnymi w zakresie przenikalności dielektrycznej 3–4 [-], co jest konsekwencją podobnych wartości przenikalności dielektrycznej ośrodka porowatego oraz obudowy sondy – ertacetalu o przenikalności 3,8 [-] (Skierucha i in., 2008). W praktyce odpowiada to niewielkiemu zawilgoceniu materiału, a jego stan jest zbliżony do stanu suchego,
- przy wyższych zakresach, odczyty przenikalności dielektrycznej uzyskane z pomiarów sondą powierzchniową B1 wykazują większą wilgotność niż wskazana przez czujniki tradycyjne przy zastosowaniu formuł Topp'a i in. (1980) lub Malickiego i in. (1996). Związane jest to z dużym wpływem obudowy oraz powietrza otaczającego część falowodu na pole elektromagnetyczne generowane przez impuls. Przenikalność tych ośrodków, odpowiednio 3,8 i 1 [-] znacząco obniża efektywną przenikalność dielektryczną odczytaną przez sondę powierzchniową przy danym poziomie wilgotności próbki.

Modele regresji

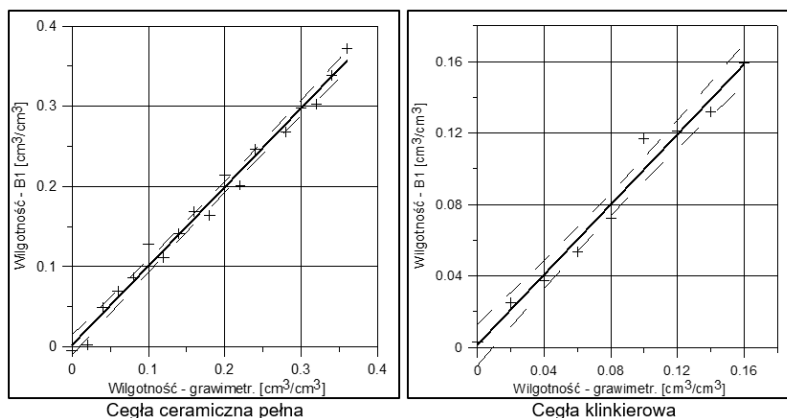
Zależności pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną odczytaną z miernika TDR z wykorzystaniem sondy powierzchniowej B1, a wilgotnością objętościową, opisano za pomocą wzorów empirycznych przedstawionych w tabeli 3.3.2.

Tabela 3.3.2. Formuły kalibracyjne powierzchniowej sondy B1 uzyskane dla poszczególnych materiałów

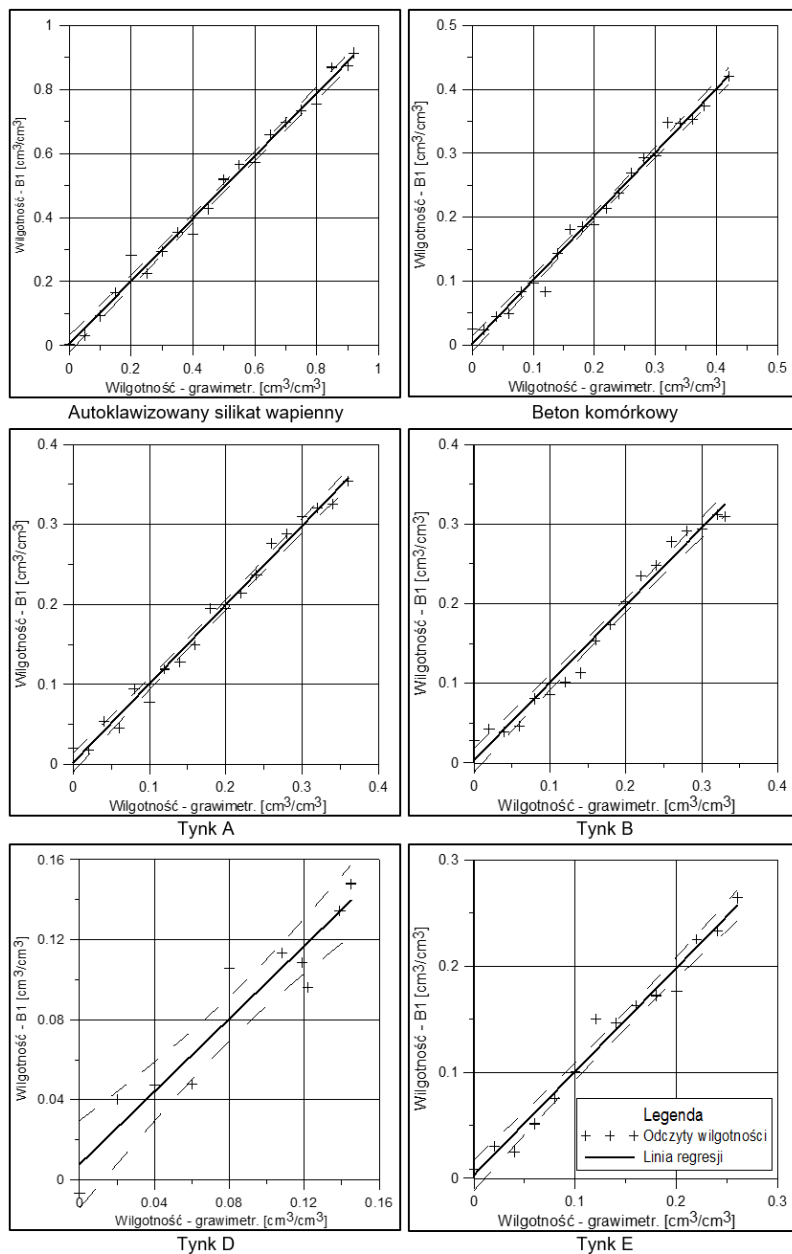
Materiał	Formuła kalibracyjna	R ²	RSE	Statystyka F (Fs)
Cegła ceramiczna pełna	$\theta = -0,310 + 0,1218\epsilon_{\text{eff}} - 0,0047\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,987	0,014 (df=15)	561,274 (***) (df=2;15)
Cegła klinkierowa	$\theta = -0,4891 + 0,24598\epsilon_{\text{eff}} - 0,0231\epsilon_{\text{eff}}^2$ (**) (**) (*)	0,979	0,009 (df = 6)	142,945 (***) (df=2;6)
Autoklawizowany silikat wapienny	$\theta = -0,1851 + 0,0734\epsilon_{\text{eff}} - 0,0009\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,990	0,030 (df=17)	876,04 (***) (df = 2; 17)
Beton komórkowy	$\theta = -0,1463 + 0,0702\epsilon_{\text{eff}} - 0,0016\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (*)	0,988	0,015 (df = 18)	729,722 (***) (df = 2; 18)
Tynk A	$\theta = -0,2301 + 0,1067\epsilon_{\text{eff}} - 0,0041\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,988	0,013 (df = 16)	654,239 (***) (df = 2; 16)
Tynk B	$\theta = -0,3406 + 0,1689\epsilon_{\text{eff}} - 0,0106\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,978	0,017 (df = 15)	336,788 (***) (df = 2; 15)
Tynk D	$\theta = -2,4438 + 1,3896\epsilon_{\text{eff}} - 0,1854\epsilon_{\text{eff}}^2$ () () ()	0,909	0,018 (df = 7)	35,001 (***) (df = 2; 7)
Tynk E	$\theta = -0,6692 + 0,3178\epsilon_{\text{eff}} - 0,0245\epsilon_{\text{eff}}^2$ (**) (**) ()	0,976	0,014 (df = 11)	221,850 (***) (df = 2; 11)

(* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001)

Porównanie wyników uzyskanych z modelu dla sondy B1 i badań grawimetrycznych przedstawiono w postaci wykresów regresji liniowej (rysunek 3.3.2). Równania linii regresji zamieszczono w tabeli 3.3.3.



Rys. 3.3.2a. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy B1, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną



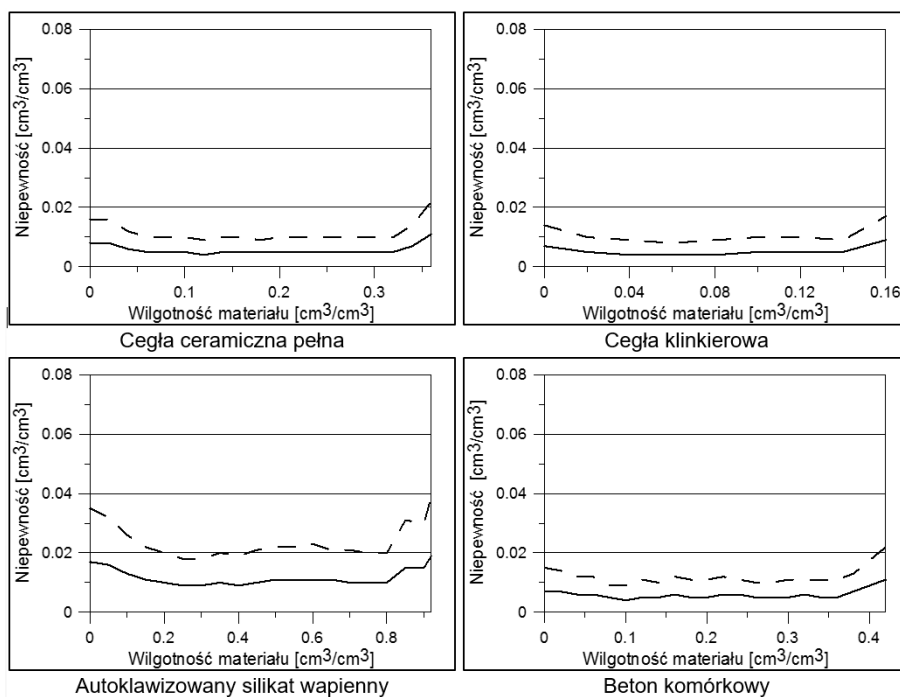
Rys. 3.3.2b. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy B1, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną

Tabela 3.3.3. Weryfikacja jakości przyjętego modelu – sonda B1

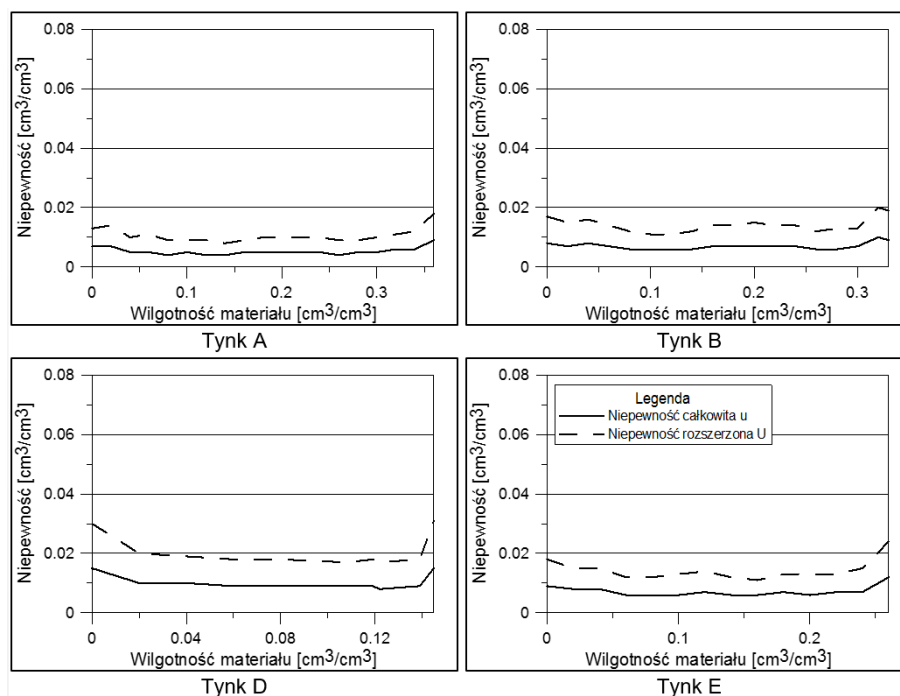
Materiał	Równanie	R ²
Cegła ceramiczna pełna	$\hat{\theta} = 0,986 \cdot \theta + 0,002$	0,987
Cegła klinkierowa	$\hat{\theta} = 0,980 \cdot \theta + 0,001$	0,979
Autoklawizowany silikat wapienny	$\hat{\theta} = 0,977 \cdot \theta + 0,006$	0,990
Beton komórkowy	$\hat{\theta} = 0,998 \cdot \theta + 0,002$	0,988
Tynk A	$\hat{\theta} = 0,988 \cdot \theta + 0,002$	0,988
Tynk B	$\hat{\theta} = 0,974 \cdot \theta + 0,004$	0,978
Tynk D	$\hat{\theta} = 0,909 \cdot \theta + 0,008$	0,909
Tynk E	$\hat{\theta} = 0,977 \cdot \theta + 0,003$	0,976

Całkowita i rozszerzona niepewność pomiarowa

Wyniki obliczeń niepewności całkowitej i rozszerzonej uzyskane na podstawie wzorów (3.3.5) i (3.3.6) przedstawiono w postaci graficznej (rysunek 3.3.3) oraz w formie tabelarycznej (tabela 3.3.4).



Rys. 3.3.3a. Niepewności pomiarowe całkowita i rozszerzona w badaniach wilgotności materiałów za pomocą sondy B1



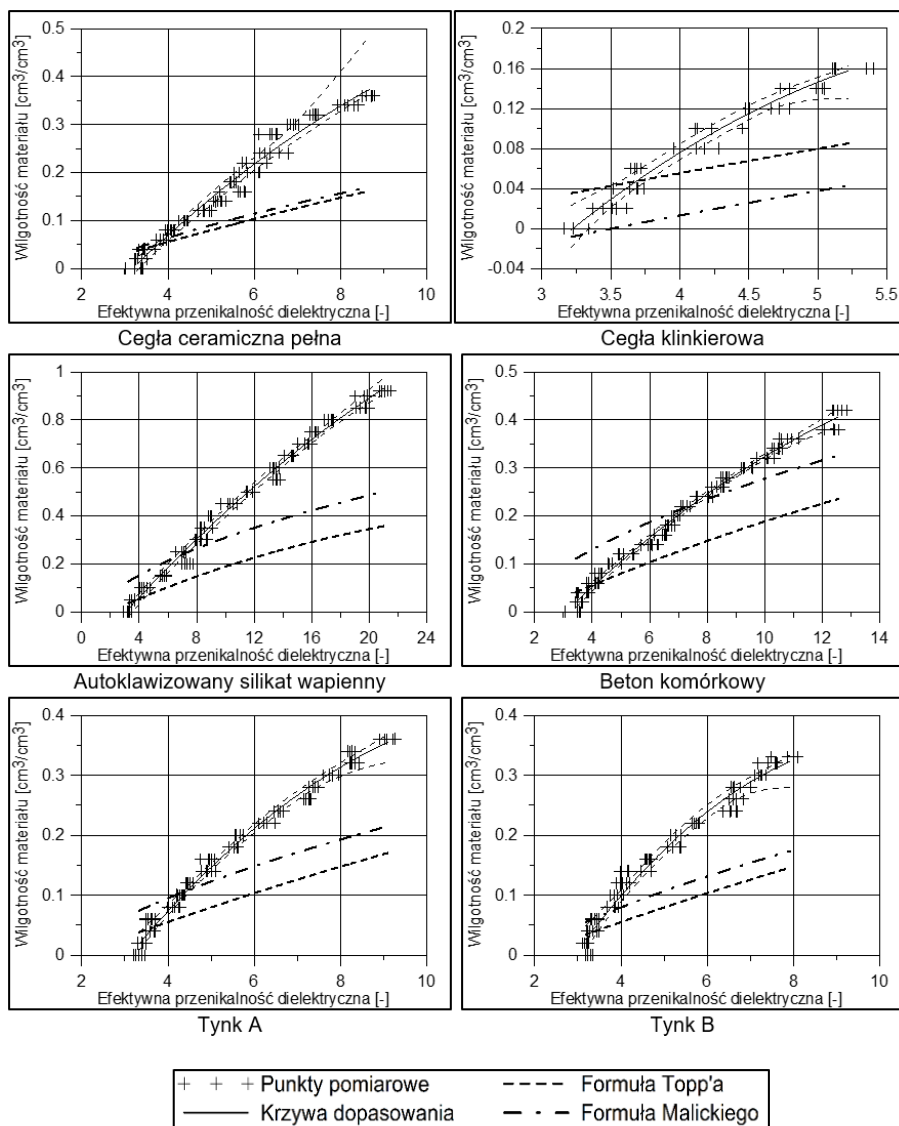
Rys. 3.3.3b. Niepewności pomiarowe całkowita i rozszerzona w badaniach wilgotności materiałów za pomocą sondy B1

Tabela. 3.3.4. Niepewności pomiarowe w badaniach wilgotności materiałów z wykorzystaniem sondy B1 przy różnych zakresach wilgotności

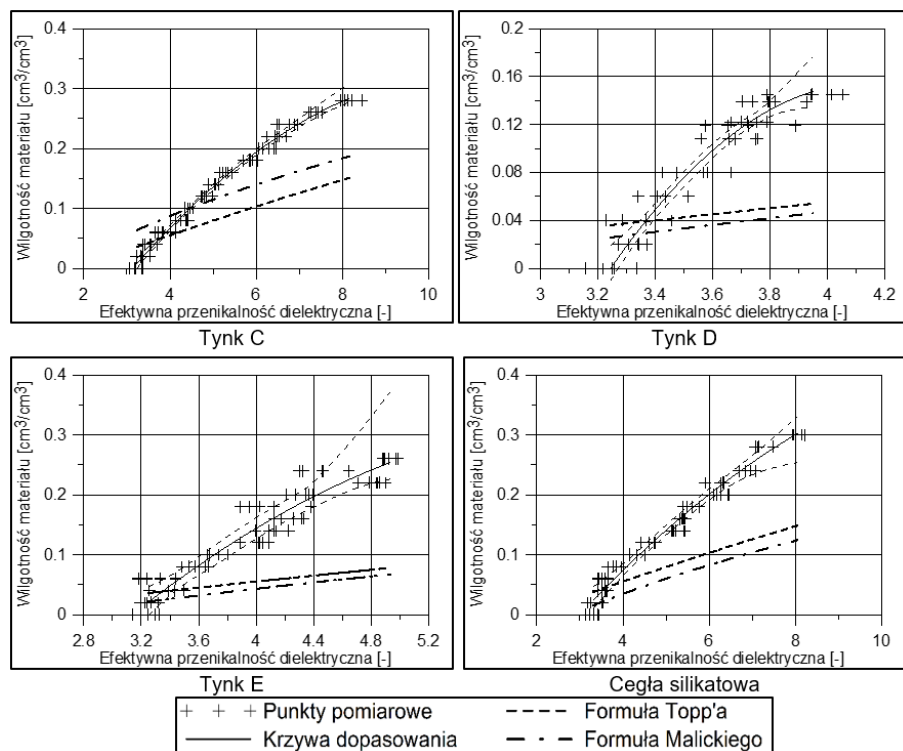
Material	RMSE	U dolny zakres	U zakres środkowy	U górny zakres
-	[cm³/cm³]	[cm³/cm³]	[cm³/cm³]	[cm³/cm³]
Cegła ceramiczna pełna	0,013	0–0,05 0,016	0,05–0,34 0,01	0,34–0,36 0,022
Cegła klinkierowa	0,007	0–0,04 0,014	0,04–0,014 0,009	0,14–0,16 0,017
Silikat wapienny	0,028	0–0,06 0,035	0,06–0,42 0,023	0,85–0,92 0,039
Beton komórkowy	0,014	0–0,10 0,015	0,10–0,42 0,012	0,38–0,42 0,022
Tynk A	0,012	0–0,02 0,014	0,02–0,34 0,010	0,034–0,36 0,018
Tynk B	0,015	0–0,04 0,017	0,04–0,032 0,007	0,32–0,33 0,020
Tynk D	0,015	0–0,04 0,030	0,04–0,14 0,010	0,14–0,145 0,031
Tynk E	0,013	0,0–0,04 0,018	0,04–0,24 0,014	0,024–0,26 0,024

3.3.2.2. Wyniki badań kalibracyjnych sondy B2

Wyniki badań kalibracyjnych prototypowej sondy B2 z wykorzystaniem wybranych materiałów przedstawiono na rysunku 3.3.4.



Rys. 3.3.4a. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) mierzona z wykorzystaniem sondy B2, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów



Rys. 3.3.4b. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) mierzona z wykorzystaniem sondy B2, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów

Zgodnie z przyjętym modelem regresji, przebiegi mają charakter krzywych stopnia drugiego. W celu wyeksponowania różnic pomiędzy wartościami przenikalności dielektrycznej odczytanymi z wykorzystaniem sondy B2 oraz przy zastosowaniu sond typowych, na wykresach przedstawiono wartości wilgotności dla odpowiednich przenikalności dielektrycznych wyznaczone za pomocą formuły Topp'a i in. (1980) oraz formuły Malickiego i in. (1996). Różnice charakterystyk $\epsilon_{\text{eff}} - \theta$ dla sondy B2, sond tradycyjnych i sondy B1, są następujące:

- w przypadku próbek suchych ($0\%_{\text{vol}}$) efektywna przenikalność dielektryczna wyznaczona sondą B2 nieznacznie przekracza wartość 3 [-]. W większości przypadków zawiera się ona w przedziale 3,2–3,3 [-], tylko w przypadku betonu komórkowego odnotowano średnią wartość efektywnej przenikalności dielektrycznej dla próbki suchej równą 3,44 [-]. Podobnie jak

w przypadku sondy B1, w próbkach suchych ($0\%_{\text{vol}}$) odczyty przenikalności dielektrycznej przy zastosowaniu formuły Topp'a i in., (1980) wskazywałyby wartość ok. 1,9 [-], a w przypadku formuły Malickiego i in., (1996) 1,2–1,7 [-] w zależności od gęstości pozornej badanego materiału,

- porównując sondę B2 do sondy B1 (w której falowody mają przekrój kątownika) stwierdzono, że wartości efektywnej przenikalności dielektrycznej w stanie suchym ($0\%_{\text{vol}}$) są nieznacznie wyższe. W przypadku czujnika B1 przedział efektywnej przenikalności dielektrycznej wynosił 2,6–2,7 [-], a w przypadku sondy B2 3,2–3,3 [-]. Różnice należy tłumaczyć kształtem przekroju falowodu oraz sposobem jego kontaktu z badanym materiałem i obudową sondy. W przypadku przekroju kątownego wpływ na pole elektromagnetyczne mają: materiał (styka się z jedną powierzchnią kątownika), obudowa z ertacetalu o przenikalności 3,8 [-] (Skierucha i in., 2008) oraz powietrze o przenikalności 1 [-]. W przypadku sondy B2 falowód ma kształt płaskownika (prostokątny) i styka się jedynie z badanym materiałem oraz materiałem obudowy (ertacetalem). Należy stwierdzić, że większy udział powietrza w przypadku sondy B1 powoduje, że wartość efektywnych przenikalności dielektrycznych jest niższa niż w przypadku sondy B2, w której styk falowodu z powietrzem nie występuje,
- podobnie jak w przypadku sondy B1, sonda B2 pokazuje wartości zbliżone do danych mierzonych sondami inwazyjnymi w przedziale przenikalności dielektrycznej 3–4 [-], co jest konsekwencją analogicznych parametrów dielektrycznych ośrodka porowatego oraz obudowy sondy – ertacetalu o przenikalności 3,8 [-] (Skierucha i in., 2008). W praktyce odpowiada to niewielkiemu zawilgoceniu materiału, a jego stan jest zbliżony do stanu suchego. Spostrzeżenie to dotyczy głównie uniwersalnej formuły Topp'a i in. (1980), ponieważ w przypadku formuły Malickiego i in. (1996) różnice są wyraźne z uwagi na różną gęstość pozorną materiału,
- przy wyższych stanach wilgotności odczyty przenikalności dielektrycznej z wykorzystaniem sondy powierzchniowej B2 wykazują większą wilgotność w porównaniu ze wskazaniami czujników tradycyjnych z uwagi na duży wpływ obudowy o przenikalności dielektrycznej 3,8 [-] na pole elektromagnetyczne generowane przez impuls,
- porównując odczyty efektywnych przenikalności dielektrycznych mierzonych sondami powierzchniowymi B1 i B2 należy zwrócić uwagę, że w przypadku czujnika B2, również przy większych wilgotnościach, uzy-

skiwane są wyższe wartości przenikalności dielektrycznej. O ile w przypadku cegły ceramicznej pełnej różnica dla stanu nasycenia nie jest znaczna i wynosi ok. 0,5 [-], a w przypadku cegły klinkierowej 0,4 [-], to dla autoklawizowanego silikatu wapiennego jest to ok. 1,2 [-], a dla betonu komórkowego aż 1,9 [-]. Różnice należy tłumaczyć inną konstrukcją obudowy sondy i brakiem wpływu powietrza na odczytaną przez miernik efektywną przenikalność dielektryczną.

Modele regresji

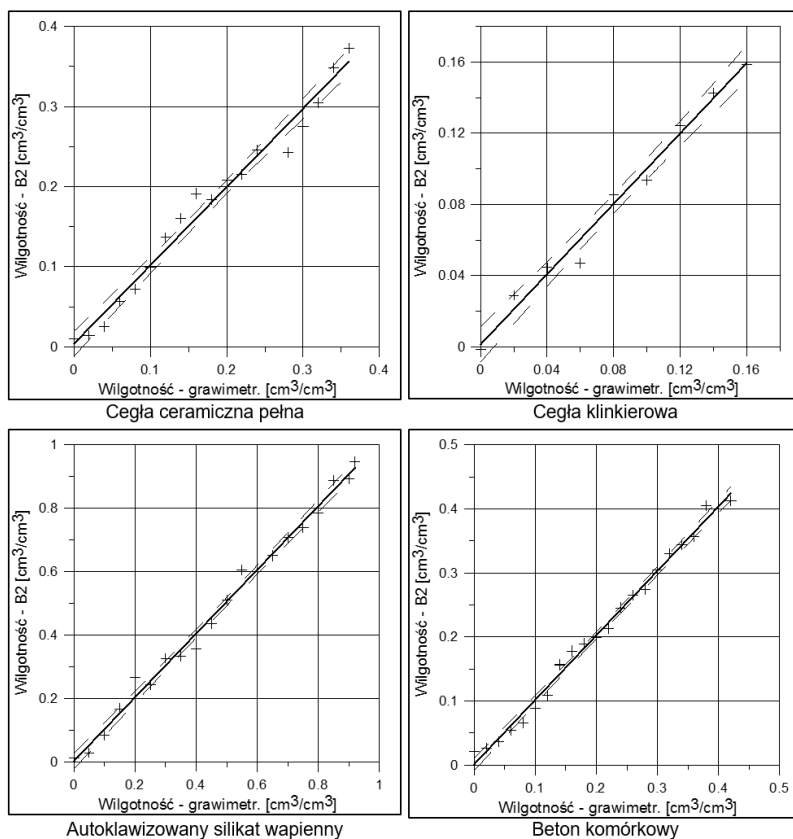
Zależności pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną odczytaną z miernika TDR z wykorzystaniem sondy powierzchniowej B2, a wilgotnością objętościową opisano za pomocą wzorów empirycznych o charakterze wielomianów drugiego stopnia i zamieszczono w tabeli 3.3.5.

Tabela 3.3.5. Formuły kalibracyjne powierzchniowej sondy B2 uzyskane dla poszczególnych materiałów

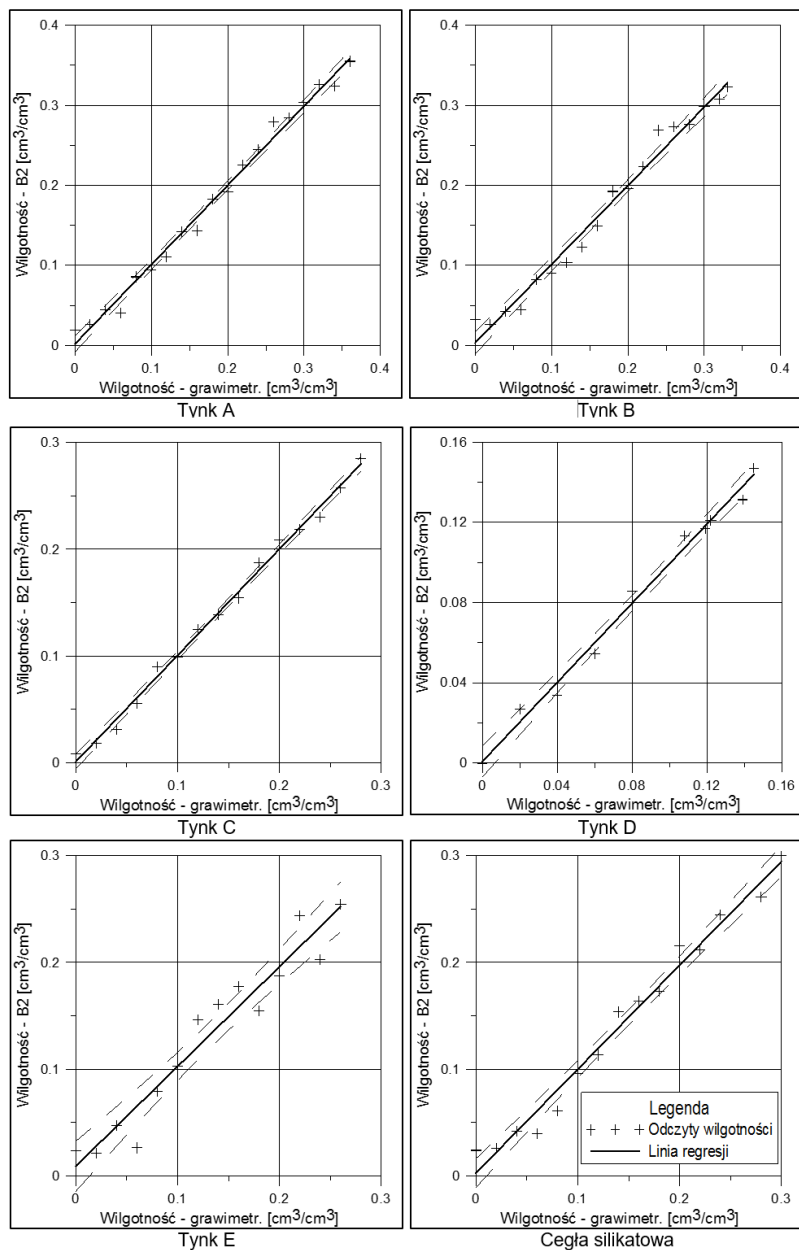
Materiał	Formuła kalibracyjna	R ²	RSE	Statystyka F
Cegła ceramiczna pełna	$\theta = -0,3092 + 0,1082\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0034\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (*)	0,979	0,018 (df = 15)	349,047 (***) (df = 2; 15)
Cegła klinkierowa	$\theta = -0,5165 + 0,2102\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0155\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (**) (*) ()	0,985	0,008 (df = 6)	195,174 (***) (df=2;6)
Autoklawizowany silikat wapienny	$\theta = -0,2062 + 0,0695\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0007\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,992	0,028 (df = 17)	1018,96(***) (df = 2; 17)
Beton komórkowy	$\theta = -0,1911 + 0,0669\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0015\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,992	0,012 (df = 18)	1182,625*** (df = 2; 18)
Tynk A	$\theta = -0,3078 + 0,1129\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0044\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,991	0,011 (df = 16)	870,615 (***) (df = 2; 16)
Tynk B	$\theta = -0,3424 + 0,1371\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0067\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,982	0,015 (df = 15)	398,804 (***) (df = 2; 15)
Tynk C	$\theta = -0,3107 + 0,1154\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0052\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,995	0,007 (df = 12)	1160,01 (***) (df = 2; 12)
Tynk D	$\theta = -3,1545 + 1,599\varepsilon_{\text{eff}} - 0,1932\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (*) (**)	0,989	0,006 (df = 7)	328,730 (***) (df = 2; 7)
Tynk E	$\theta = -0,8722 + 0,3646\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0276\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (*) () ()	0,934	0,023 (df = 11)	78,229 (***) (df = 2; 11)
Cegła silikatowa	$\theta = -0,2597 + 0,0969\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0034\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) ()	0,981	0,014 (df = 12)	309,142 (***) (df = 2; 12)

(* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001)

Porównanie wyników uzyskanych z modelu dla sondy B2 i badań grawimetrycznych przedstawiono w postaci wykresów regresji liniowej (rysunek 3.3.5). Równania linii regresji zamieszczono w tabeli 3.3.6.



Rys. 3.3.5a. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy TDR B2, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną



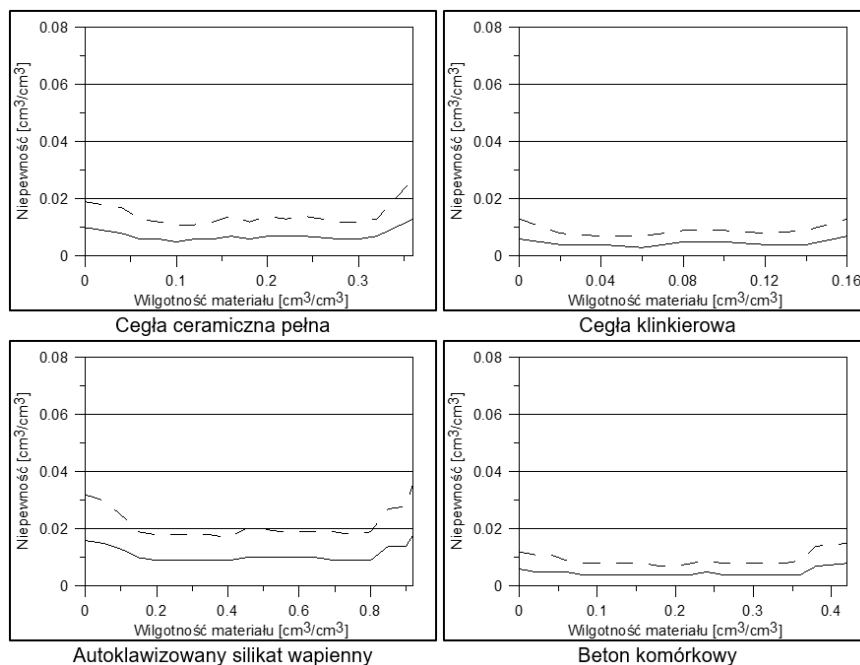
Rys. 3.3.5b. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy TDR B2, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną

Tabela 3.3.6. Weryfikacja jakości przyjętego modelu – sonda B2

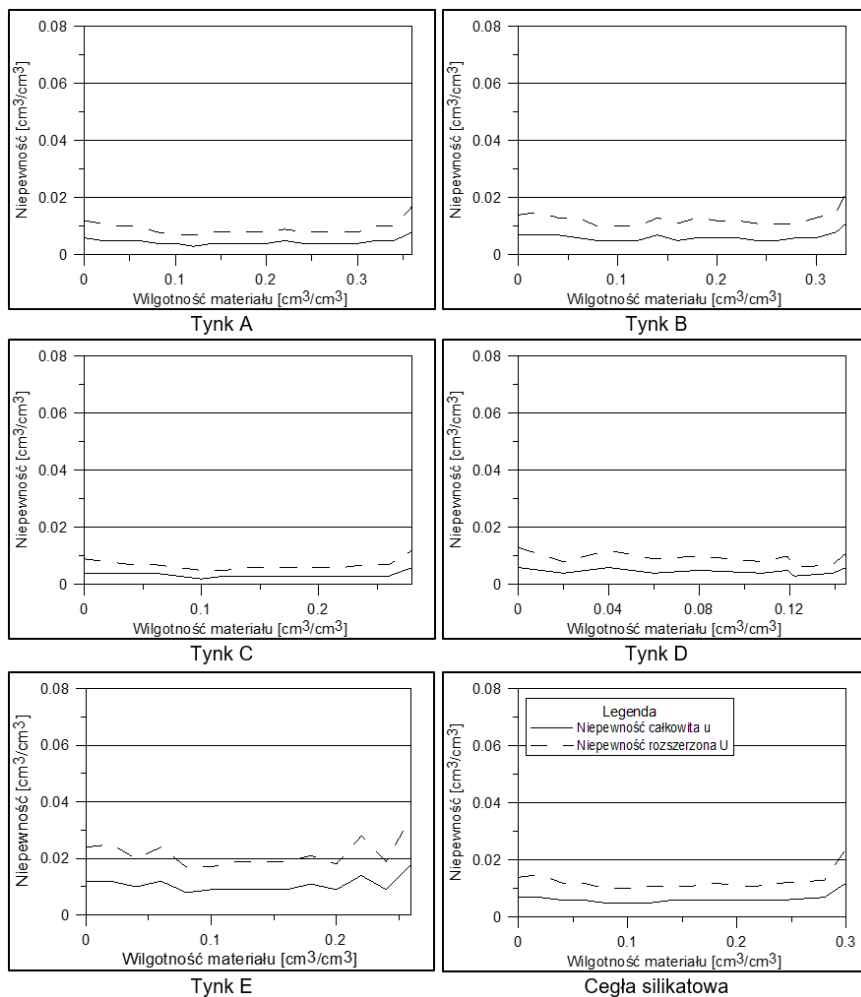
Materiał	Równanie regresji	R ²
Cegła ceramiczna pełna	$\hat{\theta} = 0,979 \cdot \theta + 0,004$	0,979
Cegła klinkierowa	$\hat{\theta} = 0,988 \cdot \theta + 0,001$	0,985
Autoklawizowany silikat wapienny	$\hat{\theta} = 1,006 \cdot \theta + 0,002$	0,992
Beton komórkowy	$\hat{\theta} = 1,007 \cdot \theta + 0,001$	0,992
Tynk A	$\hat{\theta} = 0,992 \cdot \theta + 0,002$	0,991
Tynk B	$\hat{\theta} = 0,983 \cdot \theta + 0,003$	0,982
Tynk C	$\hat{\theta} = 0,997 \cdot \theta + 0,001$	0,995
Tynk D	$\hat{\theta} = 0,989 \cdot \theta + 0,001$	0,989
Tynk E	$\hat{\theta} = 0,936 \cdot \theta + 0,009$	0,934
Cegła silikatowa	$\hat{\theta} = 0,975 \cdot \theta + 0,003$	0,981

Całkowita i rozszerzona niepewność pomiarowa

Wyniki obliczeń niepewności całkowitej i rozszerzonej uzyskane na podstawie wzorów (3.3.5) i (3.3.6) przedstawiono w postaci graficznej (rysunek 3.3.6) dla każdego materiału oraz w formie tabelarycznej (tabela 3.3.7).



Rys. 3.3.6a. Niepewności pomiarowe całkowita i rozszerzona w badaniach wilgotności materiałów za pomocą sondy B2



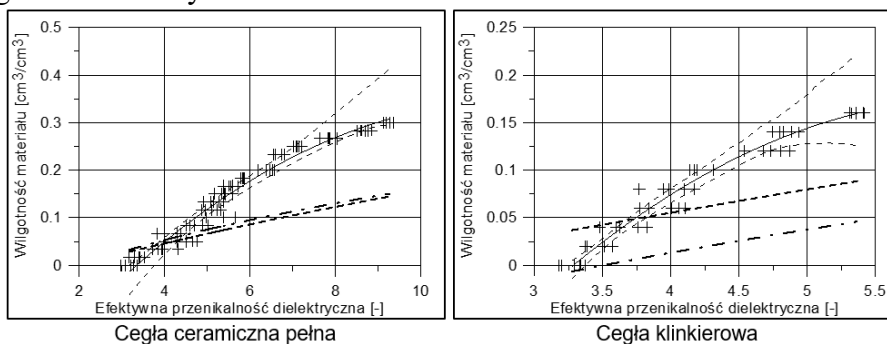
Rys. 3.3.6. Niepewności pomiarowe całkowita i rozszerzona w badaniach wilgotności materiałów za pomocą sondy B2

Tabela. 3.3.7. Niepewności pomiarowe w badaniach wilgotności materiałów z wykorzystaniem sondy B2 przy różnych zakresach wilgotności

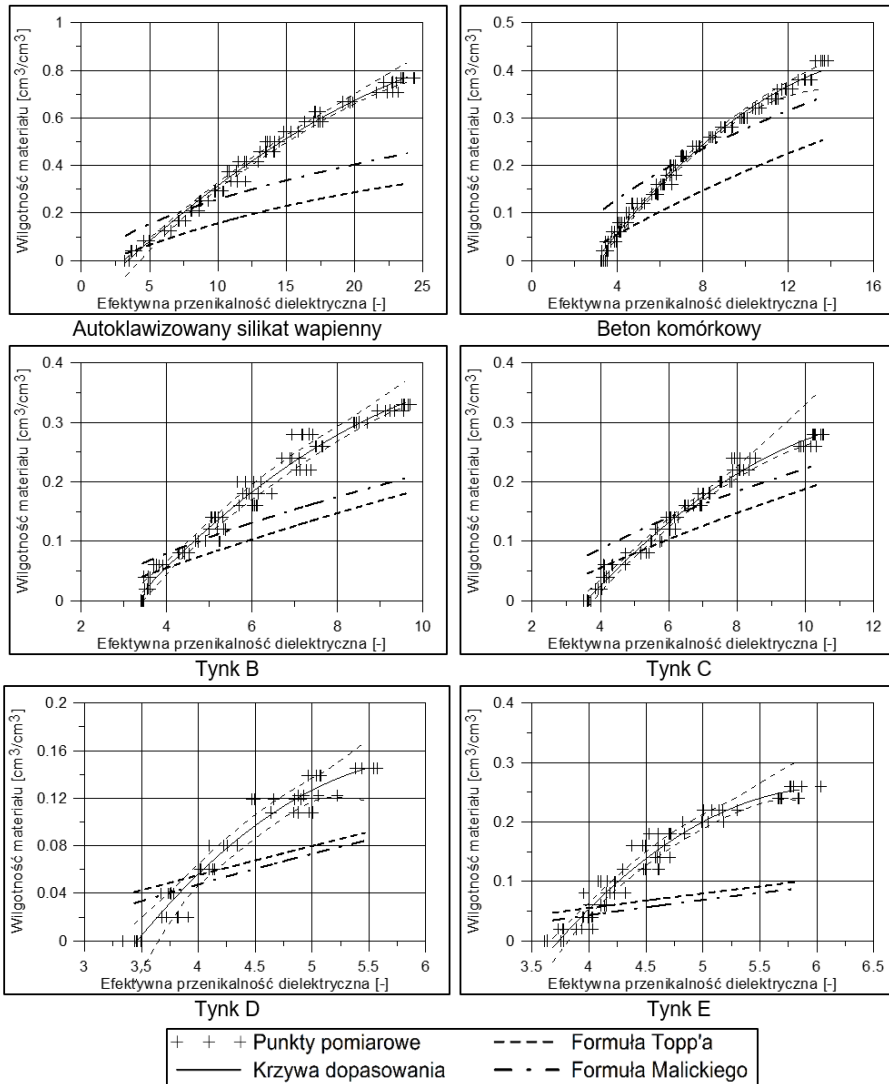
Materiał	RMSE	U dolny zakres	U zakres środkowy	U górny zakres
Cegła ceramiczna pełna	0,016	0–0,05	0,05–0,34	0,34–0,36
		0,019	0,008	0,013
Cegła klinkierowa	0,006	0–0,04	0,04–0,014	0,14–0,16
		0,013	0,009	0,013
Autoklawizowany silikat wapienny	0,026	0–0,10	0,10–0,80	0,80–0,92
		0,032	0,020	0,036
Beton komórkowy	0,011	0–0,10	0,10–0,36	0,38–0,42
		0,012	0,009	0,015
Tynk A	0,010	0–0,06	0,06–0,32	0,032–0,36
		0,012	0,009	0,017
Tynk B	0,014	0–0,02	0,02–0,030	0,30–0,33
		0,014	0,007	0,011
Tynk C	0,006	0–0,06	0,06–0,24	0,24–0,28
		0,009	0,006	0,012
Tynk D	0,005	0–0,04	0,04–0,12	0,12–0,145
		0,013	0,010	0,011
Tynk E	0,021	0,0–0,06	0,04–0,18	0,018–0,26
		0,025	0,019	0,035
Cegła silikatowa	0,013	0,0–0,06	0,06–0,28	0,28–0,30
		0,015	0,012	0,024

3.3.2.3. Wyniki badań kalibracyjnych sondy B3

Na rysunku 3.3.7 przedstawiono wyniki badań kalibracyjnych prototypowej sondy B3 dla wybranych materiałów stanowiących elementy przegród budowlanych.



Rys. 3.3.7a. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzoną z wykorzystaniem sondy B3, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów



Rys. 3.3.7b. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzoną z wykorzystaniem sondy B3, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów

Podobnie jak w przypadku sond powierzchniowych B1 i B2, zależności $\varepsilon_{\text{eff}} - \theta$ mają charakter krzywych stopnia drugiego, zgodnie z przyjętym modelem kalibracji.

Przy kalibracji sondy B3 stwierdzono, że:

- efektywna przenikalność dielektryczna suchych próbek (0%_{vol}) wyznaczona sondą B3 jest wyższa niż w przypadku sondy B1, co jest związane z kształtem przekroju falowodu i wpływem otoczenia na odczyt,
- efektywna przenikalność dielektryczna suchych próbek (0%_{vol}) przekracza 3.0 [-] w stopniu większym niż dla sondy B2 i zawiera się w przedziale 3,3–3,6, jedynie dla próbek z cegły ceramicznej pełnej odnotowano wartość niższą – ok. 3,1 [-]. Wynika to z tego, że w tym przypadku reflektogramy mają bardziej płaski przebieg. Piki pomiarowe są niższe, co można porównać na rysunkach 3.1.3, 3.1.6 oraz 3.1.12. Może to prowadzić do nieprawidłowych odczytów czasu propagacji impulsu w falowodach pomiarowych przez oprogramowanie służące do automatycznej interpretacji reflektogramu,
- podobnie jak w przypadku sond B1 i B2, odczyty wilgotności są wyższe niż wyznaczone z formuł Topp'a i in. (1980) oraz Malickiego i in. (1996), dla których przenikalności w stanie suchym przyjmują wartość poniżej 2,0 [-].
- sonda B3 pokazuje odczyty zbliżone do wskazań sond inwazyjnych w przedziale 3,5–4,5 [-], co należy traktować jako konsekwencję wpływu ertacetalu (obudowy),
- podobnie jak w przypadku sond B1 i B2, odczyty wilgotności wykonane sondą B3 przy danej efektywnej przenikalności dielektrycznej są wyższe niż odpowiadające im wskazania sond inwazyjnych.

Modele regresji

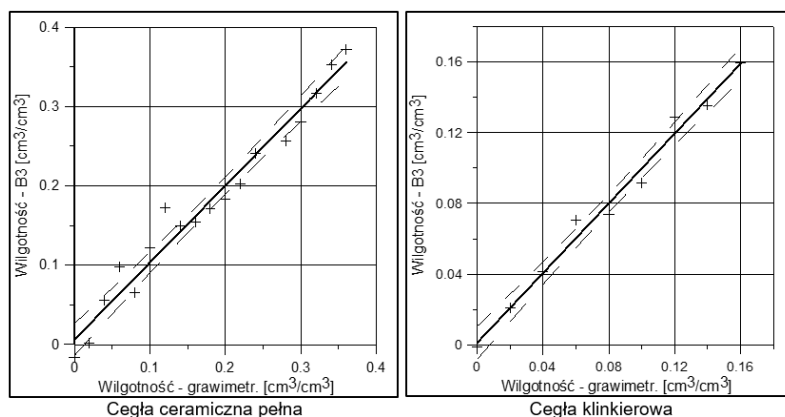
Modele regresji opracowane dla sondy pomiarowej B3 w na podstawie badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 3.3.8.

Tabela 3.3.8. Formuły kalibracyjne powierzchniowej sondy B3 uzyskane dla poszczególnych materiałów

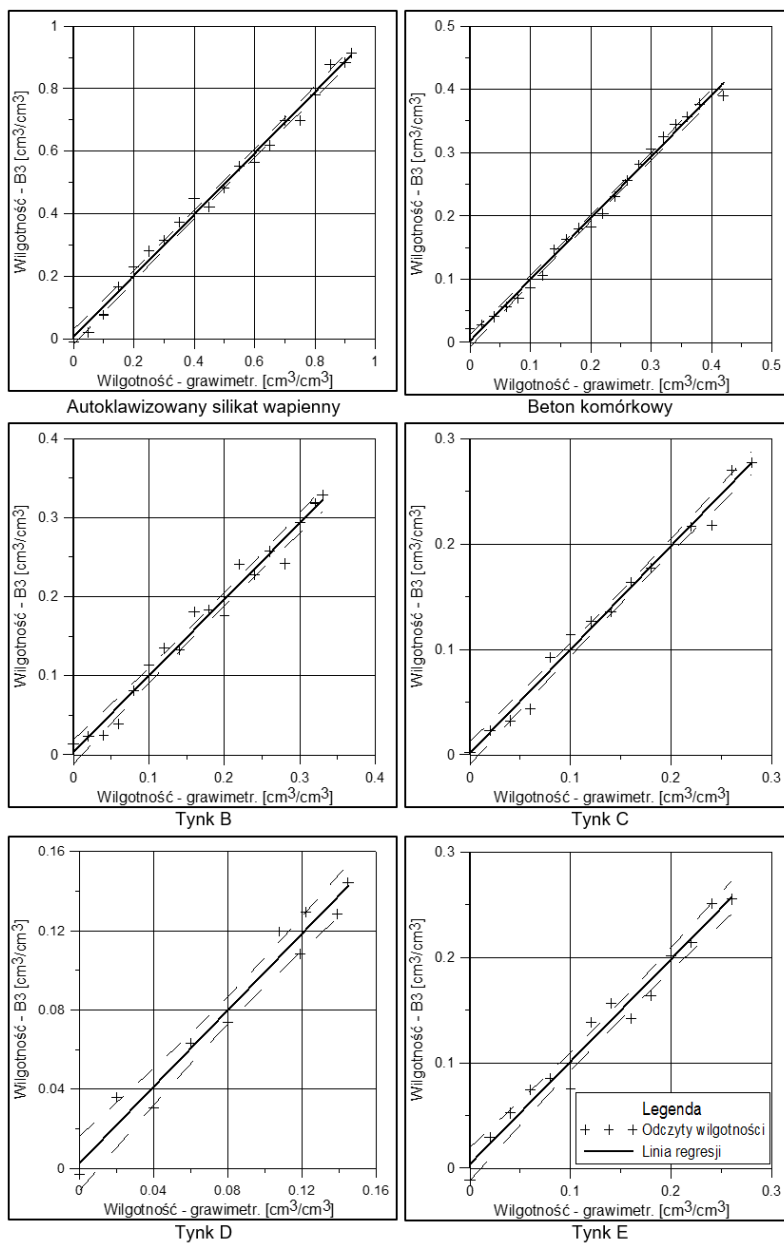
Materiał	Formuła kalibracyjna	R ²	RSE	Statystyka F
Cegła ceramiczna pełna	$\theta = -0,3768 + 0,1309\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0054\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,965	0,023 (df = 15)	206,761 (***) (df = 2; 15)
Cegła klinkierowa	$\theta = -0,6052 + 0,2499\varepsilon_{\text{eff}} - 0,02\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (**) (**) (*)	0,987	0,007 (df = 6)	222,213 (***) (df=2;6)
Autoklaw. siliikat wapienny	$\theta = -0,2258 + 0,0693\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0009\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,992	0,028 (df = 17)	1019,267 (***) (df = 2; 17)
Beton komórkowy	$\theta = -0,1903 + 0,0699\varepsilon_{\text{eff}} - 0,002\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,993	0,011 (df = 18)	1199,803 (***) (df = 2; 18)
Tynk B	$\theta = -0,2898 + 0,1019\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0039\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,977	0,017 (df = 15)	321,551 (***) (df = 2; 15)
Tynk C	$\theta = -0,2622 + 0,0842\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0031\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,988	0,011 (df = 12)	474,451 (***) (df = 2; 12)
Tynk D	$\theta = -0,664 + 0,2676\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0219\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (*) (*) ()	0,966	0,011 (df = 7)	99,382 (***) (df = 2; 7)
Tynk E	$\theta = -1,4231 + 0,5478\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0446\varepsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,972	0,015 (df = 11)	190,004 (***) (df = 2; 11)

(* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001)

Porównanie wyników uzyskanych z modelu dla sondy B3 i badań grawimetrycznych przedstawiono w postaci wykresów (rysunek 3.3.8). Równania linii regresji zamieszczono w tabeli 3.3.9.



Rys. 3.3.8a. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondą TDR B3, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną



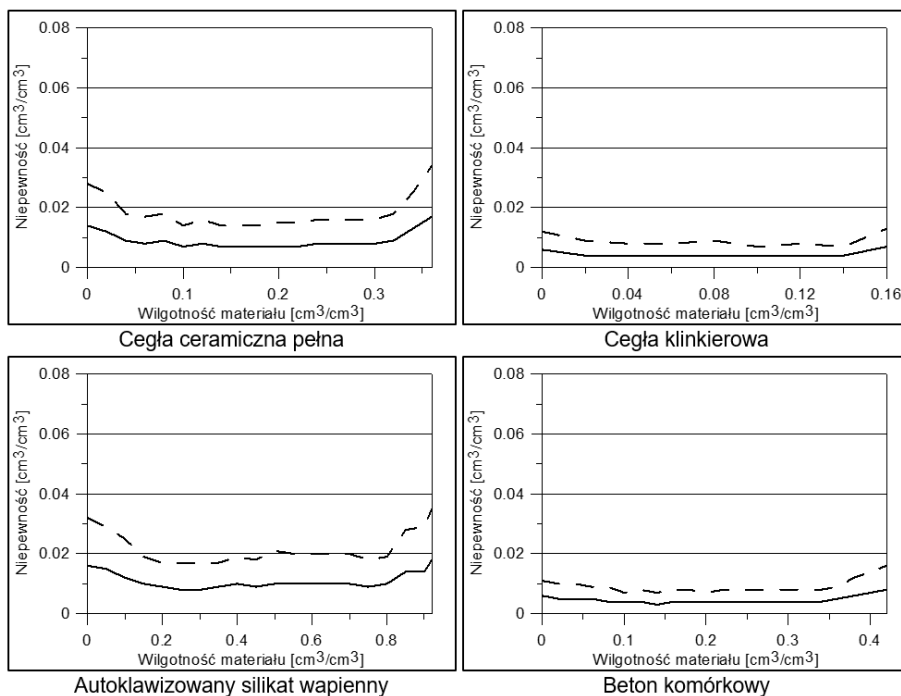
Rys. 3.3.8b. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy TDR B3, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną

Tabela 3.3.9. Weryfikacja jakości przyjętego modelu – sonda B3

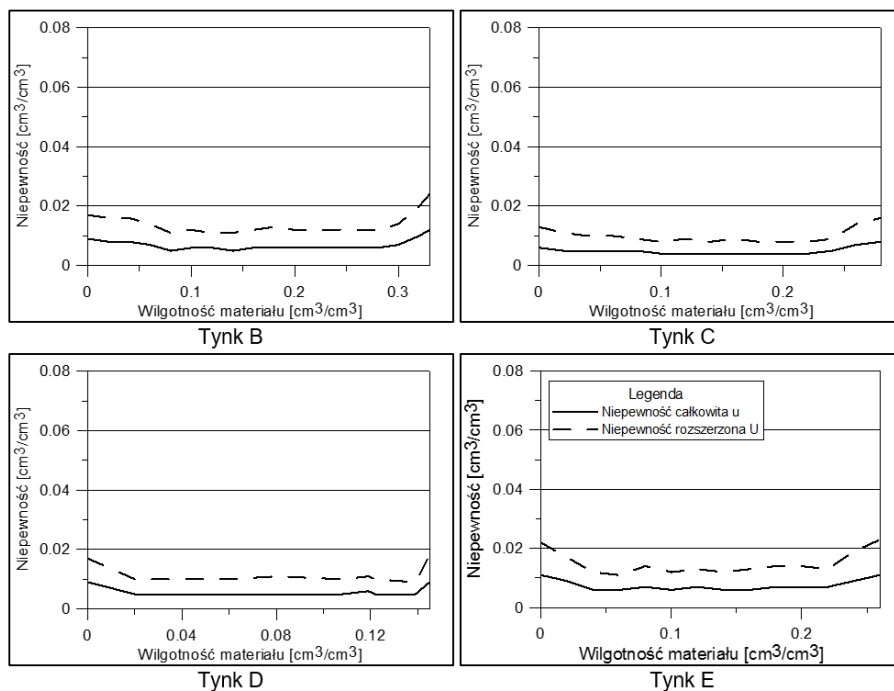
Materiał	Równanie regresji	R ²
Cegła ceramiczna pełna	$\hat{\theta} = 0,971 \cdot \theta + 0,006$	0,965
Cegła klinkierowa	$\hat{\theta} = 0,987 \cdot \theta + 0,001$	0,987
Autoklawizowany silikat wapienny	$\hat{\theta} = 0,980 \cdot \theta + 0,005$	0,992
Beton komórkowy	$\hat{\theta} = 0,972 \cdot \theta + 0,002$	0,993
Tynk B	$\hat{\theta} = 0,966 \cdot \theta + 0,004$	0,977
Tynk C	$\hat{\theta} = 0,984 \cdot \theta + 0,002$	0,988
Tynk D	$\hat{\theta} = 0,965 \cdot \theta + 0,003$	0,966
Tynk E	$\hat{\theta} = 0,973 \cdot \theta + 0,004$	0,972

Całkowita i rozszerzona niepewność pomiarowa

Wyniki obliczeń niepewności całkowitej i rozszerzonej uzyskane dla poszczególnych materiałów na podstawie wzorów (3.3.5) i (3.3.6) przedstawiono w postaci graficznej (rysunek 3.3.9) oraz w formie tabelarycznej (tabela 3.3.10).



Rys. 3.3.9a. Niepewność pomiarowa całkowita i rozszerzona w badaniach wilgotności materiałów za pomocą sondy B3



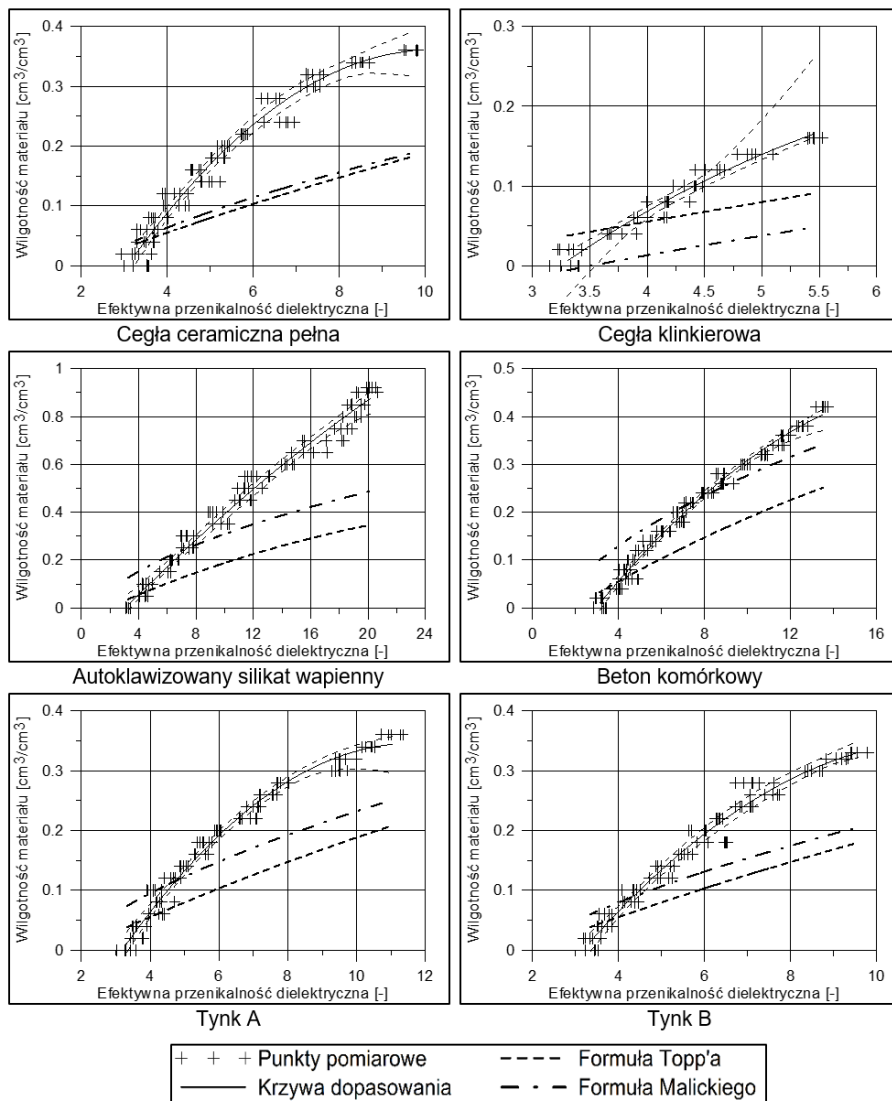
Rys. 3.3.9b. Niepewność pomiarowa całkowita i rozszerzona, sonda B3

Tabela. 3.3.10. Niepewności pomiarowe w badaniach wilgotności materiałów z wykorzystaniem sondy B3 przy różnych zakresach wilgotności

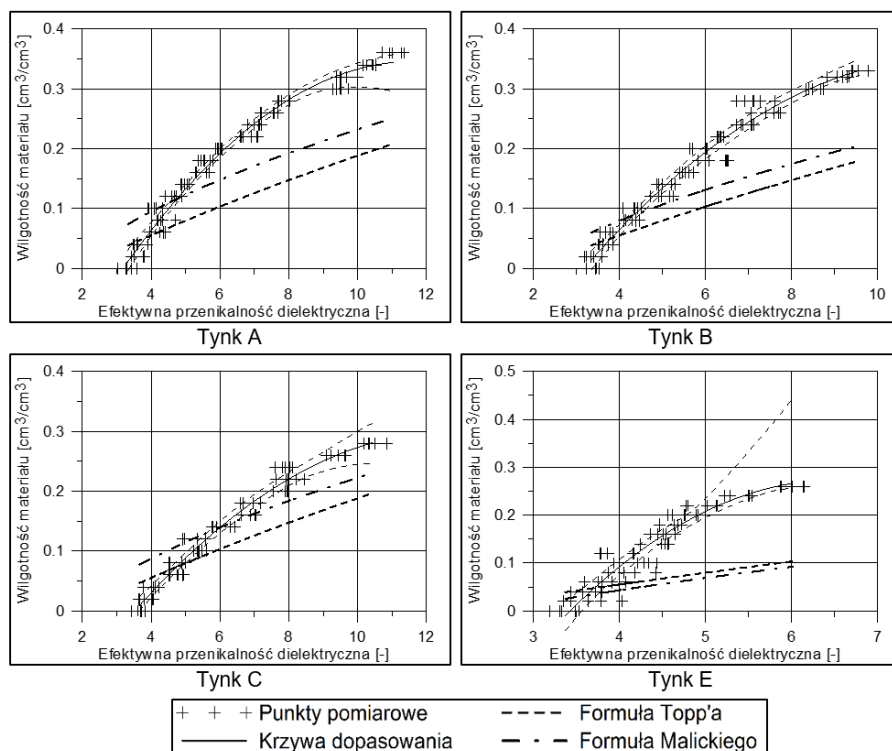
Material	RMSE	U dolny zakres	U zakres środkowy	U górny zakres
Cegła ceramiczna pełna	0,021	0–0,08	0,05–0,30	0,30–0,36
		0,028	0,016	0,034
Cegła klinkierowa	0,006	0–0,02	0,02–0,014	0,14–0,16
		0,012	0,009	0,013
Autoklawizowany silikat wapienny	0,026	0–0,10	0,10–0,80	0,80–0,92
		0,032	0,021	0,035
Beton komórkowy	0,011	0–0,08	0,08–0,36	0,36–0,42
		0,011	0,008	0,016
Tynk B	0,016	0–0,06	0,06–0,028	0,28–0,33
		0,017	0,013	0,024
Tynk C	0,010	0–0,02	0,02–0,26	0,26–0,28
		0,013	0,009	0,016
Tynk D	0,009	0–0,02	0,04–0,14	0,14–0,145
		0,017	0,011	0,018
Tynk E	0,014	0,0–0,02	0,02–0,24	0,24–0,26
		0,022	0,014	0,023

3.3.2.4. Wyniki badań kalibracyjnych sondy B4

Wyniki badań kalibracyjnych prototypowej sondy B4 z użyciem wybranych materiałów stanowiących elementy przegród budowlanych przedstawiono na rysunku 3.3.10.



Rys. 3.3.10a. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzona z wykorzystaniem sondy B4, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów



Rys. 3.3.10b. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzona z wykorzystaniem sondy B4, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów

Analiza wyników wykazała następujące różnice w porównaniu do typowych konstrukcji sond oraz sond powierzchniowych B1, B2 i B3 przedstawionych we wcześniejszej części opracowania:

- efektywna przenikalność dielektryczna suchych próbek ($0\%_{\text{vol}}$) wyznaczona sondą B4 przekracza wartość 3,0 [-] i w większości przypadków jest zbliżona do wartości odczytywanych przez sondę B3. Powyższa cecha jest konsekwencją podobnej budowy czujnika (szerokości sensora i analogicznego udziału poszczególnych materiałów, różnica dotyczy jedynie ilości falowodów),
- podobnie jak w przypadku sond B1-B3, w zakresie przenikalności dielektrycznej 3,5–4,5 [-] wilgotności odczytywane są zbliżone do wskazań sond inwazyjnych,

- w stanach podwyższonego zawilgocenia sonda B4 wykazuje wyższą wartość wilgotności przy odczytanej przenikalności dielektrycznej niż sonda inwazyjna.

Modele regresji

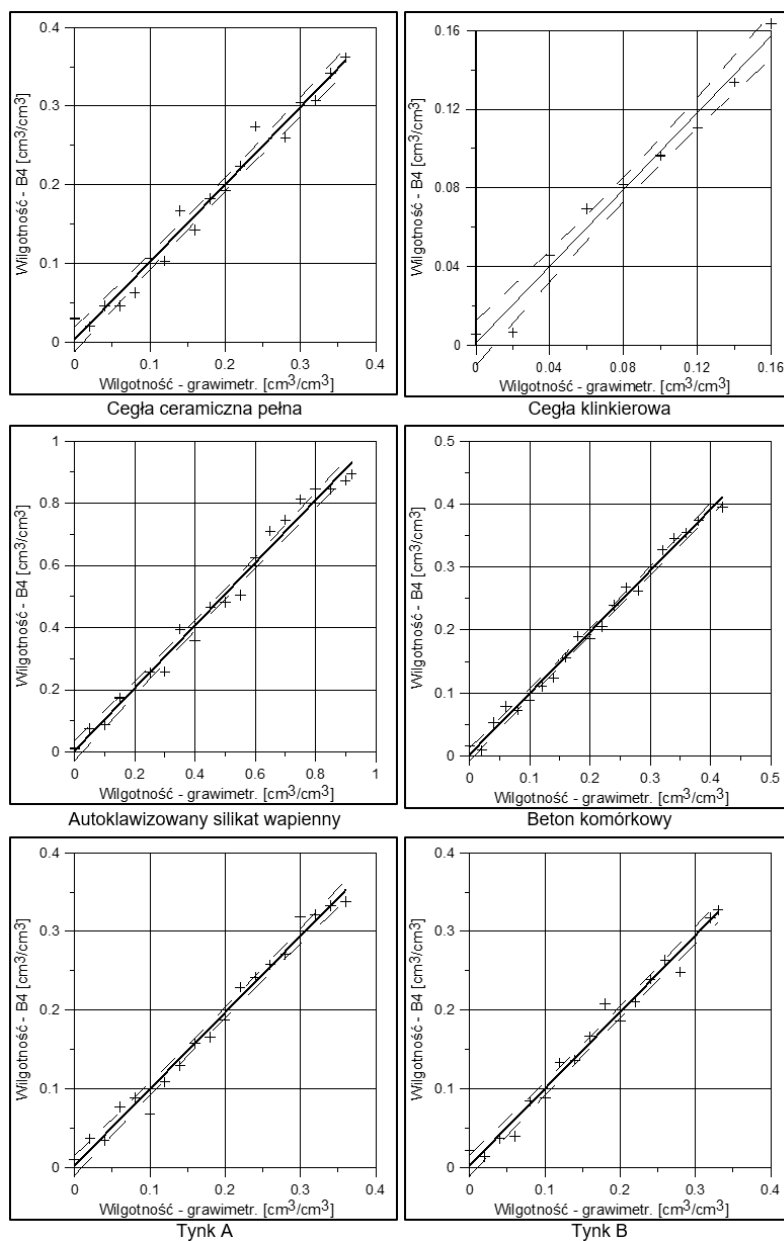
Modele regresji opracowane dla sondy pomiarowej B4 na podstawie badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 3.3.11.

Tabela 3.3.11. Formuły kalibracyjne powierzchniowej sondy B4 uzyskane dla poszczególnych materiałów

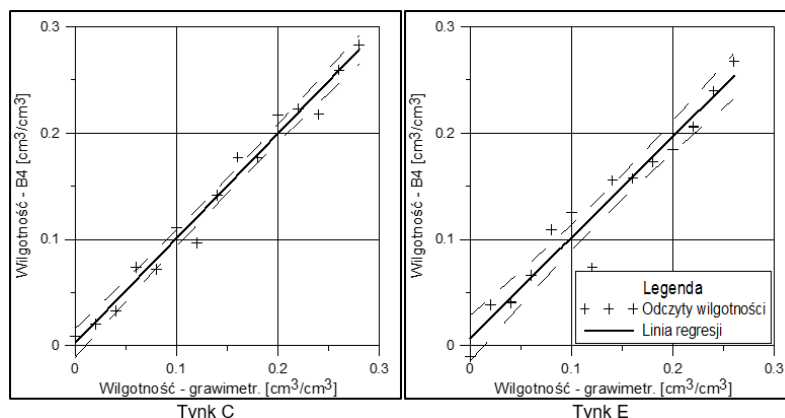
Material	Formuła kalibracyjna	R ²	RSE	Statystyka F
Cegła ceramiczna pełna	$\theta = -0,3776 + 0,1451\epsilon_{\text{eff}} - 0,0071\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,979	0,018 (df = 15)	353,649 (***) (df = 2; 15)
Cegła klinkierowa	$\theta = -0,4244 + 0,1646\epsilon_{\text{eff}} - 0,0104\epsilon_{\text{eff}}^2$ (*) (*) ()	0,980	0,009 (df = 6)	143,961 (***) (df=2;6)
Autoklaw. silikat wapienny	$\theta = -0,191 + 0,0639\epsilon_{\text{eff}} - 0,0005\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) ()	0,987	0,036 (df = 17)	632,515 (***) (df = 2; 17)
Beton komórkowy	$\theta = -0,174 + 0,0638\epsilon_{\text{eff}} - 0,0016\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,991	0,012 (df = 18)	1041,898 (***) (df = 2; 18)
Tynk A	$\theta = -0,3101 + 0,1128\epsilon_{\text{eff}} - 0,0049\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,986	0,014 (df = 16)	550,232 (***) (df = 2; 16)
Tynk B	$\theta = -0,3079 + 0,1123\epsilon_{\text{eff}} - 0,0048\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,983	0,015 (df = 15)	421,270 (***) (df = 2; 15)
Tynk C	$\theta = -0,2722 + 0,0897\epsilon_{\text{eff}} - 0,0035\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,981	0,013 (df = 12)	304,157 (***) (df = 2; 12)
Tynk E	$\theta = -0,939 + 0,372\epsilon_{\text{eff}} - 0,0285\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (**) (*)	0,946	0,021 (df = 11)	96,525 (***) (df = 2; 11)

(* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001)

Porównanie wyników uzyskanych z modelu dla sondy B4 i badań grawimetrycznych przedstawiono w postaci wykresów (rysunek 3.3.11). Równania linii regresji zamieszczono w tabeli 3.3.12.



Rys. 3.3.1 a. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy TDR B4, a wilgotnością określoną grawimetrycznie



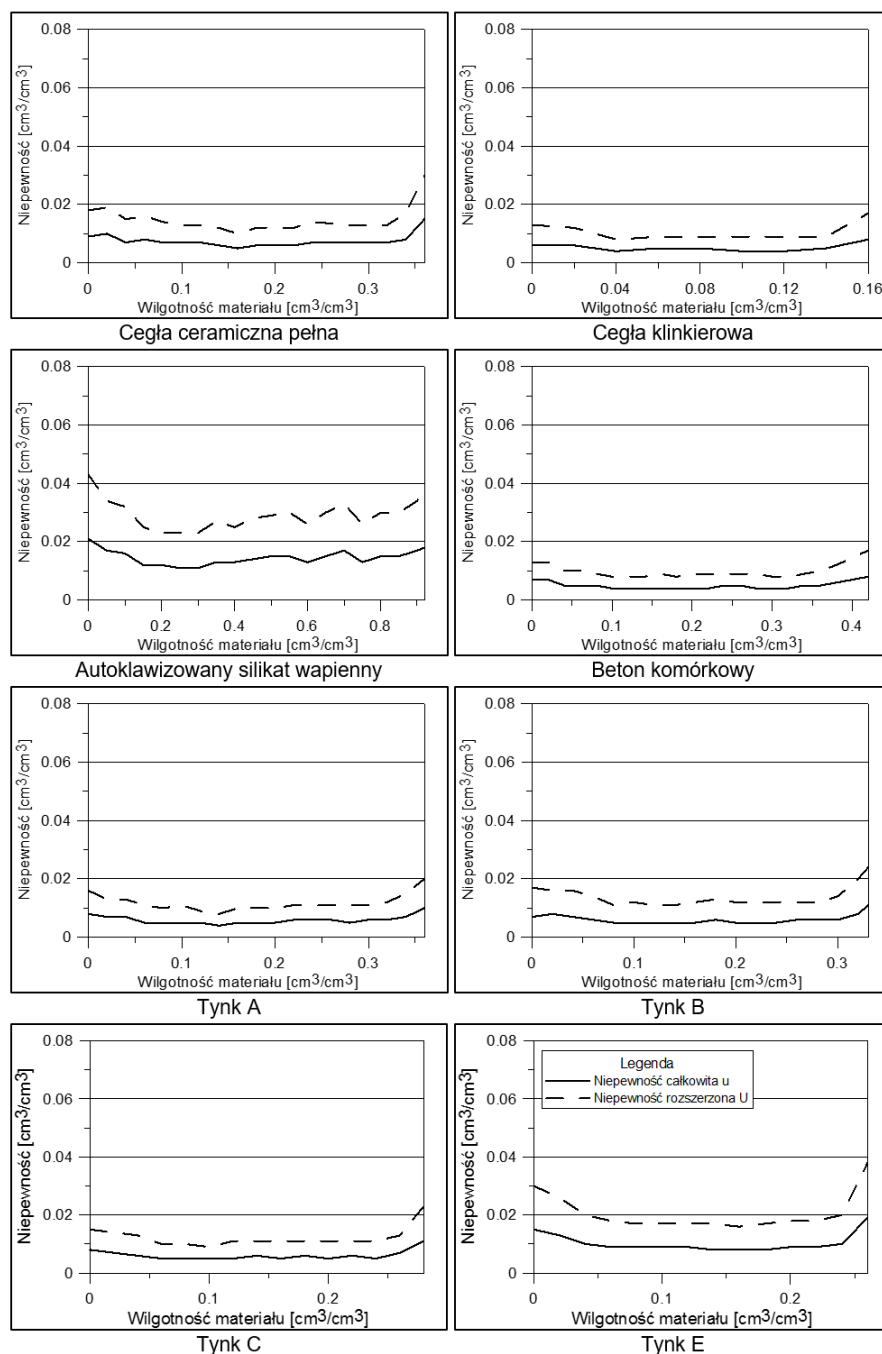
Rys. 3.3.11b. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy TDR B4, a wilgotnością określoną grawimetrycznie

Tabela 3.3.12. Weryfikacja jakości przyjętego modelu – sonda B4

Materiał	Równanie regresji	R ²
Cegła ceramiczna pełna	$\hat{\theta} = 0,984 \cdot \theta + 0,004$	0,987
Cegła klinkierowa	$\hat{\theta} = 0,975 \cdot \theta + 0,001$	0,980
Autoklawizowany silikat wapienny	$\hat{\theta} = 1,007 \cdot \theta + 0,004$	0,991
Beton komórkowy	$\hat{\theta} = 0,972 \cdot \theta + 0,003$	0,991
Tynk A	$\hat{\theta} = 0,971 \cdot \theta + 0,003$	0,986
Tynk B	$\hat{\theta} = 0,974 \cdot \theta + 0,003$	0,983
Tynk C	$\hat{\theta} = 0,985 \cdot \theta + 0,003$	0,981
Tynk E	$\hat{\theta} = 0,948 \cdot \theta + 0,007$	0,946

Całkowita i rozszerzona niepewność pomiarowa

Wyniki obliczeń niepewności całkowitej i rozszerzonej uzyskane dla poszczególnych materiałów na podstawie wzorów (3.3.5) i (3.3.6) przedstawiono w postaci graficznej (rysunek 3.3.12) oraz w formie tabelarycznej (tabela 3.3.13).



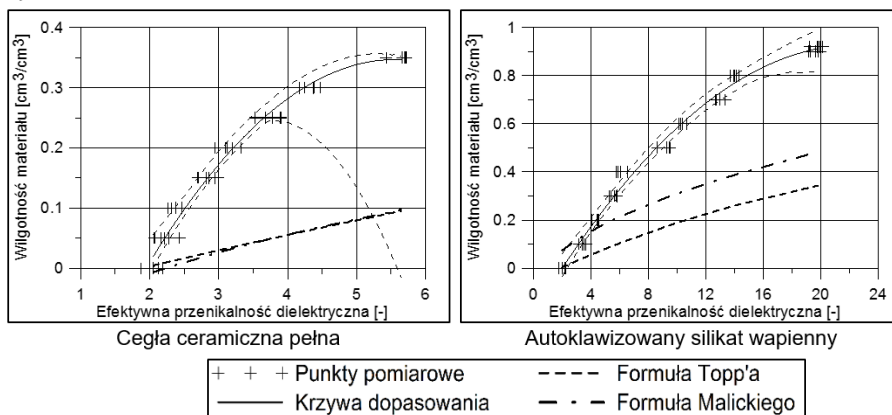
Rys. 3.3.12 Niepewność pomiarowa całkowita i rozszerzona, sonda B4

Tabela 3.3.13. Niepewności pomiarowe w badaniach wilgotności z wykorzystaniem sondy B4 materiałów przy różnych zakresach wilgotności

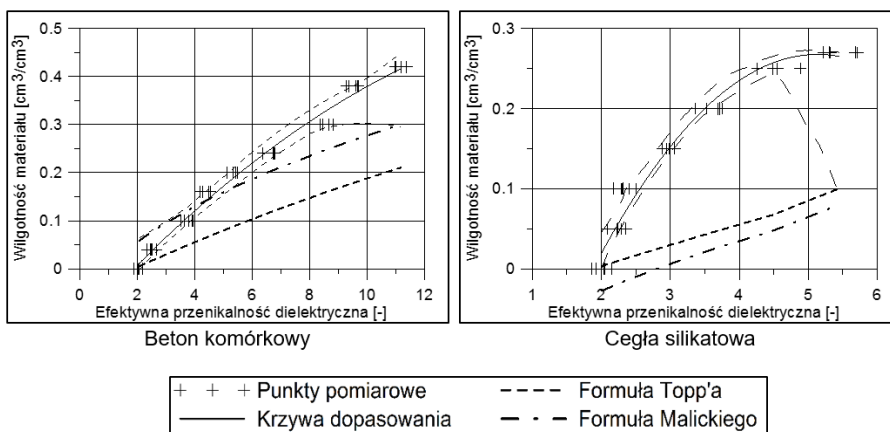
Material	RMSE	U dolny zakres	U zakres środkowy	U górny zakres
Cegła ceramiczna pełna	0,016	0–0,06	0,06–0,34	0,34–0,36
		0,019	0,014	0,030
Cegła klinkierowa	0,007	0–0,02	0,02–0,014	0,14–0,16
		0,013	0,009	0,017
Autoklawizowany silikat wapienny	0,033	0–0,15	0,15–0,60	0,60–0,92
		0,043	0,030	0,037
Beton komórkowy	0,011	0–0,06	0,06–0,36	0,36–0,42
		0,013	0,009	0,017
Tynk A	0,013	0–0,04	0,04–0,32	0,032–0,36
		0,016	0,012	0,020
Tynk B	0,014	0–0,06	0,06–0,030	0,30–0,33
		0,016	0,012	0,021
Tynk C	0,012	0–0,04	0,04–0,26	0,26–0,28
		0,015	0,011	0,023
Tynk E	0,019	0,0–0,04	0,04–0,24	0,24–0,26
		0,030	0,018	0,038

3.3.2.5. Wyniki badań kalibracyjnych sondy C

Na rysunku 3.3.13 przedstawiono wyniki badań kalibracyjnych prototypowej sondy C dla wybranych materiałów stanowiących elementy przegród budowlanych.



Rys. 3.3.13a. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzoną przez sondę C, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów



Rys. 3.3.13b. Zależność pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną (ϵ_{eff}) zmierzoną przez sondę C, a wilgotnością objętościową (θ) badanych materiałów

W badaniach kalibracyjnych sondy powierzchniowej typu C zaobserwowano następujące zależności:

- sonda typu C wykazuje najmniejszą wartość odczytów ϵ_{eff} próbek w stanie powietrzno-suchym w porównaniu do pozostałych konstrukcji czujników. Wartość ta zawiera się w przedziale 2,00–2,08 [-] i jest niższa od wartości dla pozostałych czujników powierzchniowych, w tym sondy B1 o falowodzie w kształcie kątownika. Zaobserwowaną prawidłowość można wyjaśnić następująco. Przenikalność dielektryczna polichlorku winylu, z którego wykonano obudowę dystansującą falowody pomiarowe, wynosi 3,0–3,3 [-] (www.matweb.com), zaś przenikalność dielektryczna ertacetalu z którego wykonano sensory B1-B4 jest większa i osiąga 3,8 [-] (Skierucha i in., 2008). Ponadto obudowa PCW jest bardzo cienka i pręty, poza kontaktem z badanym materiałem, w całości eksponowane są na działanie powietrza, które według większości opracowań charakteryzuje się przenikalnością dielektryczną równą 1 [-] (Curtis i Defandorf, 1929; Davis i Annan, 1989; Daniels, 1996; Korhonen i in., 1997). W związku z powyższym, wartość wypadkowa, będąca efektywną przenikalnością dielektryczną odczytywaną dla materiałów suchych przez sondę C jest mniejsza niż w przypadku pozostałych sond,

- w odróżnieniu od pozostałych sond powierzchniowych B1-B4, dla próbek w stanie powietrzno-suchym sonda typu C wykazuje wartości zbliżone do wykazywanych przez typowe formuły kalibracyjne dla sond inwazyjnych. Niniejsza uwaga dotyczy głównie uniwersalnej formuły Topp'a i in. (1980), gdzie zgodność wykazano dla wszystkich przebadanych materiałów. W przypadku formuły Malickiego i in. (1996), która w szacowaniu wilgotności uwzględnia również gęstość materiału, istnieją odstępstwa od tej reguły,
- przy stanach podwyższonej wilgotności, odczyty ϵ_{eff} za pomocą sondy typu C wskazują na wyższą wilgotność niż przy wykorzystaniu tradycyjnych sond i formuł kalibracyjnych – podobnie jak w przypadku pozostałych sond powierzchniowych,
- dla stanów maksymalnego nasycenia odczyty przenikalności dielektrycznej za pomocą sondy powierzchniowej typu C są niższe od analogicznych wskazań sond typoszeregu B. W zależności od materiału, różnica w odczytach ϵ_{eff} zawiera się w przedziale 0,5–4,0 [-].

Modele regresji

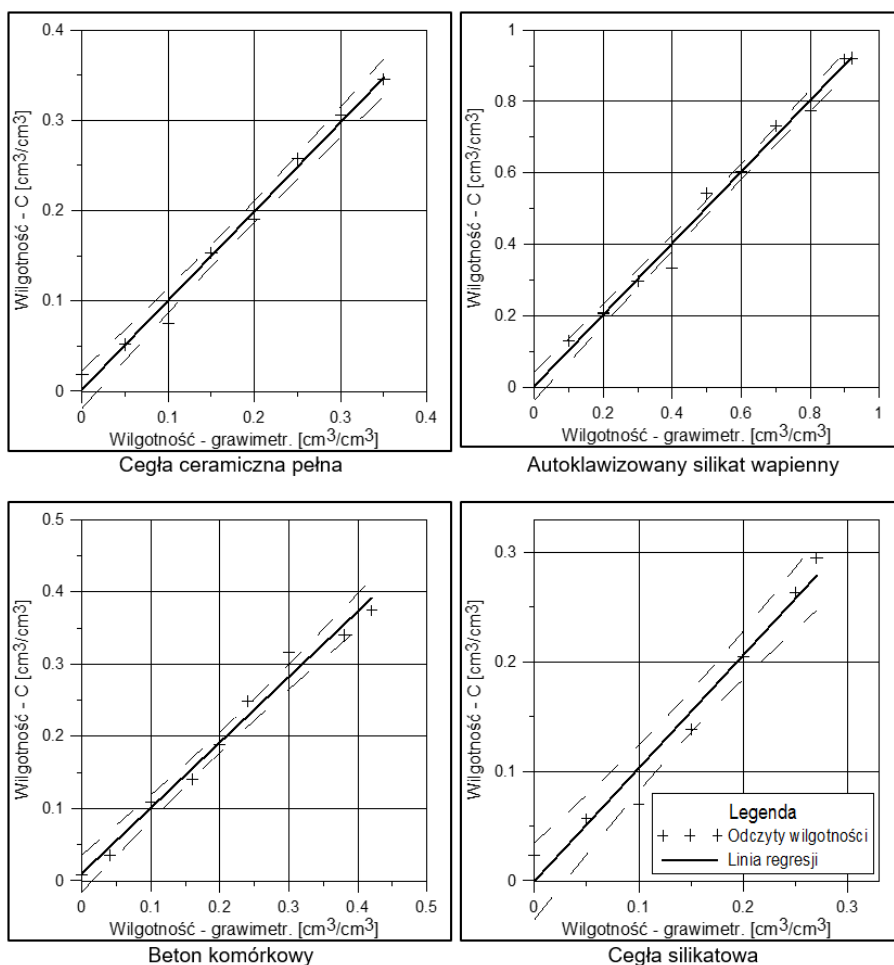
Zależności pomiędzy efektywną przenikalnością dielektryczną odczytaną z miernika TDR z wykorzystaniem sondy powierzchniowej C opisano za pomocą modeli regresji przedstawionych w tabeli 3.3.14.

Tabela 3.3.14. Formuły kalibracyjne powierzchniowej sondy C uzyskane dla poszczególnych materiałów

Materiał	Formuła kalibracyjna	R ²	RSE	Statystyka F
Cegła ceramiczna pełna	$\theta = -0,474 + 0,2948\epsilon_{\text{eff}} - 0,0265\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (**)	0,988	0,016 (df = 5)	214,302 (***) (df = 2; 5)
Autoklaw. silikat wapienny	$\theta = -0,1921 + 0,0998\epsilon_{\text{eff}} - 0,0022\epsilon_{\text{eff}}^2$ (***) (***) (***)	0,991	0,033 (df = 8)	465,398 (***) (df = 2; 8)
Beton komórkowy	$\theta = -0,1381 + 0,076\epsilon_{\text{eff}} - 0,0027\epsilon_{\text{eff}}^2$ (**) (***) (**)	0,991	0,015 (df = 6)	323,373 (***) (df = 2; 6)
Cegła silikatowa	$\theta = -0,341 + 0,2199\epsilon_{\text{eff}} - 0,019\epsilon_{\text{eff}}^2$ (*) (**) (*)	0,973	0,022 (df = 4)	72,287 (***) (df = 2; 4)

(* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001)

Porównanie wyników uzyskanych z modelu dla sondy C i badań grawimetrycznych przedstawiono w postaci wykresów (rysunek 3.3.14). Równania linii regresji zamieszczono w tabeli 3.3.15.



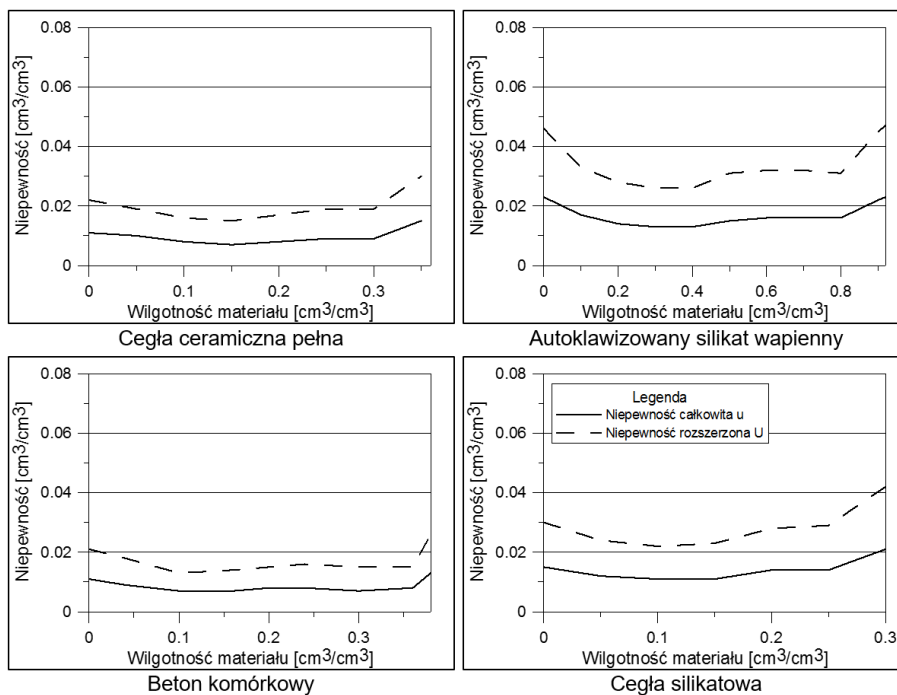
Rys. 3.3.14. Zależności pomiędzy wilgotnością odczytaną za pomocą powierzchniowej sondy TDR C, a wilgotnością określoną metodą grawimetryczną

Tabela 3.3.15. Weryfikacja jakości przyjętego modelu – sonda C

Materiał	Równanie regresji	R ²
Cegła ceramiczna pełna	$\hat{\theta} = 0,986 \cdot \theta + 0,002$	0,988
Autoklawizowany silikat wapienny	$\hat{\theta} = 1,001 \cdot \theta + 0,003$	0,991
Beton komórkowy	$\hat{\theta} = 0,978 \cdot \theta + 0,002$	0,991
Cegła silikatowa	$\hat{\theta} = 0,974 \cdot \theta + 0,004$	0,973

Całkowita i rozszerzona niepewność pomiarowa

Wyniki obliczeń niepewności całkowitej i rozszerzonej uzyskane dla poszczególnych materiałów na podstawie wzorów (3.3.5) i (3.3.6) przedstawiono w postaci graficznej (rysunek 3.3.15) oraz w formie tabelarycznej (tabela 3.3.16).



Rysunek 3.3.15. Niepewności pomiarowe całkowita i rozszerzona w badaniach wilgotności materiałów za pomocą sondy C

Tabela 3.3.16. Niepewności pomiarowe w badaniach wilgotności z wykorzystaniem sondy C

Materiał	RMSE	U dolny zakres	U zakres środkowy	U górny zakres
Cegła ceramiczna pełna	0,012	0–0,05	0,05–0,30	0,30–0,36
		0,022	0,019	0,030
Autoklawizowany silikat wapienny	0,028	0–0,10	0,10–0,80	0,80–0,92
		0,046	0,032	0,047
Beton komórkowy	0,011	0–0,04	0,04–0,36	0,36–0,42
		0,021	0,016	0,026
Cegła silikatowa	0,016	0–0,05	0,05–0,20	0,20–0,27
		0,030	0,023	0,042

3.3.3. Dyskusja wyników

Przyjęty model regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia adekwatnie odwzorowuje zależność pomiędzy wilgotnością badanego ośrodka, a odczytami za pomocą sond powierzchniowych. Potwierdzają to następujące parametry statystyczne:

- współczynnik determinacji (R^2), którego wartość w większości przypadków przekracza 0,9,
- liniowe równania regresji ze współczynnikami kierunkowymi zbliżonymi do jedności uzyskane przy porównaniu danych z badań laboratoryjnych i przyjętych modeli,
- wartości standardowych błędów estymacji RSE (ang. Residual Standard Error) w większości przypadków poniżej $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,
- w większości przypadków poziomy istotności poszczególnych estymatorów w równaniach regresji (p-value) przyjmują wartość niższą od 0,001,
- wartości średniokwadratowego błędu estymacji (RMSE), jako miary niepewności pomiarowej, są w wielu przypadkach niższe niż w przypadku równań kalibracyjnych opracowanych dla czujników inwazyjnych,
- wartości niepewności pomiarowej całkowitej (u_c) i rozszerzonej (U) są w wielu wypadkach niższe niż w przypadku niepewności równań opracowanych dla czujników inwazyjnych. Zakresy dolny i górny cechują się najwyższą wartością niepewności pomiarowej, zaś najniższe wartości niepewności notowane są w przypadku przedziału środkowego. Jest to cecha większości urządzeń mierniczych, w tym przypadku jest to głównie spowodowane właściwościami przyjętego modelu regresji (Wu, 2010).

Szczegółową analizę cech statystycznych przyjętego modelu kalibracji i niepewności pomiarowych dla poszczególnych sensorów przedstawiono w tabeli 3.3.17.

Tabela 3.3.17. Cechy statystyczne przyjętego modelu kalibracji i niepewności pomiarowe poszczególnych sond

	R ²	Funkcja korelacji/ współczynniki kierunkowe	RSE [cm ³ /cm ³]	Wartość statystyki F	Krytyczny poziom istotności estymatorów	RMSE [cm ³ /cm ³]	U [cm ³ /cm ³]
B1	0,976–0,990 wyjątek: tynk D – 0,909	Liniowa 0,974–0,998 wyj.: tynk D – 0,909	0,01–0,03	We wszystkich przypadkach p<0,001 (***), potwierdza istotność statystyczną przyjętych modeli regresji	p < 0,001 wyjątki: tynk D β ₀ , β ₁ , β ₂ p > 0,05 tynk E β ₂ p > 0,05	0,007–0,028	Zakres środkowy: 0,01–0,023 Zakres skrajny, powyżej 0,04
B2	0,979–0,992 wyjątek: tynk E – 0,934	Liniowa 0,975–1,007 wyj.: tynk E – 0,936	0,01–0,03	We wszystkich przypadkach p<0,001, potwierdza istotność statystyczną przyjętych modeli regresji	p < 0,001 wyjątki: cegła klinkierowa, cegła silikatowa, tynk E β ₂ p > 0,05	0,010–0,026	Zakres środkowy: 0,006–0,02 Zakres skrajny, powyżej 0,035
B3	0,965–0,993	Liniowa 0,965–0,987	0,011–0,028	We wszystkich przypadkach p<0,001, potwierdza istotność statystyczną przyjętych modeli regresji	p < 0,001 p < 0, 01 p < 0, 05 wyjątki: cegła klinkierowa, cegła silikatowa, tynk D β ₂ > 0,05	0,010–0,026	Zakres środkowy: 0,01–0,02 Zakres skrajny, powyżej 0,035
B4	0,979–0,991 wyjątek: tynk E – 0,946	Liniowa 0,948–1,007	0,009–0,036	We wszystkich przypadkach p<0,001, potwierdza istotność statystyczną przyjętych modeli regresji	Większość p < 0,001 w niektórych przypadkach β ₂ p < 0,01; 0,05 wyjątki: cegła klinkierowa, autoklawizowany silikat wapienny: β ₂ p > 0,05	0,010–0,026	Zakres środkowy: 0,007–0,03 Zakres skrajny, powyżej 0,04
C	0,972–0,991	Liniowa 0,974–1,001	0,015–0,033	We wszystkich przypadkach p<0,001, potwierdza istotność statystyczną przyjętych modeli regresji	większość p < 0,001 w niektórych przypadkach β ₂ p < 0,01; 0,05	0,011–0,028	Zakres środkowy: 0,011–0,032 Zakres skrajny, powyżej 0,045

Krytyczne poziomy istotności poszczególnych estymatorów dla większości modeli przyjmują wartość niższą od 0,001 (***), co potwierdza ich istotność statystyczną. Najniższe wartości p cechują estymatory β_0 i β_1 . W przypadku estymatorów β_2 wartości p są zazwyczaj niższe niż 0,001; 0,01 lub 0,05, co potwierdza wysoki stopień dopasowania przyjętego modelu regresji do danych pomiarowych. W niektórych przypadkach $p > 0,05$, (szczególnie dla estymatorów β_2), co oznacza niski poziom istotności. Jednocześnie analiza statystyki F ($p < 0,001$) we wszystkich przypadkach potwierdza istotność statystyczną przyjętych modeli.

W wyniku badań kalibracyjnych uzyskano modele regresji opisujące zależności pomiędzy odczytami efektywnej przenikalności dielektrycznej, a wilgotnością badanych próbek. Podstawowe parametry określające niepewności pomiarowe sensorów dla poszczególnych materiałów przedstawiono w tabelach 3.3.18 – 3.3.20. Są to współczynniki determinacji R^2 (określające jaki procent danych obejmuje przyjęty model regresji), współczynniki RMSE (opisujące jakość dopasowania modelu do danych pomiarowych) oraz rozszerzone niepewności pomiarowe (U).

Tabela 3.3.18. Zestawienie współczynników determinacji (R^2) dla modeli regresji

Materiał	B1	B2	B3	B4	C
Cegła ceramiczna pełna	0,987	0,979	0,965	0,979	0,988
Cegła klinkierowa	0,979	0,985	0,987	0,980	-
Autoklawizowany silikat wapienny	0,990	0,992	0,992	0,987	0,991
Beton komórkowy	0,988	0,992	0,993	0,991	0,991
Tynk A	0,988	0,991	-	0,986	-
Tynk B	0,978	0,982	0,977	0,983	-
Tynk C	-	0,995	0,988	0,981	-
Tynk D	0,909	0,989	0,966	-	-
Tynk E	0,976	0,934	0,972	0,946	-
Cegła silikatowa	-	0,981	-	-	0,973

Tabela 3.3.19. Zestawienie niepewności pomiarowych RMSE sond dla poszczególnych materiałów

Materiał	Wilgotność maksymalna	B1	B2	B3	B4	C
Cegła ceramiczna pełna	0,36	0,013	0,016	0,021	0,016	0,012
Cegła klinkierowa	0,16	0,007	0,006	0,006	0,007	-
Autoklawizowany silikat wapienny	0,92	0,028	0,026	0,026	0,033	0,028
Beton komórkowy	0,42	0,014	0,011	0,011	0,011	0,011
Tynk A	0,36	0,012	0,010	-	0,013	-
Tynk B	0,33	0,015	0,014	0,016	0,014	-
Tynk C	0,28	-	0,006	0,010	0,012	-
Tynk D	0,15	0,015	0,005	0,009	-	-
Tynk E	0,26	0,013	0,021	0,014	0,019	-
Cegła silikatowa	0,27	-	0,013	-	-	0,016

Tabela 3.3.20. Rozszerzone niepewności pomiarowe U sond w środkowym zakresie pomiarowym dla poszczególnych materiałów

Materiał	Wilgotność maksymalna	B1	B2	B3	B4	C
Cegła ceramiczna pełna	0,36	0,01	0,008	0,016	0,014	0,019
Cegła klinkierowa	0,16	0,009	0,009	0,009	0,009	-
Autoklawizowany silikat wapienny	0,92	0,023	0,020	0,021	0,030	0,032
Beton komórkowy	0,42	0,012	0,009	0,008	0,009	0,016
Tynk A	0,36	0,010	0,009	-	0,012	-
Tynk B	0,33	0,007	0,007	0,013	0,012	-
Tynk C	0,28	-	0,006	0,009	0,011	-
Tynk D	0,15	0,010	0,010	0,011	-	-
Tynk E	0,26	0,014	0,019	0,014	0,018	-
Cegła silikatowa	0,27	-	0,012	-	-	0,023

Wykazano, że najkorzystniejsze parametry miernicze posiada sonda B2 oraz sonda C. Średnia wartość współczynnika determinacji (R^2) dla sondy B2 wynosi 0,982, średnia wartość $RMSE = 0,0128 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, a średnia wartość niepewności rozszerzonej $U = 0,0109 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Sonda C uzyskała następujące wartości średnie ze wszystkich pomiarów: $R^2 = 0,986$, $RMSE = 0,0168 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i $U = 0,0225 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Obie konstrukcje wybrano do badań testowych i zastosowano w dalszej części pracy.

Porównanie niepewności pomiarowych opracowanych modeli z danymi z literatury

Jednym z parametrów określających niepewność pomiarową przyjętego modelu regresji jest RMSE, często stosowany w literaturze do określenia niepewności przyjętych formuł kalibracyjnych na potrzeby pomiarów wilgotności z wykorzystaniem tradycyjnych, inwazyjnych sond TDR.

Z tabeli 3.3.18 można odczytać, że wartość RMSE uzyskana dla wszystkich modeli zawiera się w przedziale od 0,005 do 0,33 cm^3/cm^3 . Najniższe wartości tego współczynnika (0,005–0,007 cm^3/cm^3) odnotowano dla cegły klinkierowej oraz tynków C i D. Wartości te uzyskano dla sond B1-B4 w przypadku cegły klinkierowej, dla sondy B2 w przypadku tynku C oraz dla sond B2 i B3 w przypadku tynku C. Dla większości materiałów i czujników wartość RMSE wahała się od 0,012 do 0,02 cm^3/cm^3 . W przypadku autklawizowanego silikatu wapiennego, niezależnie od rodzaju sensora RMSE przekraczało 0,025 cm^3/cm^3 . Maksymalną wartość tego parametru 0,33 cm^3/cm^3 odnotowano dla modelu estymowanego dla sondy B4.

Według danych przedstawionych przez Ju i in. (2010) zastosowanie modelu Topp'a i in. (1980) w odniesieniu do wybranych ośrodków glebowych skutkowało niepewnościami wyrażonymi jako RMSE w przedziale 0,01–0,066 cm^3/cm^3 . W przypadku modelu zaproponowanego przez Roth'a i in. (1990) RMSE przyjmował wartości 0,008–0,037 cm^3/cm^3 . RMSE dla popularnej formuły kalibracyjnej zaproponowanej przez Malickiego i in. (1996) ustalono na poziomie 0,03 cm^3/cm^3 . Należy mieć na uwadze, że w większości źródeł literaturowych proponowane modele miały charakter uniwersalny. Z tego powodu jakość dopasowania do danych pomiarowych była niższa. Modele przedstawione w niniejszej pracy mają charakter indywidualny, stąd lepiej odwzorowują zależności $\varepsilon_{\text{eff}} - \theta$ dla danego czujnika i materiału. Uzyskane wartości RMSE są porównywalne, a w wielu przypadkach wyższe od wartości wyznaczonych przez zespół Udawatta'y i in. (2011) dla modeli regresji opracowanych indywidualnie dla każdego z materiałów (0,008–0,034 cm^3/cm^3).

Porównując dane uzyskane w drodze eksperymentu z danymi ze źródeł literaturowych stwierdzono następujące zależności:

- wartości RMSE dla modeli opracowanych w niniejszej pracy są niższe od podawanych przez źródła literaturowe dla cegły klinkierowej oraz tynków C i D,
- wartości RMSE dla pozostałych modeli są niższe lub porównywalne z danymi literaturowymi,

- wartości RMSE dla modeli wyprowadzonych dla wszystkich czujników i autoklawizowanego silikatu wapiennego są porównywalne lub wyższe od RMSE podawanego przez źródła literaturowe.

Drugim parametrem, którego wartość można porównać z danymi literaturowymi, jest niepewność pomiarowa, przytaczana w postaci niepewności rozszerzonej U . Jako, że na jej wartość wpływa głównie niepewność pomiarowa typu A , związana z jakością dopasowania przyjętego modelu regresji, wyraźnie widoczna jest korelacja pomiędzy wartościami U , a RMSE. Analizie poddano jedynie wartości U ze środkowego zakresu pomiarowego. Najniższe wartości niepewności rozszerzonej zaobserwowano dla cegły klinkierowej (w każdym przypadku $0,009 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dla czujników B1–B4), betonu komórkowego (sondy B2–B4), tynku B (B1, B2) oraz tynku C (sondy B2, B3). Najwyższymi niepewnościami pomiarowymi obarczone są badania autoklawizowanego silikatu wapiennego, których wartości przekraczają $0,02$ i $0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ odpowiednio w przypadku sond B1-B3 oraz B4 i C.

Źródła literaturowe wskazują na następujące wartości niepewności pomiarowych modeli opracowanych dla ośrodków gruntowych i sond inwazyjnych: według Topp'a i in. (1984) oraz Amato i Ritchie (1995) jest to niepewność w przedziale $0,022$ – $0,023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Według Černý'ego (2009) – $0,0269 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, według Malickiego i in. (1996) $0,004$ – $0,018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zaś według Roth'a i in. (1990) $0,011$ – $0,013 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. W większości są to wartości wyższe lub porównywalne z uzyskanymi w drodze badań eksperymentalnych w niniejszej pracy. Jedynie modele opracowane dla autoklawizowanego silikatu wapiennego charakteryzują się niższą wartością niepewności pomiarowej od podawanej w literaturze przedmiotu.

Zdaniem autora, korzystniejsze parametry miernicze prototypowego zestawu sond i oprzyrządowania TDR wynikają z następujących przyczyn:

- opracowane w drodze eksperymentalnej modele regresji są równaniami indywidualnymi. W przypadku czujników inwazyjnych najczęściej stosowane są modele o charakterze uniwersalnym, cechującym się mniej korzystną wartością RMSE i niepewności pomiarowej od równań indywidualnych, w przypadku modeli indywidualnych podawanych przez Udawatta'ę i in., (2011) wartości RMSE były niższe,
- modele regresji sond powierzchniowych opracowano dla materiałów budowlanych, podczas gdy większość źródeł dotyczy ośrodków gruntowych, które charakteryzują się mniejszą homogenicznością,

- wilgotność maksymalna większości gleb, dla których kalibrowano inwazyjne czujniki TDR, wynosi ponad $0,5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($50\%_{\text{vol}}$). Szeroki zakres pomiarowy wpływa na wzrost wartości RMSE oraz niepewności pomiarowej. W badaniach przedstawionych w niniejszej pracy najniższe wartości RMSE oraz U uzyskano dla cegły klinkierowej i tynku D, których wilgotności maksymalne wynosiły jedynie $0,15\text{--}0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Maksymalne wartości RMSE i U, przekraczające wartości cytowane w literaturze, uzyskano dla autoklawizowanego silikatu wapiennego o wilgotności maksymalnej $0,92 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($92\%_{\text{vol}}$).

3.4. Badania laboratoryjne

Celem badań laboratoryjnych była ocena potencjału pomiarowego prototypowych czujników oraz wykazanie możliwości zastosowania ich w praktyce. Wykonano badania:

- procesów transportu wody za pomocą powierzchniowych sond typu B w materiałach i modelowych przegrodach budowlanych z zastosowaniem:
 - próbki betonu komórkowego,
 - modelowej ścianki z cegły ceramicznej pełnej,
 - modelowej ścianki z cegły silikatowej,
- monitoringu procesów wilgotnościowych za pomocą powierzchniowych sond typu C w materiałach i modelowych przegrodach budowlanych z zastosowaniem:
 - próbki autoklawizowanego silikatu wapiennego,
 - modelowej ścianki z cegły ceramicznej pełnej,
 - modelowej ścianki z cegły silikatowej.

3.4.1. Metodyka pomiaru

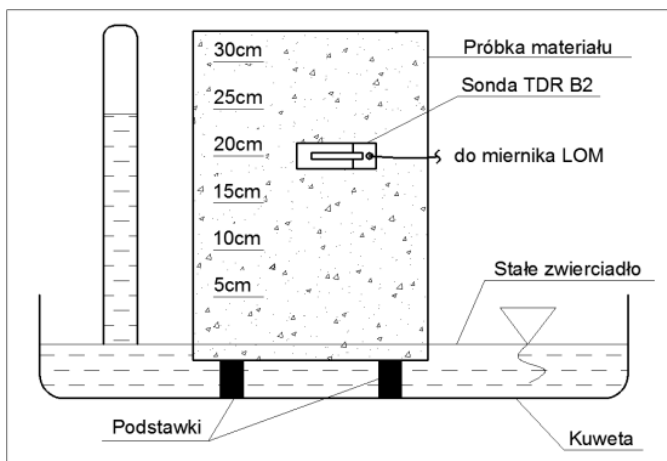
Wyposażenie techniczne wykorzystane do eksperymentu było następujące:

- sonda powierzchniowa TDR – prototyp B2 (dane techniczne w tabeli 3.1.1),
- zestaw sond powierzchniowych TDR – typu C (dane techniczne w tabeli 3.1.1),
- przewód koncentryczny,
- miernik TDR LOM (TDR Multimeter, ETest/Lublin),
- komputer PC do sterowania miernikiem i przetwarzania danych,
- aplikacja TDR Reflectometer do sterowania pomiarem oraz pozyskiwania i obróbki danych,
- miernik pojemnościowy wilgotności (LB-796, LABEL),
- suszarka próżniowa Memmert VO-500,
- waga WPT 30/60 firmy RADWAG,
- próbki betonu komórkowego oraz autoklawizowanego silikatu wapianego,
- ścianki modelowe z cegły ceramicznej pełnej i silikatowej.

3.4.1.1. Metodyka pomiaru podciągania kapilarnego w próbce z betonu komórkowego za pomocą sondy B2 i sondy pojemnościowej

Próbkę materiału przygotowano docinając bloczek do pożądanych wymiarów, suszono do stałej masy, a następnie pokryto cienką warstwą masy bitumicznej do izolacji powłokowych celem zminimalizowania wpływu środowiska zewnętrznego na przebieg badanego procesu. Gęstość pozorna materiału w stanie suchym wynosiła według danych producenta 700 kg/m^3 , a wilgotność maksymalna ustalona w trakcie badań kalibracyjnych – $0,36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Wymiary próbki z betonu komórkowego były następujące: $240 \times 240 \times 350 \text{ mm}$. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego do badań podciągania kapilarnego za pomocą sond B2 i LB-796 przedstawiono na rysunku 3.4.1. Badaną próbkę umieszczono nad zwierciadłem wody w kuwecie. Dolną część próbki zanurzono ok. 1 cm poniżej stałego zwierciadła wody. Na próbce oznaczono punkty pomiarowe w pięciocentymetrowych odstępach (były to kolejno poziomy 5, 10, 15, 20, 25 i 30 cm).



Rys. 3.4.1. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru zjawiska podciągania kapilarnego

3.4.1.2. Metodyka pomiarów podciągania kapilarnego w ściankach modelowych z cegły ceramicznej pełnej oraz silikatowej

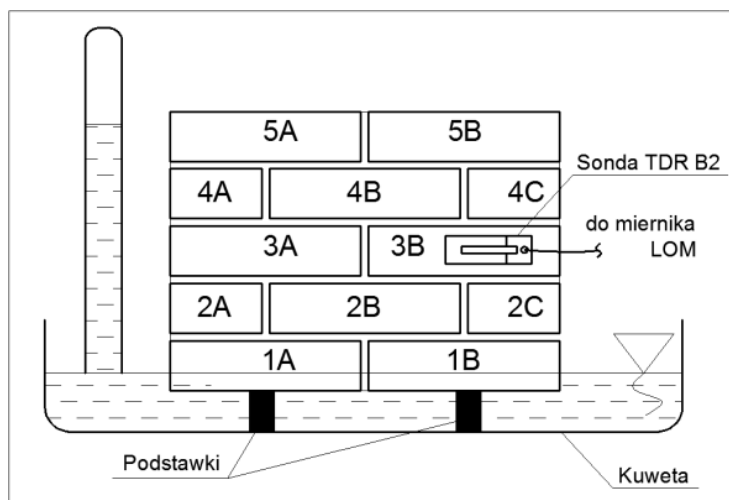
Do pomiarów przygotowano dwie ścianki modelowe z cegły ceramicznej pełnej oraz silikatowej. Wymiary ścianek: 520×365×120 mm (szerokość × wysokość × grubość). Wykorzystano zaprawę cementową o grubości spoiny poziomej 10 mm i grubości spoiny pionowej 20 mm. Parametry fizyczne cegieł były następujące:

- cegła ceramiczna
 - gęstość objętościowa w stanie suchym 1500 kg/m³,
 - wilgotność maksymalna 0,36 cm³/cm³,
- cegła silikatowa:
 - gęstość objętościowa w stanie suchym 1850 kg/m³,
 - wilgotność maksymalna 0,275 cm³/cm³.

Każda cegła została ponumerowana według schematu przedstawionego na rysunkach 3.4.2 i 3.4.3 w następującej konwencji – cyfra oznacza kolejną warstwę cegieł, litera kolejną cegłę w warstwie. Po wymurowaniu, ścianki modelowe wysuszono do stałej masy, a następnie zabezpieczono masą bitumiczną.

W trakcie badań ścianki umieszczono nad zwierciadłem wody w kuwecie. Dolną część ścianek zanurzono ok. 1 cm poniżej stałego zwierciadła wody. Badanie z wykorzystaniem sondy B2 polegało na odczycie efektywnej przenikal-

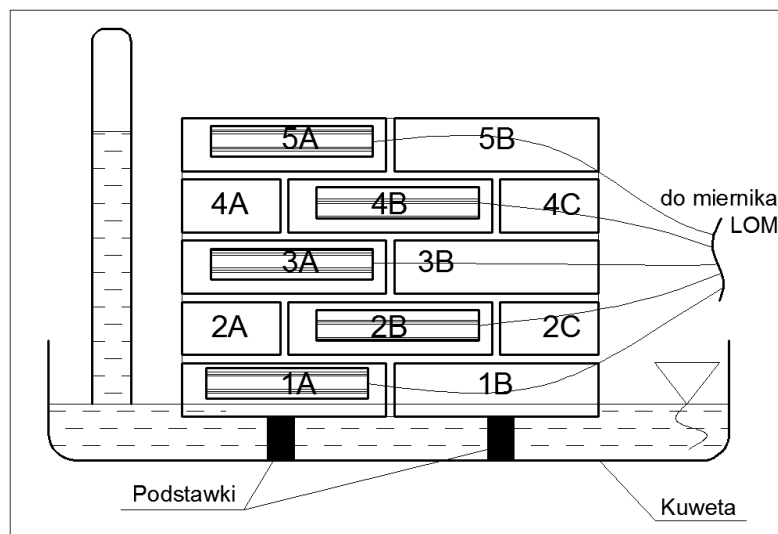
ności dielektrycznej ϵ_{eff} w poszczególnych ceglach, w określonych interwałach czasowych.



Rys. 3.4.2. Schemat stanowiska pomiarowego w eksperymencie z wykorzystaniem sondy B2

W przypadku badań z wykorzystaniem sond typu C, nie było możliwe obsadzenie wszystkich cegieł sondami z uwagi kolizje pomiędzy poszczególnymi sensorami. W związku z powyższym zdecydowano się na montaż sondy na każdej z warstw muru i obsadzić cegły o następującym oznaczeniu: 1A, 2B, 3A, 4B oraz 5A według rysunku 3.4.3. Całość konstrukcji była otoczona folią paroizolacyjną, zapewniającą również mechaniczny docisk sond do powierzchni muru.

Badaną ściankę umieszczono nad zwierciadłem wody w kuwecie. Dolną część próbki zanurzono ok. 1 cm poniżej stałego zwierciadła. Badanie z wykorzystaniem sond typu C polegało na odczycie efektywnej przenikalności dielektrycznej ϵ_{eff} w poszczególnych warstwach cegieł w określonych stałych interwałach czasowych.

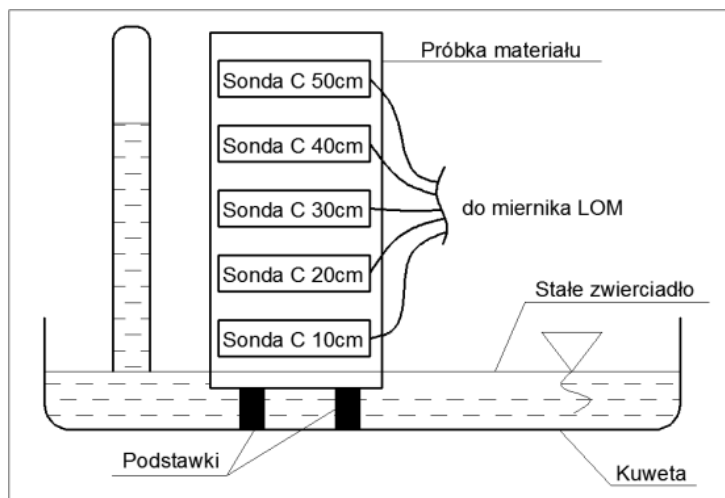


Rys. 3.4.3. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru zjawiska podciągania kapilarnego za pomocą sond typu C

3.4.1.3. Metodyka pomiarów podciągania kapilarnego w próbkach autoklawizowanego silikatu wapiennego

Przygotowano próbkę docinając bloczek do pożądaných wymiarów i susząc do stałej masy. Wymiary próbki były następujące: 580×280×50 mm (wysokość × szerokość × głębokość). Gęstość objętościowa materiału po wysuszeniu próbki wynosiła 237,68 kg/m³. Wilgotność maksymalna materiału wynosiła 0,92 cm³/cm³.

Badaną próbkę umieszczono nad zwierciadłem wody w kuwecie. Dolną część zanurzano ok. 1 cm poniżej stałego zwierciadła wody. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.4.4, czujniki wilgotności (sondy powierzchniowe typu C) umieszczono na następujących wysokościach nad zwierciadłem wody: 10, 20, 30, 40 oraz 50 cm. Całość zaizolowano folią paroizolacyjną w celu zminimalizowania wpływu otoczenia na przebieg badanego procesu (desorpcji z powierzchni) oraz stabilizacji czujników.



Rys 3.4.4. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru zjawiska podciągania kapilarnego za pomocą sond typu C

3.4.2. Badania podciągania kapilarnego przez bloczek betonu komórkowego za pomocą czujników powierzchniowych

3.4.2.1. Informacje szczegółowe

Po wysuszeniu próbki w suszarce w temperaturze 105°C do stałej masy, masa próbki w stanie suchym wynosiła 13,69 kg, a gęstość pozorna materiału ok. 679 kg/m³ i była niższa niż deklarowana przez producenta.

Badania prowadzono za pomocą powierzchniowej sondy TDR B2 oraz pojemnościowej sondy LB-769 przez okres 16 dni. W większości przypadków pomiary prowadzono trzykrotnie w ciągu doby. Pomiar polegał na przyłożeniu sond TDR oraz FD do badanej próbki na określonej wysokości, a następnie odczytaniu wartości wilgotności przy zastosowaniu niezbędnego oprogramowania. Z uwagi na statystyczną obróbkę wyników, każdy pomiar wykonano trzykrotnie. Warunki cieplno-wilgotnościowe otoczenia, w którym prowadzono pomiary, były następujące: temperatura 20°C ± 2°C, wilgotność względna 50% ± 5%.

Po zakończeniu eksperymentu próbkę betonu komórkowego zważono i stwierdzono, że jej masa wynosiła 18,24 kg, co oznacza przyrost 4,55 kg w stosunku do masy sprzed rozpoczęcia procesu podciągania kapilarnego.

Rezultatem eksperymentu jest uzyskanie krzywych odzwierciedlających dynamikę procesu podciągania kapilarnego wody przez próbkę betonu komórko-

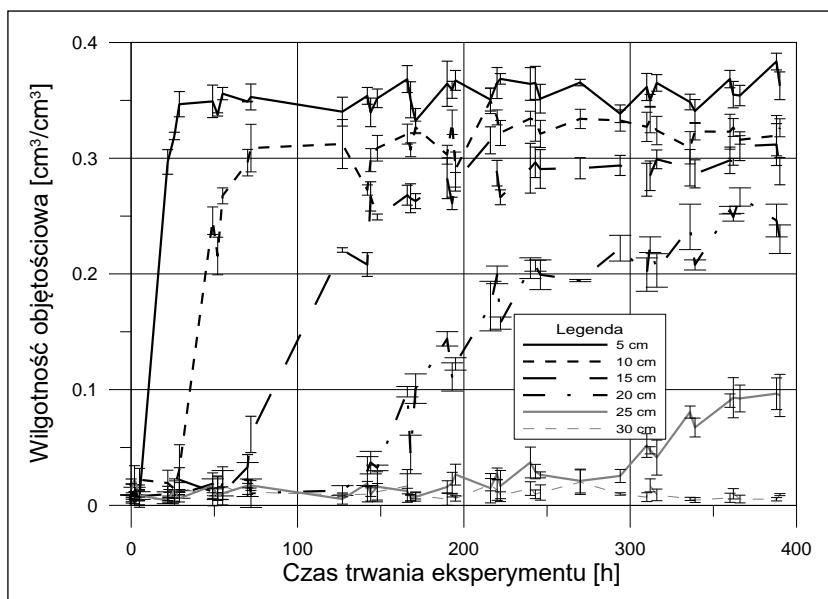
wego. Za pomocą sondy powierzchniowej TDR odczytywano wartości efektywnej przenikalności dielektrycznej ε_{eff} , które następnie przeliczono na wilgotność θ przy zastosowaniu formuły kalibracyjnej przedstawionej w tabeli 3.3.5 dla sondy B2 i betonu komórkowego:

$$\theta = -0,1911 + 0,0669\varepsilon_{eff} - 0,0015\varepsilon_{eff}^2 \quad (3.4.1)$$

Odczyty za pomocą sondy FD realizowano w analogiczny sposób, równoległe do pomiarów TDR. W trakcie badań postępowano zgodnie z instrukcją producenta. Ponieważ wilgotność odczytywana przez sondę FD wyrażana jest w jednostkach wilgotności masowej [kg/kg], konieczne było przeliczenie uzyskanego wyniku na wilgotność objętościową korzystając ze wzoru (2.1.3), przy znanej gęstości materiału w stanie suchym (O'Connor, Dowding, 1999).

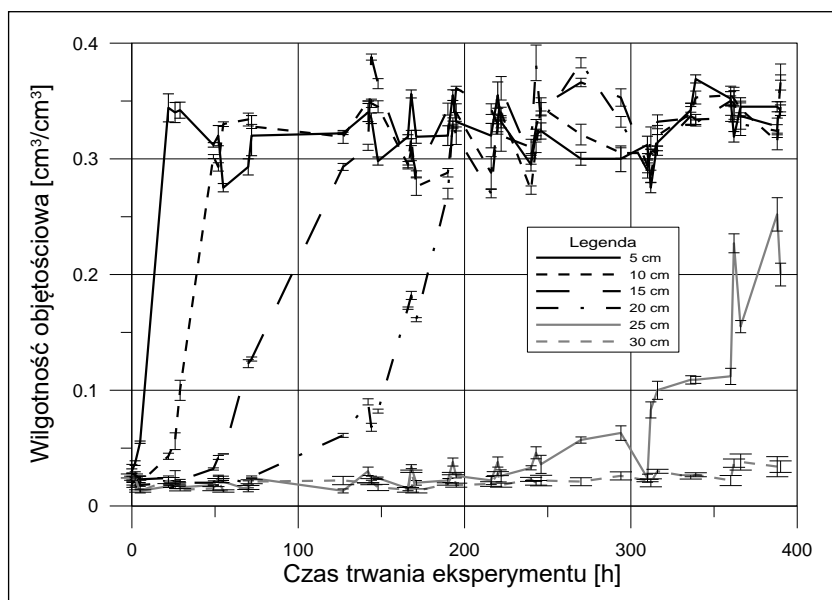
3.4.2.2. Wyniki badań

Diagram na rysunku 3.4.5 ukazuje przebiegi podciągania kapilarnego wyznaczone za pomocą sondy B2 w punktach referencyjnych na odpowiednich wysokościach. Przedstawiono wartości średnie z trzech powtórzeń uzupełnione o odchylenia standardowe w postaci słupków błędów.



Rys. 3.4.5. Przebieg podciągania kapilarnego w próbce betonu komórkowego określony za pomocą sondy B2

Średnie wyniki z trzech pomiarów z wykorzystaniem sondy FD, uzupełnione o odchylenia standardowe przedstawiono na rysunku 3.4.6.

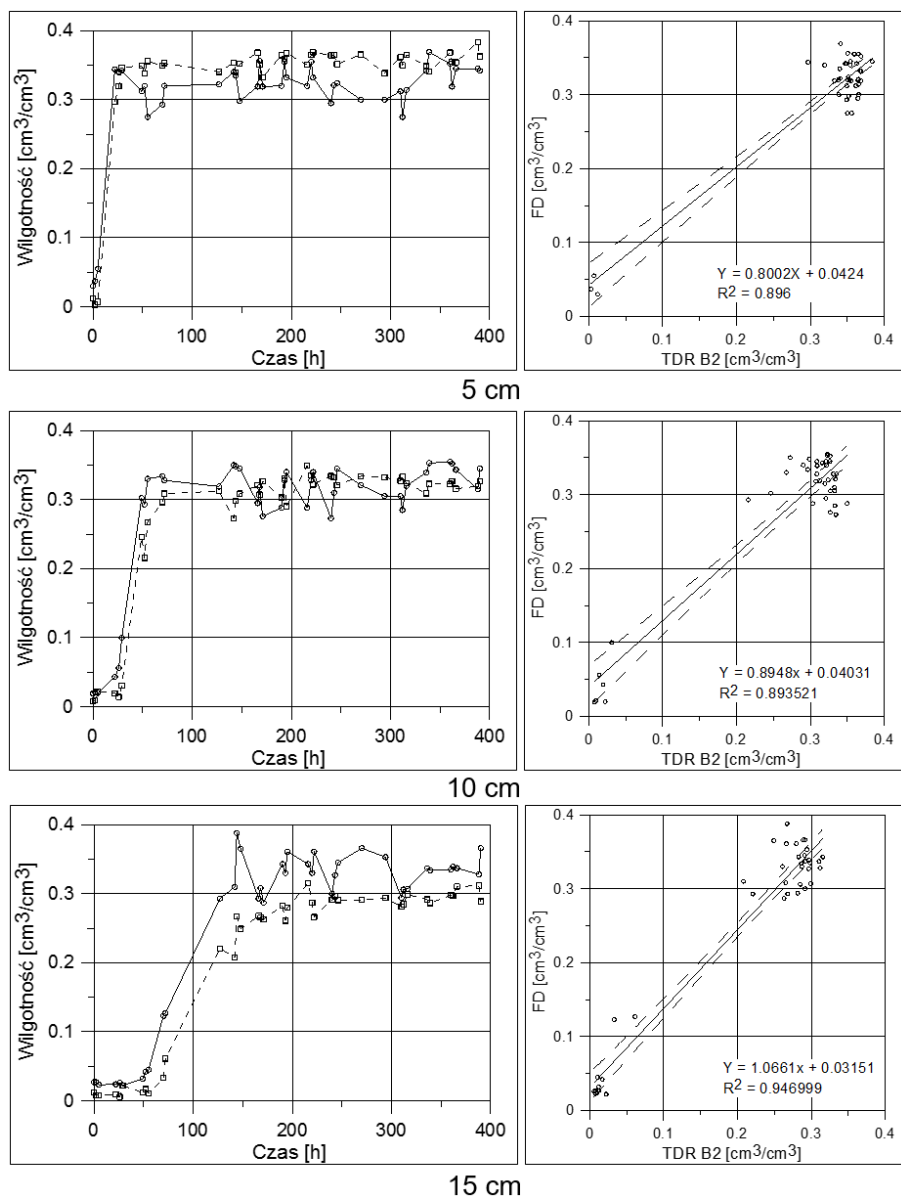


Rys. 3.4.6. Przebieg podciągania kapilarnego w próbce betonu komórkowego określony za pomocą sondy FD

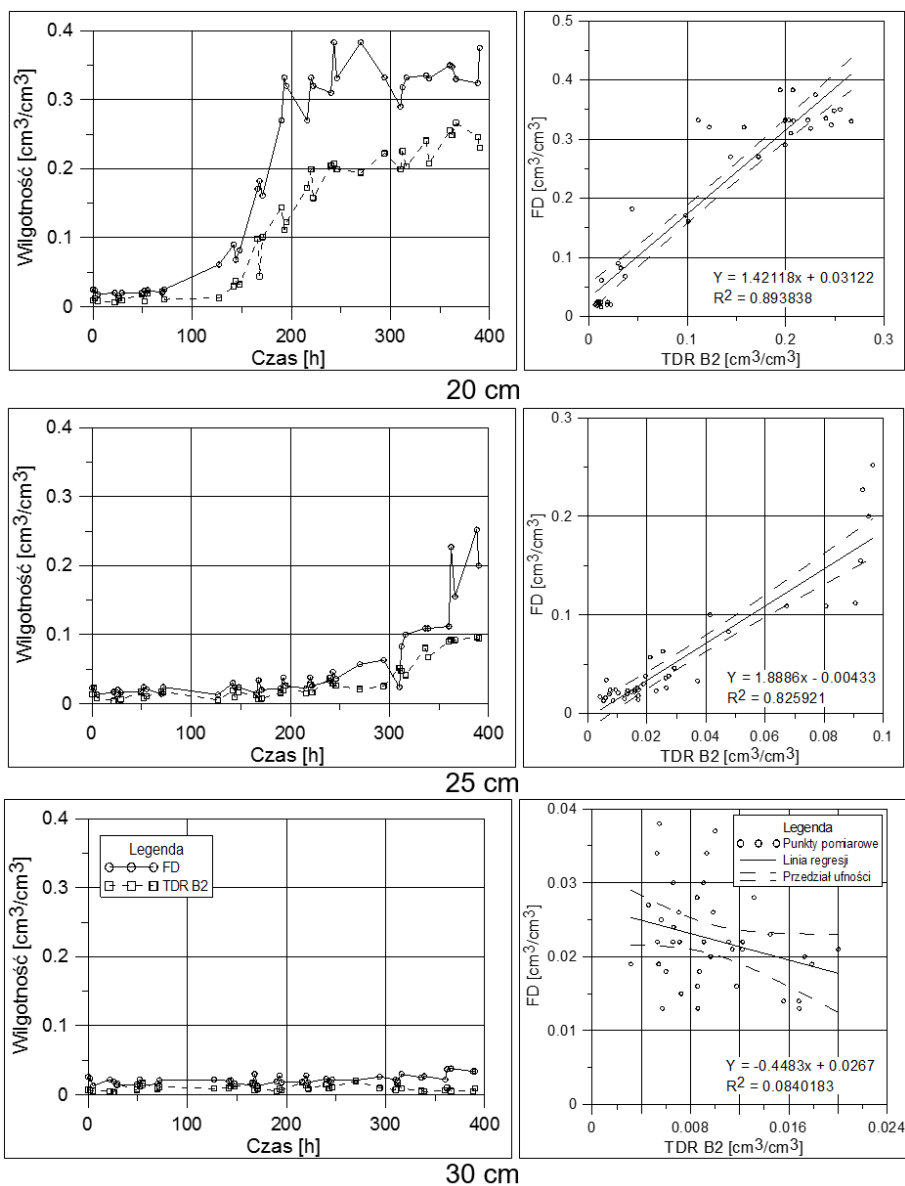
Obserwowano zmiany wilgotności w poszczególnych punktach referencyjnych próbki przy pomocy pośrednich pomiarów elektrycznych. Na rysunkach 3.4.5 oraz 3.4.6 początkowa wartość wilgotności jest zbliżona do zera i wynosi w przypadku oznaczenia sondą TDR ok. $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zaś sondą FD – $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Wskazania różne od zera są konsekwencją sposobu przygotowania próbek (suszenia do stałej masy) oraz niepewności pomiarowej czujnika przy przyjętym modelu regresji. Odczyty przy pomocy obydwu czujników wykazują szybki wzrost wilgotności w punkcie referencyjnym na wysokości 5 cm. Trend wzrostowy jest wyraźny, co potwierdza silne właściwości kapilarne badanego materiału. Na początku drugiego dnia trwania eksperymentu na wysokości 5 cm uzyskano wartość maksymalnego nasycenia materiału wodą. Na wyżej położonych płaszczyznach przyrosty zawartości wody były również dość gwałtowne, lecz przesunięte w czasie – na wysokości 10 cm pierwsze oznaki obecności wody wystąpiły po upływie kolejnego dnia trwania eksperymentu. Wzrost był procesem dynamicznym – w ciągu

następnego dnia materiał na tym poziomie osiągnął stan nasycenia. Wzrost wilgotności na wysokości 15 cm był mniej dynamiczny, niż na niższych poziomach. Pierwsze odczyty wzrostu wilgotności zaobserwowano po trzech dniach, a stany maksymalne odnotowano cztery dni później. Czwarty punkt pomiarowy, umieszczony na wysokości 20 cm, wykazał wzrost zawartości wody po upływie 6 dni od rozpoczęcia eksperymentu. Następnie obserwowano powolny wzrost wilgotności, a po upływie 4 dni uzyskano stan zbliżony do nasycenia, który utrzymał się do końca eksperymentu, tj. przez okres 16 dni. Na wysokości 25 cm sondy B2 i FD wykazały przyrost wilgotności dopiero po upływie 300 godzin licząc od momentu rozpoczęcia eksperymentu, czyli po ponad 12 dniach. Zauważalne są jednak różnice wartości. W przypadku sondy B2 było to ok. $0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zaś w przypadku sondy FD nawet $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Na wysokości 30 cm nie odnotowano przyrostu wilgotności żadną z zastosowanych sond.

Diagramy na rysunku 3.4.7 przedstawiają porównanie odczytów w poszczególnych punktach za pomocą sondy TDR B2 oraz sondy FD. Można zauważyć, że przebiegi krzywych są zbliżone w przypadku pomiarów prowadzonych w pobliżu zwierciadła wody. Jest to dobrze widoczne na rysunkach umieszczonych w prawej kolumnie. Dla poziomów referencyjnych na wysokości 5, 10 i 15 cm współczynniki kierunkowe równania regresji liniowej wynoszą odpowiednio 0,8002; 0,895 oraz 1,066. Oznacza to, że w dwóch pierwszych punktach pomiarowych sonda TDR wykazuje wyższe wartości wilgotności, w punkcie trzecim (15 cm) wyższe wartości wykazuje sonda FD. Na wysokość 20 cm nad zwierciadłem wody współczynnik kierunkowy jest większy od jedności i wynosi 1,422, co oznacza, że sonda pojemnościowa wykazuje znacznie wyższe wartości wilgotności niż sonda TDR B2. Tendencja ta utrzymuje się dla wyżej położonych punktów referencyjnych – wartość współczynnika kierunkowego równania regresji liniowej na wysokości 25 cm wynosi 1,889. Duże różnice w odczytach TDR – FD odnotowano również na wysokości 30 cm (wartość ujemna współczynnika regresji). Różnice te spowodowane są niskimi wartościami porównywanych parametrów (odczyty wykazywane przez obie sondy wahają się w przedziale $0\text{--}0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) oraz dużymi niepewnościami pomiarowymi w dolnym zakresie wilgotności (według tabeli 3.3.7 dla sondy B2 – $0,012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).



Rys. 3.4.7a. Porównanie wyników pomiarów przebiegu procesu podciągania kapilarnego z wykorzystaniem sondy TDR B2 oraz sondy FD w próbce z betonu komórkowego



Rys. 3.4.7b. Porównanie wyników pomiarów przebiegu procesu podciągania kapilarnego z wykorzystaniem sondy TDR B2 oraz sondy FD w próbce z betonu komórkowego

Badania laboratoryjne przeprowadzone z wykorzystaniem obydwu czujników wykazały zbliżone odczyty wilgotności i podobny trend zmian wilgotności zarówno w aspekcie jego dynamiki, jak też w wymiarze ilościowym. Różnice w odczytach były następujące:

- odczyty wilgotności w punktach nisko położonych (5, 10 cm) były wyższe dla sondy TDR B2, a niższe dla sondy FD (rys. 3.4.7 – współczynniki regresji niższe od jedności),
- na wysokości 15 cm nad zwierciadłem wody wilgotność wykazywana przez sondę FD była nieznacznie wyższa w porównaniu z odczytami sondy TDR B2, świadczy o tym wartość współczynnika regresji (> 1) oraz dodatnia wartość wyrazu wolnego,
- w stanach niskiego zawilgocenia sonda FD wykazywała wyższe odczyty wilgotności niż sonda TDR B2,
- w stanach zbliżonych do stanu suchego obie sondy wykazywały dużą niestabilność pomiarową, co jest widoczne na rysunku 3.4.7 w przypadku poziomu referencyjnego 30 cm, (współczynnik regresji jest ujemny, dane takie nie powinny być porównywane),
- odchylenia standardowe wyznaczone z trzech pomiarów i przedstawione na rysunkach 3.4.5 i 3.4.6 były porównywalne dla obu sond. Średnia wartość odchylenia standardowego ze wszystkich pomiarów wynosiła $0,008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i była niższa od niepewności pomiarowej U dla środkowego zakresu pomiarowego ($0,009 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ według tabeli 3.3.20). Maksymalna niepewność pomiarowa dla sondy B2 wynosiła $0,022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i była wielkością incydentalną, związana z nieprecyzyjnym przyłożeniem czujnika. Odchylenia standardowe sondy FD były niższe, średnia wartość wynosiła $0,004 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zaś maksymalna $0,017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Znając masę próbki przed rozpoczęciem eksperymentu i po jego zakończeniu porównano odczyty metodami elektrycznymi z pomiarami wagowymi. Przyrost masy wyznaczony za pomocą wagi wynosił 4,55 kg.

Dla potrzeb metod elektrycznych określono ilość wody pochłoniętej przez materiał przez scałkowanie profilu wilgotnościowego na etapie zakończenia eksperymentu. Wykorzystano następującą formułę:

$$m = 0,001 \cdot a \cdot b \int_0^h \theta(h) dh \quad (3.4.2)$$

gdzie: m – masa wody pochłoniętej przez materiał [kg]; a, b – wymiary próbki: szerokość i głębokość (24 cm); h – wysokość próbki; $\theta(h)$ – charakterystyka

wilgotnościowa próbki na etapie zakończenia eksperymentu (profil wilgotnościowy).

Ustalono, że dla końcowego etapu eksperymentu przyrost masy wody w próbce wyznaczony sondą TDR B2 wynosi 4,10 kg, a sondą FD 4,71 kg. Oznacza to, że przyrost masy wody oszacowany z wykorzystaniem sondy TDR B2 jest o 10% mniejszy, a w przypadku sondy FD – o 4% większy od przyrostu oznaczonego grawimetrycznie.

Niedoszacowanie przyrostu masy próbki może być spowodowane tym, że zasięg oddziaływania czujnika TDR B2 wynosi 4 cm, zaś szerokość próbki 24 cm. Zakładając niejednorodność struktury badanego materiału i złożoność procesu transportu wody można przyjąć, że pewna część wody była nie dostępna dla impulsu sond (B2 i FD). Z kolei przeszacowanie wilgotności przez sondę FD mogło wynikać z wpływu jonów soli obecnych w wodzie zawartej w próbce.

3.4.3. Badania podciągania kapilarnego przez ściankę z cegły ceramicznej pełnej za pomocą czujników powierzchniowych

3.4.3.1. Informacje szczegółowe

Informacje podstawowe dotyczące ścianki z cegły ceramicznej pełnej przedstawiono w podrozdziale 3.4.1.2. Masa ścianki po wysuszeniu wynosiła 36,81 kg. Badania prowadzono przez okres jednego miesiąca, przerwano je po upływie ok. 30 dni, a dokładnie po 695 godzinach eksperymentu. Warunki cieplno-wilgotnościowe otoczenia, w którym prowadzono pomiary, były następujące: temperatura $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna $50\% \pm 5\%$.

Po zdemontowaniu stanowiska modelową ściankę zważono. Masa ścianki poddanej procesowi podciągania kapilarnego wynosiła 39,64 kg. Przyrost masy wskutek podciągania kapilarnego zmierzony techniką bezpośrednią wynosił zatem 2,83 kg.

Każdy pomiar powtórzono trzykrotnie. Za pomocą sondy powierzchniowej TDR B2 odczytywano wartości efektywnej przenikalności dielektrycznej ε_{eff} , które następnie przeliczono na wilgotność θ przy zastosowaniu formuły kalibracyjnej z tabeli 3.3.5 dla sondy B2 i cegły ceramicznej pełnej:

$$\theta = -0,3092 + 0,1082\varepsilon_{eff} - 0,0034\varepsilon_{eff}^2 \quad (3.4.2)$$

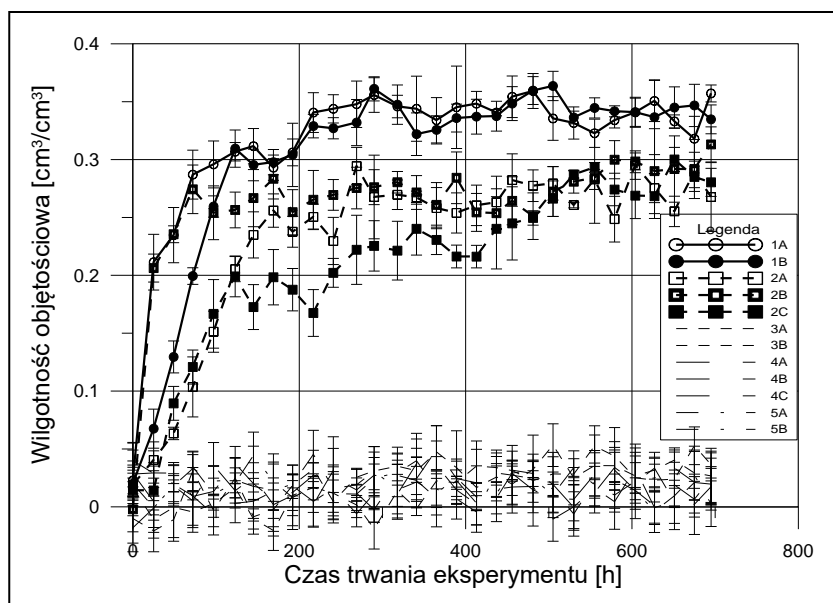
Odczyty efektywnej przenikalności dielektrycznej przeliczono za pomocą modelu regresji (3.4.2). Minimalne zaobserwowane odchylenie standardowe

w jednym punkcie pomiarowym wynosi $0,002 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zaś maksymalne $0,039 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

3.4.3.2. Wyniki badań

Rezultaty badań przedstawiono w postaci krzywych dynamiki procesu podciągania kapilarnego wody przez ściankę modelową z cegły ceramicznej pełnej.

Diagram na rysunku 3.4.8 ukazuje przebiegi podciągania kapilarnego wyznaczone za pomocą sondy B2 w poszczególnych punktach względem poziomu zwierciadła wody oraz odchylenia standardowe w poszczególnych punktach pomiaru wilgotności.



Rys. 3.4.8. Dynamika podciągania kapilarnego wody w ściance modelowej z cegły ceramicznej pełnej za pomocą sondy pomiarowej TDR B2

Wyraźny wzrost wilgotności zanotowano w dwóch najniższych warstwach przegrody – cegły oznaczone symbolami 1A, 1B, 2A, 2B oraz 2C (rys. 3.4.6). Wszystkie wyżej położone warstwy nie wykazały znaczącego wzrostu wilgotności, a odczyty na tych poziomach oscylowały w przedziale $0,00\text{--}0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i były niestabilne, co wynikało z dużej niepewności pomiarowej w dolnym zakresie wilgotności (według tabeli 3.3.7: $0,019 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Średnia wartość odchy-

leń standardowych dla całego eksperymentu wynosiła $0,017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i była ponad dwukrotnie wyższa od ustalonej w badaniach kalibracyjnych niepewności pomiarowej dla środkowego zakresu pomiarowego ($0,008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

Odnosząc odczyty uzyskane z wykorzystaniem sondy TDR B2 do masy ścianki przed i po suszeniu można zauważyć pewną zależność.

Przy założeniu gęstości wody $1 \text{ kg}/\text{dm}^3$, po zsumowaniu uzyskujemy przyrost masy wody w ściance wyznaczony metodą pośrednią. Wyznaczając w sposób uproszczony masę wody w poszczególnych ceglach na podstawie odczytów TDR sondą B2 tuż przed zakończeniem eksperymentu i korzystając ze wzoru będącego przekształceniem formuły (2.1.1):

$$V_w = \theta_v \cdot V_{tot} \quad (3.4.3)$$

gdzie θ_v – wilgotność objętościowa wyznaczona metodą TDR [cm^3/cm^3].

Ustalono, że suma przyrostów wody w ceglach wynosi $2,74 \text{ kg}$ i jest to wartość porównywalna z masą wody ustaloną wagowo ($2,83 \text{ kg}$). Różnica pomiędzy wartościami wyznaczonymi dwoma metodami wynosi 3% . Należy jednak pamiętać, iż w rozważaniach teoretycznych nie uwzględniono wody zawartej w wyższych warstwach, która może znajdować się poza zasięgiem sondy powierzchniowej B2, a na powierzchni nie jest wykazywana. Ponadto, nie uwzględniono potencjalnej obecności wody zawartej w zaprawie (ponieważ nie była przedmiotem analizy sondą B2), podczas gdy metoda wagowa ten czynnik uwzględnia.

3.4.4. Badania podciągania kapilarnego przez ściankę z cegły silikatowej za pomocą czujników powierzchniowych

3.4.4.1. Informacje szczegółowe

Informacje podstawowe dotyczące ścianki z cegły silikatowej przedstawiono w podrozdziale 3.4.1.2. Masa ścianki po wysuszeniu wynosiła $43,71 \text{ kg}$. Badania prowadzono przez okres około miesiąca, a dokładnie w czasie 695 godzin. Każda sekwencja pomiarowa polegała na trzykrotnym pomiarze w danym punkcie charakterystycznym. Warunki cieplno-wilgotnościowe otoczenia były następujące: temperatura $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, wilgotność względna powietrza $\text{RH} = 50\% \pm 5\%$.

Po zakończeniu eksperymentu i rozmontowaniu stanowiska ściankę zważono. Masa ścianki wynosiła $45,66 \text{ kg}$. Przyrost masy wskutek podciągania kapilarnego wyniósł zatem $1,95 \text{ kg}$.

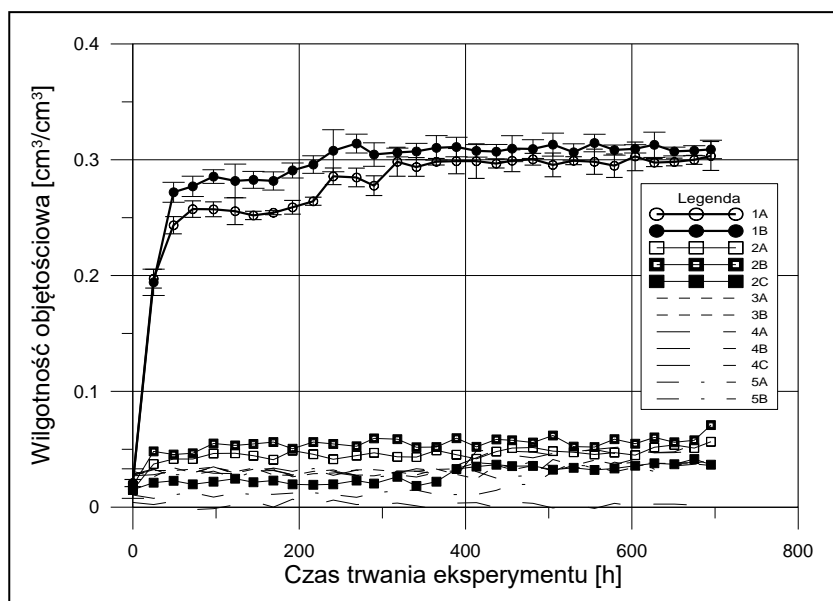
Rezultaty badań zaprezentowano w formie rodziny krzywych odzwierciedlających dynamikę podciągania kapilarnego wody przez ściankę modelową z cegły silikatowej.

Za pomocą sondy powierzchniowej TDR B2 odczytywano wartości efektywnej przenikalności dielektrycznej ε_{eff} , które następnie przeliczono na wilgotność θ przy zastosowaniu formuły kalibracyjnej dla sondy B2 i cegły silikatowej (tabela 3.3.5):

$$\theta = -0,2597 + 0,0969\varepsilon_{eff} - 0,0034\varepsilon_{eff}^2 \quad (3.4.4)$$

3.4.4.2. Wyniki badań

Diagram na rysunku 3.4.9 ukazuje przebiegi podciągania kapilarnego wyznaczone za pomocą sondy B2 w punktach referencyjnych, na odpowiednich wysokościach względem poziomu zwierciadła wody. Niepewności pomiarowe w postaci odchyłeń standardowych od wartości średniej wynoszą średnio $0,004 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, zaś maksymalna zanotowana wartość odchylenia standardowego – ok. $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Uzyskane wartości są niższe od niepewności pomiarowej określonej w rozdziale 3.3. dla sondy B2 (według tabeli 3.3.7 dla środkowego zakresu pomiarowego wartość niepewności wynosi $0,012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, dla stanów suchego i nasyconego są to odpowiednio $0,015$ i $0,024 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).



Rys. 3.4.9. Przebieg podciągania kapilarnego wody przez ściankę z cegły silikatowej wyznaczony za pomocą sondy powierzchniowej TDR B2

Z rysunku 3.4.9 wynika, że wyraźny wzrost wilgotności wystąpił tylko w najniższej warstwie cegieł, czyli w ceglach 1A i 1B. Maksymalna wilgotność objętościowa w tych punktach pomiarowych wynosiła ok. $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co oznacza, że osiągnięto stan maksymalnej wilgotności danego materiału określony w badaniach grawimetrycznych. W ceglach warstwy drugiej (2A, 2B i 2C) zanotowano maksymalną wilgotność rzędu $0,065 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, a w warstwie trzeciej – $0,035 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. W warstwach wyżej położonych odczyty były mniejsze lub nawet równe zero.

Analogicznie do poprzedniego eksperymentu, masę wody w poszczególnych ceglach oszacowano za pomocą wzoru (3.4.3) i po zsumowaniu uzyskano wartość 1,93 kg. Różnica pomiędzy odczytami TDR i wagowymi wynosi nieco ponad 1%, należy jednak pamiętać, że w pomiarach TDR nie uwzględniono wody zawartej w głębszych warstwach cegieł, która może być obecna, a znajduje się poza zasięgiem sondy B2. Ponadto nie uwzględniono wody zawartej w zaprawie, gdyż nie była badana sondą TDR.

Wartość średnia odchyłeń standardowych wynosi $0,008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i jest niższa od niepewności rozszerzonej metody ustalonej w badaniach kalibracyjnych ($0,012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, według tabeli 3.3.20).

3.4.5. Badania monitoringowe podciągania kapilarnego przez autoklawizowany silikat wapienny za pomocą sond powierzchniowych typu C

Badania przedstawione w kolejnych trzech podrozdziałach określono mianem badań monitoringowych, ponieważ w odróżnieniu od poprzednich eksperymentów, sondy pomiarowe były zamontowane do próbek na stałe, a pomiary miały charakter ciągły z regularnymi, krótkimi interwałami czasowymi, dzięki czemu możliwe było monitorowanie zachodzących w próbkach zjawisk.

3.4.5.1. Informacje szczegółowe

Informacje podstawowe dotyczące próbki autoklawizowanego silikatu wapiennego przedstawiono w podrozdziale 3.4.1.3. Po wysuszeniu masa próbki wynosiła 1,93 kg.

Warunki cieplno-wilgotnościowe otoczenia były następujące: temperatura $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, wilgotność względna powietrza $\text{RH} = 50\% \pm 5\%$. Interwał pomię-

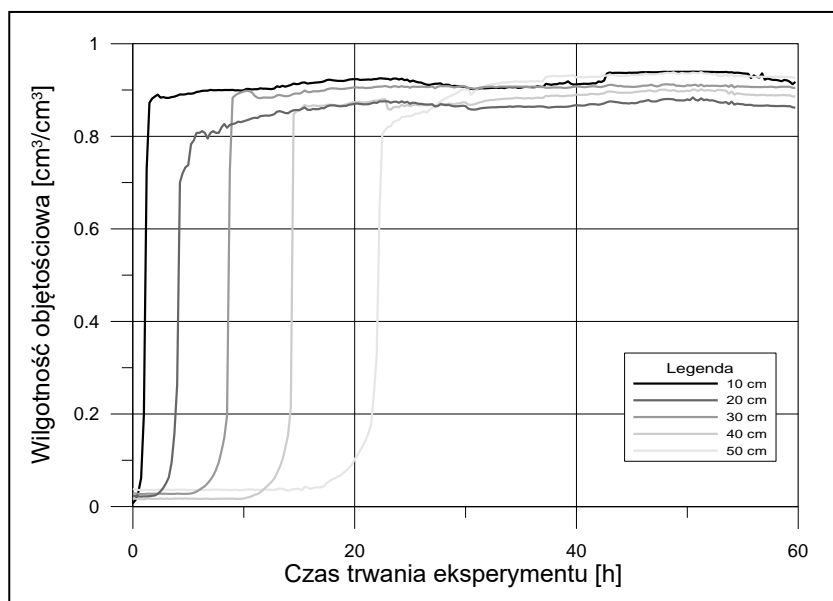
dzy kolejnymi pomiarami ustalono na 15 minut, zaś czas trwania eksperymentu na 60 godzin.

Wilgotność materiału określono za pomocą formuły kalibracyjnej (tabela 3.3.14):

$$\theta = -0,1921 + 0,0998\varepsilon_{eff} - 0,0022\varepsilon_{eff}^2 \quad (3.4.5)$$

3.4.5.2. Wyniki badań

W wyniku badań podciągania wody przez silnie kapilarny materiał jakim jest autoklawizowany silikat wapienny, uzyskano krzywe ukazujące wzrost wilgotności materiału w czasie, na poszczególnych wysokościach, na których zamontowano prototypowe sondy typu C. Diagram przedstawiono na rysunku 3.4.10.



Rys. 3.4.10. Przebieg podciągania kapilarnego wilgoci przez autoklawizowany silikat wapienny wyznaczony z wykorzystaniem czujników TDR typu C

Eksperyment przerwano po 60 godzinach, ponieważ każdy z czujników wykazał wartość zbliżoną do $0,90 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, czyli maksymalnej nasiąkliwości materiału i nie zaobserwowano dalszego trendu wzrostowego. Po zakończeniu eksperymentu próbkę zważono i stwierdzono, iż masa próbki poddanej procesowi podciągania kapilarnego wynosiła 9,3 kg. W związku z powyższym przyrost

masy wody w porównaniu do próbki suchej był równy 7,37 kg, co oznacza, że po nasyceniu wilgotność masowa materiału wynosiła 381%, zaś objętościowa – 0,91 cm³/cm³ i była porównywalna z wilgotnością zmierzoną sondami powierzchniowymi TDR typu C (0,904 cm³/cm³). Szacowanie masy wody na podstawie odczytów reflektometrycznych pod koniec trwania eksperymentu wykazało, że w badanej próbce znajduje się 7,29 kg wody, co jest wartością o ok. 1% mniejszą od odczytu za pomocą wagi.

Eksperyment pozwolił na analizę dynamiki wzrostu wilgotności na poszczególnych wysokościach próbki ponad poziomem zwierciadła wody. Silnie kapilarny charakter materiału potwierdzony został przez sondę zainstalowaną najniżej, tj. 10 cm ponad lustrem wody, gdzie wzrost wilgotności odnotowano już w pierwszym kroku pomiarowym, a po upływie dwóch godzin nastąpiło nasycenie materiału wilgocią. Sonda zainstalowana na wysokości 20 cm wykazała wzrost wilgotności po upływie ok. 4 godzin od rozpoczęcia eksperymentu, a po upływie kolejnej godziny osiągnięto stan zawilgocenia przekraczający 80%_{vol}. W trakcie eksperymentu odnotowano sukcesywny wzrost wilgotności, jednak nie osiągnął on poziomu 0,90 cm³/cm³, co można tłumaczyć dużą niepewnością pomiarową sondy typu C w wysokim zakresie wilgotności (zgodnie z tabelą 3.3.16 dla autoklawizowanego silikatu wapiennego 0,047 cm³/cm³). Sonda zamontowana na wysokości 30 cm wykazała wzrost wilgotności po upływie ok. 9 godzin od rozpoczęcia eksperymentu, by w ciągu kolejnej godziny osiągnąć wartość maksymalną, zbliżoną do stanu nasycenia i porównywalną z wykazywaną przez czujnik położony najbliżej zwierciadła wody. Odczyty wilgotności w tej fazie eksperymentu były wyższe od wykazywanych przez sondę C na wysokości 20 cm. Sonda umieszczona na wysokości 40 cm wykazała wzrost wilgotności po upływie kolejnych 5 godzin. Był on dynamiczny i w ciągu kilku następnych kroków pomiarowych wilgotność zbliżyła się do stanu nasycenia. Najwyżej położona sonda wykazała wzrost wilgotności po okresie kolejnych 7 godzin, czyli po upływie około jednej doby od rozpoczęcia eksperymentu. Wzrost był gwałtowny, po kilkudziesięciu minutach wartość przekroczyła 0,80 cm³/cm³, by w ciągu kilku następnych godzin osiągnąć stan nasycenia. W dalszym etapie eksperymentu nie odnotowano wzrostu wilgotności badanego materiału, dlatego po upływie ok. 60 godzin zdecydowano się na jego przerwanie.

3.4.6. Badania monitoringowe podciągania kapilarnego przez ściankę z cegły ceramicznej pełnej za pomocą sond powierzchniowych typu C

3.4.6.1. Informacje szczegółowe

Ogólne informacje na temat przyjętej metodyki przedstawiono w podrozdziale 3.4.1.2. Po wysuszeniu masa próbki wynosiła 36,86 kg.

Proces podciągania kapilarnego wilgoci monitorowano za pomocą oprogramowania dla sond powierzchniowych. Oprogramowanie odczytywało efektywną przenikalność ośrodka mierzoną sondami typu C, zaś wilgotność objętościową określono na podstawie modelu regresji przedstawionego w tabeli 3.3.14:

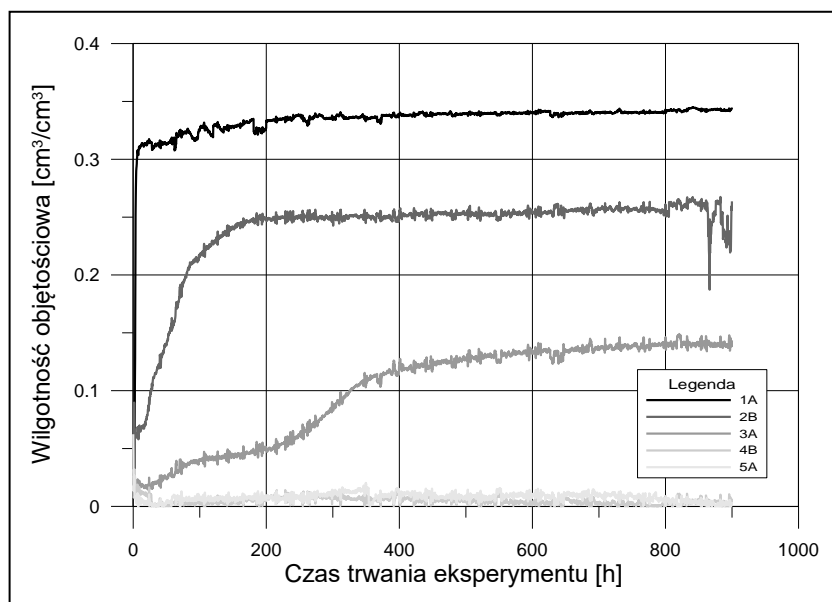
$$\theta = -0,474 + 0,2948\varepsilon_{eff} - 0,0265\varepsilon_{eff}^2 \quad (3.4.6)$$

Interwał pomiędzy kolejnymi pomiarami ustalono na 15 minut. Eksperyment prowadzono przez okres ponad jednego miesiąca, tj. przez 37 dni. Przerwano go, ponieważ nie notowano dalszego wzrostu wilgotności na poszczególnych poziomach. Po zakończeniu eksperymentu ściankę zważono i stwierdzono iż masa wynosiła 40,07 kg. W związku z powyższym, przyrost masy wody w porównaniu do ścianki suchej był równy 3,21 kg.

Wyznaczając w sposób uproszczony masę wody w poszczególnych ceglach na podstawie końcowych odczytów TDR sondą C (założono jednakową wilgotność cegieł na danym poziomie), korzystając ze wzoru (3.4.3), po zsumowaniu uzyskano przyrost masy wody w ściance oznaczony metodą pośrednią. Ustalono, że suma przyrostów wody we wszystkich ceglach wynosi 2,86 kg. Różnica pomiędzy szacunkami wagowymi i TDR wynosiła aż 11%. Należy jednak pamiętać, iż przy szacowaniu pominięto wodę zawartą w zaprawie oraz wodę znajdującą się poza zasięgiem sond TDR (w głębszych warstwach ścianki).

3.4.6.2. Wyniki badań

W wyniku badań podciągania wody przez modelową ściankę z cegły ceramicznej pełnej uzyskano krzywe wskazujące na wzrost wilgotności materiału w czasie na poszczególnych poziomach, na których zamontowano sondy typu C (rysunek 3.4.11).



Rys. 3.4.11. Proces podciągania kapilarnego wilgoci przez modelową ściankę z cegły ceramicznej pełnej monitorowany za pomocą czujników TDR typu C

Eksperyment pozwolił na obserwację dynamiki zmian wilgotności na różnych poziomach cegieł modelowej ścianki z cegły ceramicznej pełnej. Podobnie jak w przypadku sondy B2, w początkowej fazie eksperymentu sondy C wykazywały wilgotność rzędu $0,02\text{--}0,03\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Powyższą prawidłowość należy tłumaczyć tym, że w zakresie niskich wilgotności przebieg charakterystyki $\epsilon_{\text{eff}} - \theta$ jest stromy, tym samym niepewność pomiarowa w dolnym zakresie jest wysoka (według tabeli 3.3.16 dla sondy C i cegły ceramicznej pełnej $0,22\text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Sonda położona najniżej względem zwierciadła wody szybko wykazała przyrost wilgotności, a po czasie ok. 7 godzin wilgotność wynosiła już ok. $0,30\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Oznacza to wysoki stopień zawilgocenia, biorąc pod uwagę, że maksymalną nasiąkliwość materiału oszacowano w badaniach grawimetrycznych na poziomie $0,36\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Należy zaznaczyć, że sondy typu C wykazywały maksymalnie wartość $0,35\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, przy czym stan ten osiągnięto po upływie ok. 200 godzin od rozpoczęcia eksperymentu. Sonda przytwierdzona do cegły warstwy nr 2 wykazała mniej dynamiczny przyrost wilgotności, ale wartość maksymalna została osiągnięta w porównywalnym czasie, tj. po około 200 godzinach. Maksymalna wartość wilgotności wynosiła w tym wypadku ok. $0,26\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Sonda przytwierdzona do cegły warstwy nr 3 wykazała maksymalny przyrost wilgotno-

ści do wartości ok. $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ po upływie ok. 600 godzin, zaś najbardziej dynamiczny przyrost notowano w czasie 200–400 godzin od momentu rozpoczęcia eksperymentu. Pozostałe sondy nie wykazały wzrostu wilgotności, widoczne fluktuacje odczytów należy interpretować jako konsekwencję zakłóceń powodowanych czynnikami zewnętrznymi.

3.4.7. Badania monitoringowe podciągania kapilarnego w ściance z cegły silikatowej za pomocą sond powierzchniowych typu C

3.4.7.1. Informacje szczegółowe

Ogólne informacje na temat przyjętej metodyki przedstawiono w podrozdziale 3.4.1.2. Masa próbki po wysuszeniu wynosiła 43,74 kg. Wszystkie parametry ustalono analogicznie jak w eksperymencie ze ścianką z cegły ceramicznej pełnej. Wydłużono jedynie czas badań do 1200 godzin (50 dni). Było to podyktowane niższą podatnością materiału na zjawisko podciągania kapilarnego.

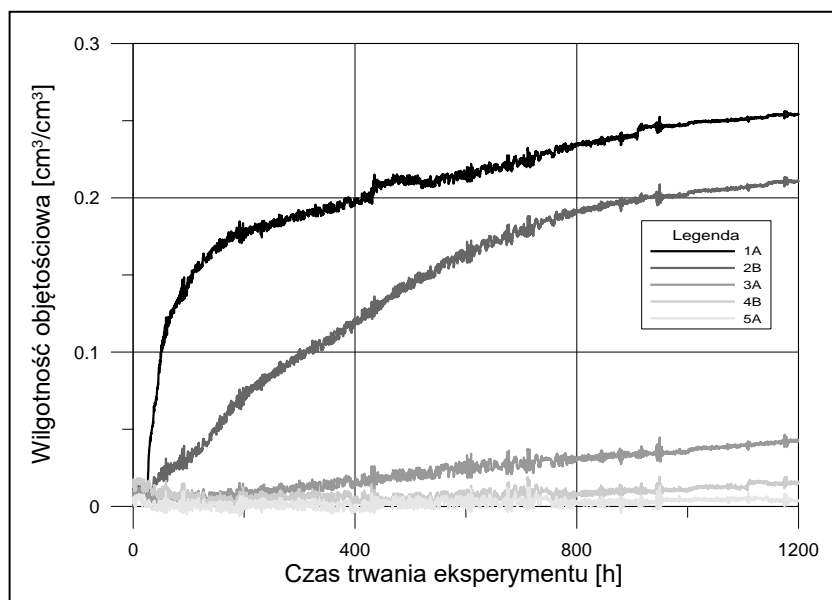
Do ustalenia wilgotności materiału zastosowano model regresji przedstawiony w tabeli (3.3.14):

$$\theta = -0,341 + 0,2199\varepsilon_{eff} - 0,019\varepsilon_{eff}^2 \quad (3.4.7)$$

Po zakończeniu eksperymentu ściankę zważono i stwierdzono, iż masa wynosi 45,95 kg. W związku z powyższym przyrost masy wody w porównaniu do próbki suchej jest równy 2,21 kg. Porównując uzyskany wynik z danymi ustalonymi w poprzednich eksperymentach na zasadzie zliczania masy wody w poszczególnych ceglach (2,05 kg) stwierdzono, że różnica w odczytach metodą grawimetryczną i reflektometryczną wynosi ok. 7%. Należy jednak mieć to na uwadze, że sondy TDR nie wychwyciły wody zawartej we wszystkich obszarach ścianki (takich jak zaprawa, głębsze warstwy ścianki pozostające poza zasięgiem oddziaływania czujnika).

3.4.7.2. Wyniki badań

W wyniku badań podciągania kapilarnego wody przez modelową ściankę z cegły silikatowej uzyskano krzywe wskazujące na wzrost wilgotności materiału w czasie na poszczególnych poziomach, na których zamontowano sondy typu C (rysunek 3.4.12).



Rys. 3.4.12. Przebieg podciągania kapilarnego wilgoci przez modelową ściankę z cegły silikatej monitorowany za pomocą czujników TDR typu C

Obserwano dynamikę zmian wilgotności na różnych poziomach modelowej ścianki z cegły silikatej. Należy zauważyć, że w stanie suchym sondy nie wykazywały wartości zerowej wilgotności, ale wartość z przedziału $0,02\text{--}0,03\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Zaistniała sytuacja była konsekwencją przyjętego modelu regresji oraz niepewności pomiarowej wynoszącej dla cegły silikatej i sondy C w zakresie materiałów suchych $0,03\text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Sonda położona najniżej względem zwierciadła odnotowała pojawienie się wody w materiale po upływie 10 godzin od momentu rozpoczęcia eksperymentu. W czasie 400 godzin osiągnięty został poziom $0,2\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, natomiast stan stabilizacji wystąpił dopiero w końcowej fazie eksperymentu, kiedy czujniki wykazywały ok. $0,25\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co należy uznać za stan zbliżony do nasyconego ($0,0275\text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Przyrost wilgotności w drugiej warstwie cegieł był liniowy i łagodny. W końcowym etapie odczytano wartość rzędu $0,215\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, przy czym widoczny był jeszcze słaby trend wzrostowy. W trzeciej warstwie wzrost wilgotności był liniowy i osiągnięto wartość ok. $0,04\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Pozostałe sondy wykazały wzrost wilgotności maksymalnie rzędu $0,02\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co należy uznać za odczyty z zakresu niepewności pomiarowej czujnika.

3.4.8. Dyskusja wyników

Uzyskane dane trudno odnieść bezpośrednio do literatury przedmiotu ze względu na unikalny charakter prototypowych czujników, a także na różne charakterystyki fizyczne badanych materiałów i ich niejednorodność. Technika TDR jest obecnie wdrażana do pomiaru wilgotności materiałów budowlanych, cechujących się dużą twardością, stąd mała liczba danych do porównania dostępnych w literaturze. Ponadto, wyniki zmian wilgotności w próbkach materiałów budowlanych uzyskiwano w drodze pomiarów metodami inwazyjnymi lub bezpośrednimi.

Pomiar procesu podciągania kapilarnego sondami TDR przez ośrodek porowaty w postaci betonu komórkowego był przedmiotem badań Hansen'a i Hansen'a (2002a) oraz wcześniejszych badań autora (Suchorab i in., 2010). Badania te prowadzono z użyciem sond inwazyjnych.

Hansen i Hansen (2002a) zastosowali do badań beton o gęstości pozornej 500 kg/m^3 . Był to materiał o gęstości mniejszej, niż badany w niniejszej pracy, stąd montaż sond inwazyjnych był łatwiejszy. Sondy zamontowano na następujących wysokościach nad zwierciadłem wody: 15, 30, 45, 60, 75 i 90 mm, czyli znacznie niżej i w mniejszych odstępach, niż w eksperymencie przedstawionym w tym opracowaniu. W rezultacie zarejestrowano odczyty wilgotności w najniższej próbce już po upływie niecałej godziny, zaś po ok. 5 godzinach uzyskano stan zbliżony do nasycenia. Przyrosty wilgotności na wyższych poziomach odnotowano odpowiednio później. Porównując dynamikę procesów, analizowano odczyty wilgotności na wysokości 10 cm nad zwierciadłem wody (eksperyment przedstawiony w tym opracowaniu) oraz 90 mm – eksperyment przedstawiony przez Hansen'a i Hansen'a, (2002a). W przypadku sondy powierzchniowej TDR pojawienie się wilgoci odnotowano po upływie ok. 20 godzin, zaś stan zbliżony do nasycenia po ok. 80 godzinach. W eksperymencie Hansen'a i Hansen'a (2002a) woda pojawiła się po ok. 60 godzinach, a stan zbliżony do nasycenia po ok. 100 godzinach, przy czym najprawdopodobniej nie został on osiągnięty, ponieważ czujniki obsadzone niżej wykazywały wyższe odczyty wilgotności w niektórych punktach.

Kolejna praca (Suchorab i in., 2010) przedstawia wyniki podobnych badań monitoringu podciągania kapilarnego sondami inwazyjnymi TDR FP/mts. W tym przypadku gęstość pozorna użytego betonu wynosiła 500 kg/m^3 , a wymiary próbek $24 \times 16 \times 6 \text{ cm}$. Stan początkowy nie wykazał wartości zerowej, ale

wilgotność objętościową ok. 10%_{vol}. Sondy TDR LP/mts obsadzono na wysokościach 5, 10, 15 i 20 cm nad lustrem wody (czyli podobnie jak w przypadku eksperymentu z wykorzystaniem sondy pojemnościowej oraz sondy powierzchniowej TDR). Eksperyment prowadzono przez okres 20 dni. Maksymalna wartość wilgotności odczytana pod koniec eksperymentu wynosiła 0,34 cm³/cm³ i była porównywalna z odczytami za pomocą sond TDR B2 oraz FD (odpowiednio 0,37 i 0,34 cm³/cm³). Przyrosty do stanu nasycenia odczytywane sondami inwazyjnymi LP/mts pojawiały się na poszczególnych wysokościach po następującym upływie czasu 3, 5, 10 oraz 20 dni. W przypadku prototypowych sond TDR B2 było to 2, 4, 8 i 12 dni. Pomiary za pomocą sond tradycyjnych na bardziej stabilny przebieg procesu niż sonda B2 i charakteryzowały się mniejszymi wartościami odchyłeń standardowych, ok. 0,001 cm³/cm³. W przypadku sond TDR B2 i FD było to odpowiednio 0,008 i 0,004 cm³/cm³. Należy zaznaczyć, że wszystkie wartości odchyłeń uzyskane w eksperymencie były poniżej niepewności rozszerzonej metody TDR. Różnice w odczytach wilgotności w poszczególnych eksperymentach wynikały z innych właściwości fizycznych badanych materiałów, zróżnicowanych charakterystyk czujników, a także charakteru prowadzonych badań.

Proces podciągania kapilarnego wody przez modelowe ścianki z cegły przedstawiono w licznych pracach (Rirsch, Zhang, 2010; Franzoni i in., 2011; Franzoni, Bandini, 2012; Camino i in., 2014; Franzoni i in., 2014). Rirsch i Zhang (2010) zaproponowali eksperyment podciągania kapilarnego w modelowej ściance zbudowanej z sześciu warstw cegieł. Wykonano dwie ścianki różniące się wodoprzepuszczalnością zaprawy. Autorzy zaznaczyli, że planowali pomiary za pomocą sond pojemnościowych lub rezystancyjnych, lecz ze względu na zasolenie musieli z tego zrezygnować. W rezultacie badania przeprowadzono grawimetrycznie przez odwierty oraz dodatkowo – demontaż po zakończeniu eksperymentu i wagowe oznaczanie wilgotności. Badania trwały przez 6 miesięcy do osiągnięcia stabilnego poziomu nasycenia. Odnotowano wzrost wilgotności w poszczególnych warstwach cegieł w murze wskutek podciągania kapilarnego. Dodatkowo wykazano wpływ przepuszczalności zaprawy na odczyty wilgotności oraz występowanie różnicy wilgotności przy stosowaniu różnych technik inwazyjnych. Jako że autorzy nie podali gęstości objętościowej badanej cegły, trudno jest ilościowo porównać efekty przedstawione w niniejszej pracy i artykule Rirsch'a i Zhang'a (2010). Zauważono jednak, że w przypadku zaprawy o dużej przepuszczalności wodnej, ścianka nasycona była niemal na całej

wysokości, a profil wilgotnościowy był względnie równomierny (dolna warstwa wykazywała wilgotność ok. 20%_{mass}, zaś górna warstwa – powyżej 12%_{mass}). W przypadku zaprawy o małej przepuszczalności wodnej dużą wartość wilgotności, przekraczającą 18%_{mass}, zanotowano tylko w najniższej warstwie bezpośrednio narażonej na działanie wody. Wilgotność w warstwie drugiej była już znacznie mniejsza – nieco ponad 2%_{mass}, a w pozostałych warstwach wahała się w przedziale 0,5–1%_{mass} niezależnie od położenia w murze. Przebieg procesu zbliżony był do obserwowanego w przypadku ścianki z cegły ceramicznej pełnej i silikatowej z wykorzystaniem sond B2 oraz C.

W pracy Franzoniego i Bandiniego (2012) przedstawiono podobny eksperyment, w ramach którego zbudowano ściankę modelową i badano procesy podciągania kapilarnego wody oraz soli. Porowatość cegły wynosiła w tym przypadku ok. 35%. Proces trwał 150 dni, w trakcie których kilkakrotnie wykonano pomiary wilgotności z wykorzystaniem metody rezystancyjnej za pomocą sond umieszczonych na różnych wysokościach. Wyniki przedstawiono w postaci profili wilgotnościowych w czasie. Pierwszy pomiar po upływie 60 dni wykazał wilgotność w dolnych warstwach ok. 23%_{mass}, a w górnych ok. 16%_{mass}. W trakcie eksperymentu wystąpił dalszy wzrost wilgotności do poziomu ok. 25%_{mass} w dolnych warstwach cegieł, zaś na wysokości powyżej 40 cm wzrostu wilgotności nie odnotowano. Podobne eksperymenty opisano w artykułach tego samego zespołu badawczego (Franzoni i in., 2011; Franzoni i in., 2014). Pierwszy z nich przedstawiał wyniki badań podciągania kapilarnego w ściankach z cegły ceramicznej pełnej. Artykuł poświęcono analizie zawartości jonów, ale wyznaczono również profile wilgotnościowe obrazujące przebieg podciągania kapilarnego w ściance o wysokości 120 cm przez okres 120 dni. Odnotowano wilgotności z przedziału 12,5–20%_{mass}, a nawet 22,5%_{mass}, w zależności od rodzaju użytych cegieł i położenia cegły w murze względem zwierciadła wody. W ramach eksperymentu przedstawionego w kolejnej pracy (Franzoni i in., 2014), wybudowano kilka modelowych ścianek różniących się rodzajem zaprawy. Pomiary trwały przez okres 300 dni. Wykazano, że w zależności od rodzaju zaprawy wilgoć pojawia się tylko w dolnych warstwach cegieł (do wartości ok. 20%_{mass}), a w przypadku dobrze przepuszczalnej zaprawy – również w warstwach położonych wyżej.

Artykuł Camino i in. (2014) przedstawia proces podciągania kapilarnego w ściance modelowej z cegły ceramicznej pełnej o gęstości objętościowej 1830 kg/m³. Badania prowadzono za pomocą czujników wilgotności względnej po-

wietrza RH oraz grawimetrycznie z demontażem ścianki po zakończeniu eksperymentu. Dynamikę procesu podciągania kapilarnego przedstawiono w postaci krzywych zbliżonych kształtem do uzyskanych w tych badaniach z wykorzystaniem sondy TDR B2. Wilgotność w dolnej warstwie cegieł wynosiła ok. $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, w dwóch wyższych warstwach była nieznacznie niższa, a w warstwach najwyższych na poziomie $0,01\text{--}0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Warto porównać odczyty z wykorzystaniem sondy B2 oraz sond C. Należy mieć na uwadze, że za pomocą sond typu C prowadzono ciągły monitoring zjawiska, a sonda B2 służyła do pomiarów dyskretnych. W przypadku ścianki z cegły ceramicznej pełnej zaobserwowano następujące podobieństwa:

- wartości wilgotności maksymalnej zmierzone przez sondy B2 i C były porównywalne, tj. w najniższej warstwie notowano wartości rzędu $0,35\text{--}0,36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co oznacza stan zbliżony do nasyconego, zaś w warstwie drugiej osiągnięto $0,26\text{--}0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Należy zauważyć, że odczyty sondą B2 były minimalnie wyższe (o $0,01\text{--}0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) w porównaniu z sondą typu C,
- tempo przyrostu wilgotności było porównywalne dla obu typów sond, bardziej gwałtowny przyrost odnotowano jednak w najniższej położonym czujniku w przypadku sondy C,
- sondy zamontowane lub przyłożone do warstw czwartej i piątej nie wykazały podwyższonego stanu zawilgocenia.

Różnice w pomiarach były następujące:

- sonda typu C wykazała wzrost wilgotności do ok. $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ na trzecim poziomie cegieł. Efektu tego nie obserwowano przy zastosowaniu sondy B2,
- pomiary zmian wilgotności ścianki za pomocą sondy C były bardziej stabilne. Różnice stabilności pomiaru można wyrazić za pomocą odchyleń standardowych, których wartości w przypadku sondy B2 zawierały się w zakresie $0,002\text{--}0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (średnia wartość odchylenia standardowego wynosiła $0,017 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), a w przypadku sondy C wynosiły ok. $0,001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

W przypadku pomiarów podciągania kapilarnego w ściance z cegły silikatowej stwierdzono, że:

- przebiegi zmian wilgotności rejestrowane przez sondy typu C były bardziej łagodne od rejestrowanych przez sondę B2,

- sonda C umieszczona na poziomie drugiej warstwy cegieł w murze wykazała podwyższoną wilgotność – ponad $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, podczas, gdy sonda B2 wykazywała w tym miejscu znacznie mniejszą wartość – $0,065 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Przyczyn tego zjawiska może być kilka. Najbardziej prawdopodobną przyczyną wydaje się być odmienny przebieg zjawiska, spowodowany niejednorodnością badanego materiału oraz przerwami w ciągłości zaprawy,
- odczyty pozostałych, wyżej zlokalizowanych czujników były zbliżone – odnotowano niewielki wzrost wilgotności w przedziale $0,00\text{--}0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co świadczy o jej niskim poziomie,
- pomiary wykonane za pomocą sondy B2 cechowały się średnim odchyleniem standardowym wynoszącym $0,008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, przy maksymalnej wartości tego parametru $0,018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, natomiast odchylenia standardowe dla sond typu C wynosiły ok. $0,001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

W ocenie autora pracy, przyczyną różnic w odczytach za pomocą sond B2 i C był sposób prowadzenia badań i charakter badanego zjawiska. Wartości odchyleń standardowych zależały od sposobu przytwierdzenia czujnika do badanej powierzchni. Badania za pomocą sondy B2 prowadzone były w sposób nieciągły. Sonda B2 mogła przylegać do poszczególnych części ścianki w sposób mniej lub bardziej dokładny (w nieco innej pozycji, z różną siłą, zależną od osoby obsługującej), zaś sonda typu C zamontowana była na stałe w sposób trwały, a jej pozycja i siła przyłożenia były niezmiennie. Różnice w przebiegach mogły wynikać z odmiennego przebiegu badanego zjawiska spowodowanego niejednorodnością badanych materiałów, a także spoiny łączącej poszczególne elementy ścianki.

Badania procesów wilgotnościowych w autoklawizowanym silikacie wapiennym były przedmiotem licznych prac (Pavlík i in., 2006c; Scheffler, Plagge, 2007; Suchorab, Hunek, 2011; Pavlík i in., 2012; Van Belleghema i in., 2014). Ze względu na wysoką porowatość i silnie kapilarny charakter materiału, wartości wilgotności oraz dynamika podciągania kapilarnego była w tym przypadku bardzo wysoka i zbliżona do wykazanej w niniejszym opracowaniu. W artykule Pavlíka i in. (2012) przedstawiono proces desorpcji, w którym odparowanie wody od stanu nasycenia, tj. ok. $3,1 \text{ kg/kg}$ do stanu $0,5 \text{ kg/kg}$ zachodziło równomiernie dla wszystkich analizowanych poziomów. Porównując jakość uzyskanych wyników do prezentowanych w literaturze należy stwierdzić, że odchylenia standardowe były porównywalne i wynosiły ok. $0,001 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Uzyskane wartości były dużo niższe od niepewności pomiarowej techniki, szczególnie w odniesieniu do materiału z tak dużą porowatością otwartą.

W tabeli 3.4.1 przedstawiono podstawowe wartości pomiarowe uzyskane w pomiarach laboratoryjnych, które były przedmiotem dyskusji.

Tabela 3.4.1. Podstawowe wielkości uzyskane z pomiarów laboratoryjnych

Badanie		Masa próbki suchej	Masa próbki nasyconej	Przyrost masy (wagowy)	Szacowany przyrost masy (B2/C/FD)	Różnica w badaniach bezpośrednich i pośrednich	Średnie odchylenia standardowe met. pośredniej
Sonda	Materiał	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[%]	[cm ³ /cm ³]
B2	Beton komórkowy	13,69	18,24	4,55	4,10 (B2) 4,71 (FD)	-10 (B2) +4 (FD)	0,008 (B2) 0,004 (FD)
B2	Cegła ceramiczna	36,81	39,64	2,83	2,74	-3	0,017
B2	Cegła silikatowa	43,71	45,66	1,95	1,93	-1	0,008
C	Silikat wapienny	1,93	9,30	7,37	7,29	-1	0,001
C	Cegła ceramiczna	36,86	40,07	3,21	2,86	-11	0,001
C	Cegła silikatowa	43,74	45,95	2,21	2,05	-7	0,001

Podsumowując można stwierdzić, że komponenty budowlane są ośrodkami o właściwościach kapilarnych, w których transport wody jest zjawiskiem typowym. Przy braku właściwych izolacji przeciwwilgociowych lub przeciwwodnych stanowi to poważny problem eksploatacyjny. W zależności od materiału i charakteru zaprawy, wilgotność szybko przekracza poziom 0,2 cm³/cm³ (20%_{vol}), co według skali proponowanej w literaturze przedmiotu (Adamowski, 2005; Hoła i in., 2009; Piotrowska, Żakowska, 2011) oznacza mury mokre. Odnosząc odczyty wilgotności uzyskane w przedstawionych eksperymentach do tabeli 2.1.4, można stwierdzić, że mury z cegły ceramicznej pełnej mogą stanowić dobre podłoże do rozwoju następujących gatunki grzybów: *Aspergillus versicolor*, *Acremonium butyri*, *Cladosporium cladosporioides*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus flavus*, *Acremonium murorum*. Zawilgocenie przegród budowlanych stanowi obciążenie dla środowiska wewnętrznego i przyczynia się do powstania syndromu chorego budynku.

3.5. Badania terenowe

Analizowano możliwości zastosowania techniki TDR do oceny wilgotności przegród budowlanych w warunkach terenowych dla obiektów rzeczywistych. W pracy zaprezentowano wyniki badań dwóch przykładowych obiektów zlokalizowanych w okolicach Lublina. Jednym z obiektów była przegroda zewnętrzna budynku narażona na zjawisko podciągania kapilarnego (rysunek 3.5.1). Drugim obiektem był fragment ścianki wentylacyjnej w niedostatecznie wentylowanym pomieszczeniu. Podjęto próbę ilościowej oceny zagrożenia elementów budowlanych zjawiskiem zawilgocenia oraz wykrycia źródła zagrożenia. Badania miały charakter testu służącego wykazaniu potencjału techniki pomiarowej TDR do oceny stopnia zawilgocenia przegród w obiekcie rzeczywistym.

3.5.1. Metodyka pomiaru

Do realizacji pomiarów zastosowano następujące urządzenia:

- przenośny miernik TDR - FOM (Field Operated Multimeter – ETest/ Lublin)
- komputer przenośny – stacja sterująca (komunikację z LOM zapewniał port RS – 232),
- kabel koncentryczny łączący sondę z miernikiem,
- sondę powierzchniową TDR B2,
- oprogramowanie do sterowania miernikiem FOM, pozyskiwania i przetwarzania danych.

Do realizacji badań terenowych wybrano prototypową sondę powierzchniową B2. O wyborze sondy do pomiarów *in-situ* zdecydowały dwa podstawowe czynniki:

- niska niepewność pomiarowa wykazana w badaniach kalibracyjnych oraz testach laboratoryjnych,
- mniejsza szerokość czujnika w porównaniu z innymi sondami typu B, dzięki czemu możliwe było znalezienie odpowiednio dużej, równej powierzchni wymaganej do przyłożenia czujnika w obszarze każdej komórki siatki pomiarowej.

Badanie polegało na przyłożeniu sondy B2 w obszarze każdej komórki siatki pomiarowej, dokładnie, z równomiernym dociskiem na całej powierzchni muru. Aplikacja sterująca pobierała od miernika krzywą reflektometryczną, na podstawie której obliczała wartość efektywnej przenikalności dielektrycznej ϵ_{eff} . War-

tość ta była następnie przeliczana na wilgotność muru za pomocą odpowiedniej formuły kalibracyjnej zawartej w tabeli 3.3.5. Pomiarzy w danej komórce siatki powtarzano trzykrotnie.

Do wizualizacji wyników opracowano siatki pomiarowe (przedstawione na rysunkach 3.5.2 i 3.5.6), umożliwiające ustalenie, w których miejscach badanej przegrody należy prowadzić pomiary. Siatki pomiarowe miały charakter dyskretyzacyjny, podobnie jak przy realizacji obliczeń numerycznych.

3.5.2. Badanie przegrody zewnętrznej budynku

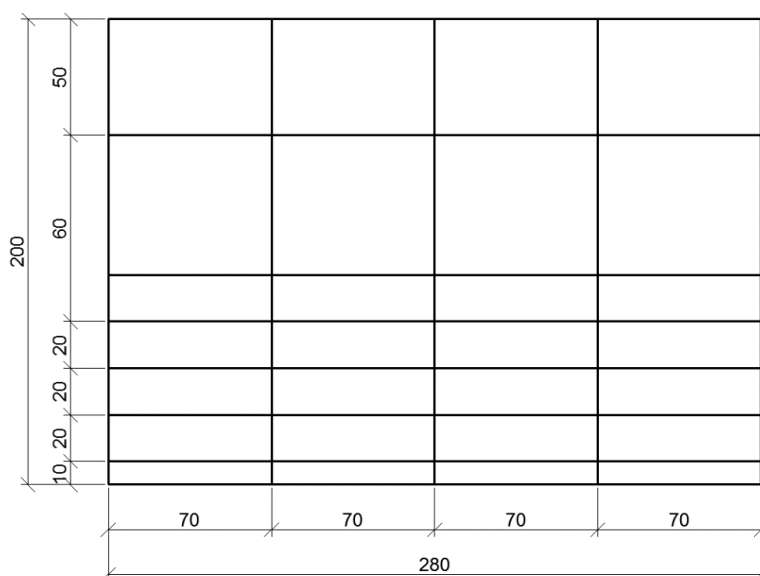
3.5.2.1. Opis obiektu

Badania przeprowadzono trzykrotnie w odstępach jednodniowych w dniach 07.08.2012 r., 14.08.2012 r. oraz 21.08.2012 r. Przedmiotem badań była przedstawiona na rysunku 3.5.1 ściana zewnętrzna budynku mieszkalnego w zabudowie bliźniaczej. Obiekt pochodzi z lat 90. XX wieku. Osłony zewnętrzne wzniesiono z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapienno-cementowej. Przegroda wybrana do badań znajduje się w zachodniej elewacji budynku. Charakteryzuje ją brak izolacji termicznej oraz brak zabezpieczeń przed zjawiskami podciągania kapilarnego i wpływem wód opadowych. Efektem tego jest widoczna korozja i niszczenie dolnych warstw przegrody.



Rys. 3.5.1. Powierzchnia zewnętrzna przegrody (prostokątem oznaczono badany obszar) z wyraźnymi oznakami zniszczenia wywołanymi podciąganiem kapilarnym (źródło: opracowanie własne)

Wizualna ocena stanu przegrody pozwoliła wysnuć przypuszczenie o gruntowym pochodzeniu wód zawartych w murach. Świadczyła o tym destrukcja tynku na ścianie kamienicy w warstwach przyległych do ziemi. W związku z powyższym zdecydowano się na zagęszczenie siatki w dolnych warstwach muru, co jest widoczne na rysunku 3.5.2. Całkowita powierzchnia pomiarowa siatki wynosiła 5,6 m² (szerokość – 2,8 m, wysokość – 2,0 m). Siatka składała się z 7 poziomów i 4 pionowych kolumn. Szerokość kolumn była stała i wynosiła 70 cm.



Rys.3.5.2. Siatka pomiarowa

3.5.2.2. Wyniki badań

Wartości przenikalności dielektrycznej w poszczególnych punktach pomiarowych odczytane z wykorzystaniem sondy B2 zostały przeliczone na wilgotność z wykorzystaniem formuły dla cegły ceramicznej pełnej:

$$\theta = -0,3092 + 0,1082\epsilon_{\text{eff}} - 0,0034\epsilon_{\text{eff}}^2 \quad (3.5.1)$$

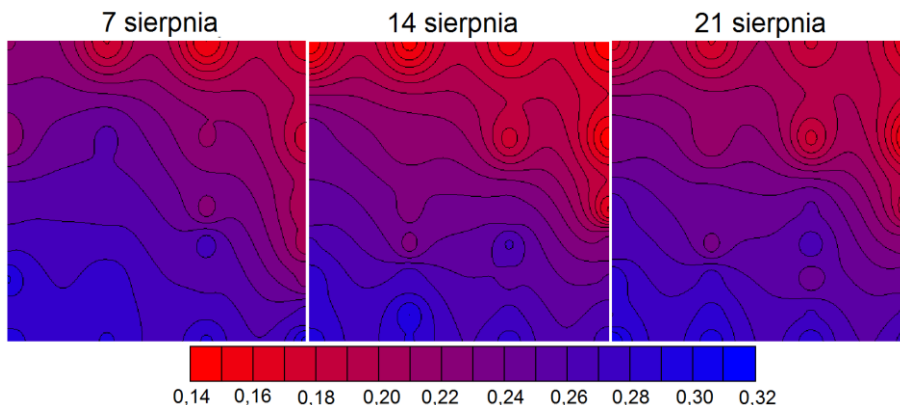
W tabeli 3.5.1. przedstawiono średnie wartości efektywnej przenikalności dielektrycznej w poszczególnych punktach pomiarowych.

Tabela 3.5.1. Efektywne przenikalności dielektryczne w poszczególnych węzłach siatki

Poziom [cm] *	7 sierpnia				14 sierpnia				21 sierpnia			
	$\epsilon_{\text{eff}} [-]$				$\epsilon_{\text{eff}} [-]$				$\epsilon_{\text{eff}} [-]$			
	Szerokość muru [cm]				Szerokość muru [cm]				Szerokość muru [cm]			
5	6,33	5,73	5,46	5,63	5,09	5,13	5,24	5,06	5,27	5,31	5,44	5,21
20	6,39	6,84	6,32	5,80	6,42	6,04	5,54	5,10	6,20	5,91	5,41	4,97
40	6,86	6,88	6,42	6,04	6,50	6,29	6,36	5,30	6,71	6,42	6,51	5,40
60	7,13	7,10	7,06	6,08	6,83	6,27	6,84	6,25	6,65	6,27	6,78	6,13
80	7,50	7,31	6,91	6,44	7,13	6,96	6,62	6,51	7,13	6,90	6,38	6,44
120	7,18	7,29	7,14	7,03	7,04	7,31	6,86	6,79	6,97	7,05	6,83	6,70
175	7,46	7,34	7,35	7,53	7,30	7,15	7,09	6,95	7,47	7,28	7,14	6,97

* licząc od powierzchni gruntu

Wartości z tabeli 3.5.1. przeliczono na wilgotność objętościową i przedstawiono na rysunku 3.5.3 w postaci map wilgotności.



Rysunek 3.5.3. Mapy wilgotności przegrody wyznaczone za pomocą powierzchniowych sond TDR typu B2

Z pomiarów wynika, że badany obiekt dotknięty jest zjawiskiem podciągania kapilarnego. Wizualna ocena obiektu pozwala na określenie przyczyny problemu – jest nią korozja widoczna w dolnych partiach budynku, związana z występowaniem wykwitów solnych, a w konsekwencji niszczenie struktury materiału. Pomiary pozwoliły na ilościową ocenę zagrożenia i potwierdziły, iż w dolnych partiach przegrody, najbardziej narażonych na obecność wód gruntowych, wil-

gotność objętościowa jest zbliżona, a nawet nieznacznie przekracza wartość $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, co jest stanem bliskim całkowitemu nasyceniu wielu materiałów porowatych. Wysoki poziom wilgotności, przekraczający $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, odnotowany był w przegrodzie do wysokości ok. 50 cm, a od strony północnej (na której znajduje się dobudowany, prostopadły do badanej ściany mur) sięgał nawet 1 m. W wyższych partiach przegrody obserwowano również znaczne zawilgocenie, ale nie przekraczało ono wartości $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. W najwyższych partiach odnotowano wartości wilgotności rzędu $0,15\text{--}0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

3.5.3. Badanie wilgotności ścianki kominowej z kanałami wentylacyjnymi

3.5.3.1. Opis obiektu

Badania przeprowadzono w dniu 04.06.2016 r. Przedmiotem badań był fragment ścianki kominowej (rysunki 3.5.4 oraz 3.5.5), stanowiącej element funkcjonalny układu wentylacji naturalnej w budynku wielorodzinnym (woj. lubelskie). Budynek wykonano w technologii tradycyjnej, oddano do użytku w roku 2011. Cechą charakterystyczną obiektu jest spadzisty dach z poddaszem użytkowym w postaci antresoli. Ocenę wilgotności ścianki przeprowadzono na poddaszu.

Ściankę wymurowano z bloczków silikatowych i pokryto tynkiem cementowo-wapiennym lekkim. Fotografie ścianki przed i po otynkowaniu przedstawiono na rysunkach 3.5.4 i 3.5.5.



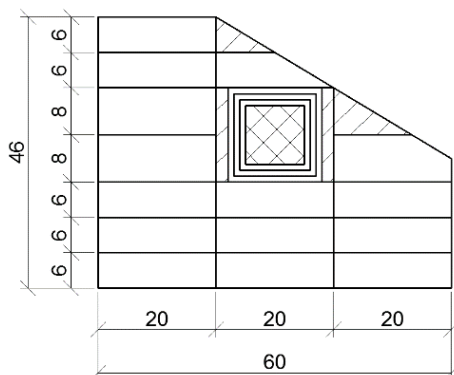
Rysunek 3.5.4. Fragment ścianki kominowej przed położeniem warstwy tynkowej



Rysunek 3.5.5. Ścianka w dniu prowadzenia pomiarów, wyraźnie widoczne zacieki wodne

Pomieszczenie jest niewłaściwie wentylowane. Wynika to ze szczelnej skrupy budynku, szczelnej stolarki okiennej oraz niewłaściwie działającej wentylacji naturalnej. Nisko wyprowadzony komin z wyrzutnią umieszczoną poniżej linii kalenicy pokrycia dachowego powoduje, że ciąg kominowy nie występuje, a kierunek przepływu powietrza zależy od rozkładu ciśnień po dwóch stronach budynku i siły wiatru. W przypadku, gdy wiatr wieje od strony wschodniej, w kominie obserwowany jest ciąg wsteczny, skutkujący napływem zimnego powietrza do budynku, nawet przy próbach poprawy efektywności wentylacji naturalnej przez rozszczelnienie lub uchylenie okien. W dniu pomiaru zaobserwowano napływ zimnego powietrza zewnętrznego do pomieszczenia, co spowodowało wychłodzenie silikatowej ścianki kominowej (pozbawionej izolacji termicznej), a w konsekwencji do kondensacji pary wodnej na powierzchni powłoki tynkowej.

Przygotowano siatkę pomiarową (rys. 3.5.6) o kształcie odbiegającym od prostokątnego, ze względu na to, że ścianka wentylacyjna zlokalizowana była pod połacią dachową nachyloną do poziomu pod kątem 45° . Dodatkowo, w badanym elemencie przegrody zamontowano kratkę wentylacyjną wywiewną o wymiarach w obrysie zewnętrznym 16×16 cm (widoczną na schemacie). Utrudniło to zarówno prowadzenie pomiaru, jak też wizualizację jego wyników, zmniejszając czytelność uzyskanych map wilgotności. Obszary, na których z przyczyn technicznych nie zmierzono wilgotności, zakreskowano. Wymiary siatki były następujące: szerokość 60 cm, wysokość 46 cm.



Rys. 3.5.6. Siatka pomiarowa

Warunki pomiarów były następujące: temperatura wewnętrzna 23°C, temperatura zewnętrzna -21°C, wilgotność względna powietrza wewnętrznego RH = 70%, wilgotność względna powietrza zewnętrznego RH ≈ 0%.

3.5.3.2. Wyniki badań

Odczytano wartości przenikalności dielektrycznej w poszczególnych punktach pomiarowych, a następnie przeliczono je na wilgotność ośrodka korzystając z formuły:

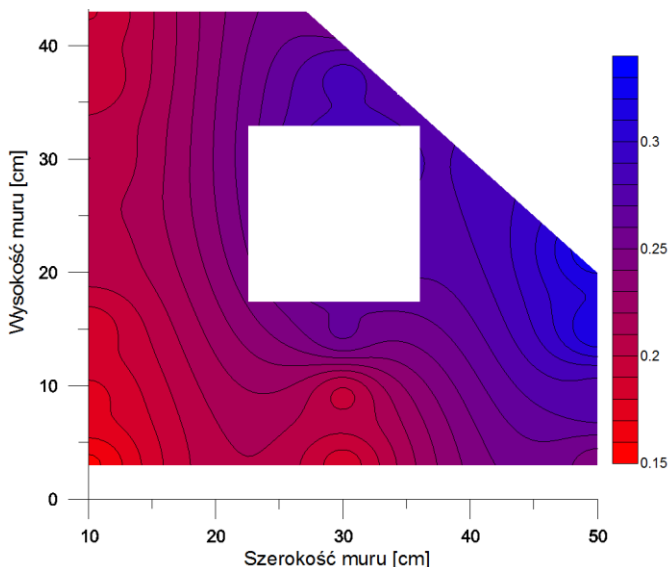
$$\theta = -0,3078 + 0,1129\varepsilon_{\text{eff}} - 0,0044\varepsilon_{\text{eff}}^2 \quad (3.5.2)$$

opracowanej dla sondy B2 i tynku A (tynk cementowo-wapienny lekki), którym pokryta jest powierzchnia badanej ściany.

Wartości przenikalności dielektrycznej oraz wilgotności materiału przedstawiono w tabeli 3.5.2.

Tabela 3.5.2. Efektywne przenikalności dielektryczne oraz wilgotności powłoki tynkowej odczytane w poszczególnych węzłach siatki

Wysokość punktu pomiarowego [cm]	Efektywna przenikalność dielektryczna			Wilgotność		
	[-]			[cm ³ /cm ³]		
	Szerokość muru [cm]			Szerokość muru [cm]		
	20	20	20	20	20	20
43	5,65	-	-	0,189	-	-
37	5,67	7,34	-	0,191	0,284	-
30	5,82	-	-	0,200	-	-
22	5,90	-	8,40	0,205	-	0,330
15	5,56	6,91	8,11	0,184	0,262	0,319
9	5,45	5,77	7,19	0,177	0,197	0,277
3	5,16	5,58	6,60	0,158	0,185	0,246



Rysunek 3.5.7. Mapa wilgotności fragmentu ścianki kominowej wyznaczona za pomocą powierzchniowych sond TDR typu B2

Wyniki pomiarów (tabela 3.5.2) przedstawione w formie graficznej na rysunku 3.5.7 potwierdzają podwyższone stany wilgotności ocenianego fragmentu przegrody budowlanej w warstwie tynku. Z mapy wilgotnościowej można wywnioskować, że wilgotności przegrody zawierają się w przedziale od $0,15$ do $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Tym samym można stwierdzić, że powierzchnia całej badanej przegrody dotknięta jest zjawiskiem zawilgocenia.

Najniższą wilgotność odnotowano w lewym dolnym rogu badanego obszaru – $0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Wartości najwyższe, przekraczające $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, a więc bliskie stanom nasycenia danego tynku, obserwowano w otoczeniu kratki wentylacyjnej, tj. powyżej kratki i po jej prawej stronie.

3.5.4. Dyskusja wyników

Wyniki uzyskane w pomiarach terenowych za pomocą sond TDR B2 pozwoliły na ocenę stopnia zagrożenia budynków zawilgoceniem oraz umożliwiły wskazanie źródła tego zjawiska.

W przypadku ściany zewnętrznej z cegły ceramicznej uzyskano odczyty wilgotności rzędu $0,15$ – $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Najwyższe wartości odnotowano w najniższych warstwach przegrody, z tendencją spadkową w kierunku pionowym, co

sugeruje brak właściwej izolacji przeciwwilgociowej i wystąpienie związanego z tym zjawiska podciągania kapilarnego.

Wartości przytoczone w pracy są średnią z trzech pomiarów, a niepewność odczytów wyrażona miarą odchylenia standardowego zawiera się w przedziale $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 - 0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Maksymalne wartości odchyżeń standardowych są znaczne, przekraczające niepewność pomiarową metody określoną w badaniach kalibracyjnych. W większości przypadków uzyskano je w dolnej warstwie muru, gdzie powierzchnia cegieł była zniszczona przez korozję spowodowaną krystalizacją soli. Stopień zasolenia muru był prawdopodobnie wysoki (nie prowadzono w tym zakresie badań jakościowych i ilościowych). Zgodnie z podstawami techniki TDR, podwyższone zasolenie nie miało wpływu na odczytywane przez miernik wartości wilgotności, jednak amplitudy zmian napięcia w uzyskanym reflektogramie pochodzącym z zasolonego ośrodka były mniejsze. W związku z powyższym odległości pomiędzy pikami obliczane przez automatyczny algorytm mogły być obciążone większą niepewnością. Średnie odchylenie standardowe dla wszystkich pomiarów wynosiło $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i było wyższe od niepewności pomiarowej metody ustalonej w drodze badań kalibracyjnych, lecz niższe od wartości niepewności podawanej w literaturze przedmiotu (Topp i in., 1984; Amato, Ritchie, 1995; Noborio, 2001; Evett, 2003; Černý, 2009; Piotrowski, 2009).

Zakładając gęstość pozorną cegieł $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$ i przeliczając wilgotność objętościową zmierzoną sondą TDR na wilgotność masową według wzoru (2.1.3) można stwierdzić, że maksymalna wartość wilgotności masowej wynosiła w dolnych partiach muru ok. $17\%_{\text{mass}}$, w warstwach środkowych ok. $12\%_{\text{mass}}$, a w partiach górnych mierzonego obszaru ok. $8\%_{\text{mass}}$.

Porównując powyższe wartości z tabelą 2.1.3 należy zauważyć, że dolne oraz środkowe warstwy muru można sklasyfikować jako mokre (graniczną wartością jest $12\%_{\text{mass}}$). Pozostałe części muru należy zakwalifikować do mocno wilgotnych (przedział $8-12\%_{\text{mass}}$) lub średnio wilgotnych ($5-8\%_{\text{mass}}$).

Konsekwencje takiego stanu zawilgocenia przegrody zewnętrznej są groźne z punktu widzenia konstrukcyjnego (korozja chemiczna i mechaniczna), a także sanitarno-higienicznego. Woda obecna w przegrodach stanowi dobre podłoże dla rozwoju grzybów (Piotrowska i in., 2001; Eggleston, Bush, 2001; Żukiewicz-Sobczak i in., 2012). Przy wysokich wilgotnościach występujących po wewnętrznej stronie przegrody (ściana była badana z zewnątrz) nawet właściwie funkcjonująca wentylacja naturalna nie zapobiega rozwojowi grzybów na ścia-

nach. Konsekwencją jest wzrost stężenia ich metabolitów (MVOC, mykotoksyny, itp.), a także obecność zarodni grzybowych w powietrzu (Voutilainen, 2005; Salonen i in., 2009a; Salonen i in., 2009b). Tym samym jakość powietrza wewnętrznego ulega pogorszeniu, co w konsekwencji prowadzi do syndromu choro-
wego budynku.

Badana ściana kominowa wykazywała znaczny wzrost zawilgocenia przy jej otynkowanej powierzchni. Był to jednak proces chwilowy, związany z niewłaściwym funkcjonowaniem wentylacji naturalnej oraz wychłodzeniem materiału, co w rezultacie doprowadziło do kondensacji pary wodnej na powierzchni muru. Odczyty wilgotności wykazały stan wilgotnościowy materiału na poziomie od 0,15 do ponad 0,30 cm³/cm³. Biorąc pod uwagę, że wilgotność maksymalna tynku ustalona na etapie badań kalibracyjnych osiągnęła wartość 0,33 cm³/cm³, można stwierdzić, że stan zawilgocenia materiału był zbliżony do poziomu nasycenia (potwierdziła to również ocena wizualna). W porównaniu do wyników uzyskanych dla ściany zewnętrznej, odnotowane w tym przypadku wartości charakteryzowały się mniejszą niepewnością pomiarową – średnia wartość odchyłeń standardowych była niższa od 0,01 cm³/cm³ (jest to wartość wyższa od niepewności pomiarowej sondy B dla badanego materiału 0,007 cm³/cm³, ale niższa od wartości niepewności U dla górnego zakresu pomiarowego). Wartość maksymalna odchyłeń (obserwowana w pobliżu kratki wentylacyjnej) wynosiła 0,018 cm³/cm³. Wartości odchyłeń standardowych z trzech pomiarów w próbie były niższe od uzyskanych dla przegrody zewnętrznej budynku. Zdaniem autora wynikało to z gładkiej, pozbawionej defektów powierzchni przegrody wewnętrznej i precyzyjnego przylegania czujnika, a także mniejszego wpływu jonów soli obecnych w badanym ośrodku.

Analiza wyników pozwoliła na stwierdzenie nieprawidłowości w działaniu wentylacji w budynku. W wyniku niewłaściwego kierunku przepływu zimnego powietrza zewnętrznego (o temperaturze zbliżonej do -20°C) i braku izolacji termicznej ścianki wentylacyjnej, przy podwyższonej wilgotności względnej powietrza wewnątrz badanego pomieszczenia (RH=65%) zachodziło zjawisko kondensacji pary wodnej na powierzchni, skutkiem czego przegroda była widocznie mokra. Powłoka tynkowa w najmniej wilgotnych miejscach osiągała prawie 50% maksymalnej wilgotności. W związku z powyższym należy uznać, iż tynk w całym badanym obszarze dotknięty był zjawiskiem zawilgocenia, co przy potencjalnie długo utrzymującym się stanie może prowadzić do rozwoju niebezpiecznych mikroorganizmów, porażenia biologicznego, obniżenia jakości

powietrza wewnętrznego, a w dalszej konsekwencji do wystąpienia syndromu chorego budynku. Zjawisko to jest powszechne w nowowznoszonych obiektach, w których w celu „podniesienia efektywności energetycznej” zastosowano zbyt szczelną skorupę zewnętrzną i stolarkę okienną (Nantka, 2011; Gładyszewska-Fiedoruk, 2011), a w rezultacie ograniczono wymianę powietrza. Drugą zagrożoną grupę stanowią budynki kilkudziesięcioletnie poddane zabiegom termomodernizacyjnym, polegającym na uszczelnieniu skorupy i wymianie stolarki, co prowadzi do nieprawidłowości w funkcjonowaniu wentylacji naturalnej (Gaczoł, 2007; Macieik, 2008). Skutek takich zabiegów jest często odwrotny do oczekiwań. Z jednej strony mogą pojawić się oszczędności w zużyciu energii, z drugiej – spada jakość powietrza wewnętrznego i rośnie ryzyko wystąpienia syndromu chorego budynku.

Powyższy problem można skutecznie wyeliminować przez zastosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej. Jest to jednak trudne do zrealizowania w budynkach użytkowanych, szczególnie wielorodzinnych. Dostępne są również rozwiązania techniczne poprawiające jakość ciągu kominowego polegające na montażu nasad kominowych specjalnej konstrukcji lub wyprowadzeniu ścianek kominowych powyżej kalenicy, ale najistotniejsza jest świadomość społeczna w zakresie eksploatacji budynków.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przeprowadzone badania umożliwiły rozszerzenie możliwości pomiarowych techniki reflektometrii w domenie czasu pod kątem wilgotnościowej oceny przegród budowlanych.

Zaprojektowano i wykonano prototypowe rozwiązania powierzchniowych sond pomiarowych pracujących w technologii TDR do bezinwazyjnej oceny wilgotności materiałów i przegród budowlanych. Dla każdego czujnika określono zasięg oddziaływania, dobrano wymiary próbek na potrzeby kalibracji oraz pomiarów laboratoryjnych i badań *in-situ*.

Prototypowe czujniki skalibrowano, opracowano modele regresji w postaci wielomianów drugiego stopnia, uzależniających wilgotność ośrodka od efektywnej przenikalności dielektrycznej odczytywanej przez miernik TDR. Opracowano indywidualne formuły kalibracyjne dla każdego z prototypowych czujników i kilku popularnych materiałów budowlanych. W każdym przypadku ustalono niepewności pomiarowe wyrażone jako RMSE oraz niepewności rozszerzone U.

Potencjał pomiarowy prototypowych czujników sprawdzono w testach laboratoryjnych na przykładzie badań podciągania kapilarnego w modelowych ściankach z betonu komórkowego, cegły ceramicznej pełnej, cegły silikatowej i autoklawizowanego silikatu wapiennego. Dodatkowo dokonano weryfikacji przydatności metody w warunkach terenowych na przykładzie pomiarów wilgotności ściany zewnętrznej budynku oraz nadmiernie zawilgoconej wewnętrznej ściany kominowej.

Wyniki badań wskazują na możliwość praktycznego zastosowania czujników powierzchniowych, działających na zasadzie reflektometrii w domenie czasu do oceny stanu wilgotnościowego przegród budowlanych, co jest istotnym parametrem wpływającym na jakość powietrza wewnętrznego.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- zasięg oddziaływania impulsu elektromagnetycznego autorskich, prototypowych czujników zawiera się w przedziale 40–50 mm w zależności od szerokości rozstawu prętów pomiarowych. Sondy o mniejszym rozstawie prętów (B1, B2 i C) charakteryzowały się zasięgiem 40 mm, zakres sond o większym rozstawie prętów pomiarowych (B3 i B4) wynosił 50 mm.

- zasięg oddziaływania czujnika jest parametrem właściwym dla każdej z sond, a odczyty sondy są miarodajne jedynie dla danej grubości muru; podczas badań kalibracyjnych należy tak dobierać wymiary próbek, aby ich grubość była większa od zasięgu danego czujnika,
- nietypowa budowa czujników wymusza konieczność ich indywidualnej kalibracji; tradycyjne formuły kalibracyjne typowe dla sond inwazyjnych nie mogą być w tym przypadku stosowane,
- przyjęty model regresji w postaci równań wielomianowych drugiego stopnia dobrze odzwierciedla zależność pomiędzy wilgotnością badanego ośrodka, a efektywną przenikalnością dielektryczną odczytaną z wykorzystaniem aparatury TDR, potwierdzają to wysokie wartości współczynnika determinacji (średnia wartość ze wszystkich pomiarów 0,980) oraz niskie wartości pierwiastka średniego błędu kwadratowego (średnia wartość ze wszystkich pomiarów $0,0145 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) oraz niepewności rozszerzonej (średnia wartość ze wszystkich pomiarów $0,0134 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$),
- najkorzystniejsze parametry miernicze (R^2 , RMSE oraz U) uzyskały sondy powierzchniowe typu B2 i typu C, dlatego wykorzystano je w badaniach laboratoryjnych i terenowych,
- autorskie prototypy sond pozwoliły na prowadzenie bezinwazyjnych badań procesów transportu wody w przegrodach budowlanych i ocenę stopnia ich zawilgocenia zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak też terenowych,
- odchylenia standardowe odczytów wykonanych za pomocą prototypowych sond powierzchniowych TDR były porównywalne do uzyskanych innymi metodami (FD), przesłanką wskazującą na potrzebę kontynuacji badań nad rozwojem sensorów TDR jest ich brak wrażliwości na zasolenie ośrodka,
- odczyty wilgotności za pomocą sond typu C cechowały się mniejszym zróżnicowaniem rozkładu od odczytów za pomocą sond typu B2 z uwagi na stałe, precyzyjne przymocowanie czujnika do powierzchni badanego ośrodka,
- obiekty rzeczywiste będące przedmiotem badań *in-situ* charakteryzował podwyższony poziom wilgotności, przekraczający wartość $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (zbliżoną do stanu nasycenia materiału), co pozwoliło zakwalifikować je do murów mokrych lub mocno wilgotnych,

- nieinwazyjna metoda TDR może być z powodzeniem stosowana do szybkiej diagnostyki stopnia zawilgocenia przegród budowlanych, umożliwiając podjęcie kroków naprawczych minimalizujących ryzyko porażenia biologicznego budynków, pogorszenia jakości powietrza wewnętrznego oraz wystąpienia syndromu chorego budynku.

Prototypowe sondy opracowane w ramach niniejszych badań stanowią alternatywę dla tańszych, a dzięki temu powszechnie stosowanych, czujników rezystancyjnych oraz pojemnościowych. Czujniki takie są jednak obarczone wadami, których technologia TDR jest pozbawiona.

5. Bibliografia

Podręczniki i artykuły naukowe:

- Abdi H., Williams L.J., Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) Test, Salkind N. (Red.), *Encyclopedia of Research Design*, Thousand Oaks, CA, USA, Sage, 2010.
- Adamowski J., Metodyka badań zawilgoconych murów w obiektach zabytkowych, *Postęp i nowoczesność w konserwacji zabytków*, Lublin 2005.
- Amato M., Ritchie J.T., 1995. Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 59: 325–329.
- Andrés A., Díaz M.C., Coz A., Abellán M.J., Viguri J.R., 2009, Physico-chemical characterisation of bricks all through the manufacture process in relation to fluorescence salts, *Journal of the European Ceramic Society*, 29 (10): 1869–1877.
- ASHRAE, 2012, *Position Document on Limiting Indoor Mold and Dampness in Buildings*, www.ashrae.org
- Baker R., Frydman S., 2009, Unsaturated Soil Mechanics: Critical Review of Physical Foundations, *Engineering Geology*, 106: 26–39.
- Barnat-Hunek D., Smarzewski P., Suchorab Z., 2016, Effect of hydrophobisation on durability related properties of ceramic brick, *Construction and Building Materials*, 111 (2016): 275–285.
- Bhuyan H., Scheuermann A. Bodin D., Becker R., Soil moisture measurements using TDR along flat ribbon cable for estimating road performance, Conference: 12th ANZ conference, At Wellington, NZ
- Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., Victor J.M., 1974, High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture, *Proc. IEEE*, 62, 1, 93–98.
- Bittelli M., Flury M., 2009, Errors in water retention curves determined with pressure plates and their effect on soil hydraulic functions, *Soil Science Society of America Journal*, 73: 1453–1460.
- Blazy V., de Guardia A., Benoist J.C., Daumoin M., Guiziou F., Lemasle M., Wolbert D., Barrington S., 2015, Correlation of chemical composition and odor concentration for emissions from pig slaughterhouse sludge composting and storage, *Chemical Engineering Journal*, 276: 398–409.

- Blonquist J.M., Jones S.B., Robinson D.A., 2005, A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics, *Journal of Hydrology*, 314: 235–245.
- Bogacka E., Matkowski K., 2001, Wpływ grzybów na zdrowie ludzi, *Mikologia Lekarska*, 8 (3-4): 175–178.
- Börner T., Johnson M.G., Rygiewicz P.T., Tingey D.T., Jarrell G.D., 1996, A two-probe method for measuring water content of thin forest floor litter layers using time domain reflectometry, *Soil Technology*, 9: 199–207.
- Böttcher C.J.F., Bordewijk P., *Theory of Electric Polarization*, Vol. II - Dielectrics in Time-Dependent Fields, Elsevier, Netherlands, 1978.
- Bruggeman D.A.G., 1935, Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen, *Annalen der Physik*, 24: 636–664.
- Bryson, L. S., 2005, Evaluation of geotechnical parameters using electrical resistivity measurements, *Proc. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, GSP 133, Geo-Frontiers 2005, ASCE, Reston, VA*. 1–12.
- Calamita, G. Brocca, L., Perrone, A Piscitelli, S. Lapenna, V. Melone, F., Moramarco, T., 2012, Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites, *Journal of Hydrology*, 454-455, 101–112.
- Camino, M., León, F., Llorente, A., Olivar, J., 2014, Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture, *Materiales de Construcción*, 64(314).
- Campbell G.S., Campbell C.S., 2005, Water Content and Potential, Measurement, *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier Ltd., p.253–257.
- Canhoto O., Pinzari F, Fanelli C, Magan N., 2004, Application of electronic nose technology for the detection of fungal contamination in library paper, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54: 303–309.
- Carmeliet J., Roels S., 2002, Determination of the moisture capacity of porous building materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25:209–237.
- Černý R., Madera J., and Jiricková M., 2001, Computational design of interior thermal insulation systems, *Proc. 2nd Int. Conf. Advanced Engineering Design*, (Red. Smrcek L.), Univ. Glasgow, 425–430.
- Černý R., Pavlíkova M., Pavlík Z., Suchorab Z., Sobczuk H., 2009, Effect of Sensor Installation Method on the Applicability of TDR Moisture Measurement Technique, *Proceedings of the 8th International Conference on Electro-*

- magnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA 2009)*, June 1–5, Espoo, Finland, 113–117.
- Černý R., 2009, Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review, *Measurement* 42:329–336.
- Chabriac P.A., Fabbri A., Morel J.C., Laurent J.P., Blanc-Gonnet J., 2014, A Procedure to Measure the in-Situ Hygrothermal Behavior of Earth Walls, *Materials*, 7(4): 3002–3020.
- Chai T., Draxler R. R., 2014, Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geoscience Model Development*, 7:1247–1250.
- Chandra Mohan V.P., Talukdar P., 2010, Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53:4638–4650.
- Chelkowski A., *Fizyka dielektryków*. PWN, Warszawa, 1972.
- Chew M.Y.L., 2005, Defect analysis in wet areas of buildings, *Construction and Building Materials*, 19:165–173.
- Choi Ch., Song M., Kim D., Yu X., 2016, A New Non-Destructive TDR System Combined with a Piezoelectric Stack for Measuring Properties of Geomaterials, *Materials*, 9(6), 439:18p.
- Chomczyńska M., Suchorab Z., 2008, Application of the TDR Method for the Measurement of Moisture in Degraded Soil Enriched with Biona-312 Substrate, *Archives of Environmental Protection*, 34(3):125–131.
- Cresswell H.P., Green T.W., McKenzie N.J., 2008, The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention, *Soil Science Society of America Journal*, 72:41–49.
- Curtis H.L., Defandorf F.M., 1929, Dielectric constant and dielectric strength of elementary substances, pure inorganic compounds, and air. Washburn, E.D. (Red.), *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*, vol. 6. McGraw-Hill, New York, 73–107.
- Czajnik M., Lehnert Z., Lerczyński S., Ważny J., *Impregnacja i odgrzybianie w budownictwie*, Arkady, Warszawa 1970.
- Dalton F.N., 1992, Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. p. 143–167 (Red. Topp

- i in.), *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI.
- Damasceno V.M., Fratta D., Bosscher P.J., 2009, Development and validation of a low-cost electrical resistivity tomographer for soil process monitoring, *Canadian Geotechnical Journal*, 46(7): 842–854.
- Daniels, D. J., 1996, Surface-penetrating radar, *IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics*, Series 6: London, The Institute of Electrical Engineers, 320p.
- Davis J.L., Annan A.P., 1989, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 37:351–551.
- Davis, J.L., 1980, Electrical property measurements of sea ice in situ using a wide-band borehole radar and a time-domain reflectometer, *Proc. Int. Workshop Remote Estimation Sea Ice Thickness*, St. John's, Newfoundland 80–5, 155–187.
- De Loor G.P., 1968, Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water, *Journal of Microwave Power*, 3,2: 67–73.
- Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A., 1985, *Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: dielectric mixing models*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE-23, 35–46.
- Dudzińska M.R., Staszowska A., Południk B., 2009, Preliminary study of effect of furniture and finishing materials on formaldehyde concentration in office rooms, *Environment Protection Engineering*, 35(3):225–231.
- Dudzińska M.R., Staszowska A., Południk B., 2012, Ozone, limonene and formaldehyde concentrations in office spaces, *Proc. Healthy Building 2012*, Brisbane Australia, July 2012.
- Dutkiewicz J., Góny R.L., 2002, Biologiczne czynniki szkodliwe dla zdrowia - klasyfikacja i kryteria oceny narażenia, *Medycyna Pracy*, 53(1):29–39.
- Dyląg M., Bień M., 2006, Negatywne zjawiska związane z obecnością grzybów w pomieszczeniach zamkniętych, *Mikologia Lekarska*, 13(1):49–54.
- ETest, *Reference manual for LOM/RS/9/mps Laboratory Operated Meter for soil moisture, matric potential and salinity*.
- EA (European Cooperation for Accreditation, Europejska współpraca w dziedzinie akredytacji). *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*, Dokument EA-4/02, Główny Urząd Miar, 2001.
- ECA (European Concerted Action Indoor Air Quality & its Impact on Man) 1990, Environment and Quality of Life, Report No. 7 Indoor Air Pollution by

- Formaldehyde in European Countries, Community – COST Concentration Committee, Luxembourg.
- Eggleston P., Bush K., 2001, Environmental allergen avoidance: An overview, *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 107:403–405.
- Esfahani J.A., Vahidhosseini S.M., Barati E., 2015, Three-dimensional analytical solution for transport problem during convection drying using Green's function method (GFM), *Applied Thermal Engineering*, 85:264–277.
- Evelt S.R., 2003, Soil Water Measurement by Time Domain Reflectometry, (Red. Dekker M.) *Encyclopedia of Water Science*, Inc. New York, 894–898.
- Ferré, P.A., Knight, J.H., Rudolph, D.L., Kachanoski, R.G., 1998, The sample areas of conventional and alternative time domain reflectometry probes, *Water Resources Research*, 34:2971–2979.
- Fiala L., Pavlík Z., Jirickova M., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z., 2006, Measuring moisture content in cellular concrete using the time domain reflectometry method, *Proc. of 5th International Symposium on Humidity and Moisture, J. Brionizio, (Red. Huang P.), Rio de Janeiro 2006*, Paper No. 103.
- Fiala L., Pavlík Z., Jirickova M., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z., 2007, Application of homogenization techniques in TDR measurement of moisture content in building materials, (Red. Jirickowa M. i Zbysek Pavlík), *Computational and Experimental Analysis of Structure and Properties of New Building Materials from Nano- to Macrolevel III, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering*, 61–74.
- Fiala L., Pavlík Z., Suchorab Z., Sobczuk H., Černý R., 2008, Calibration of the TDR method and its application for measuring moisture content of building materials, *Computational and Experimental Analysis of Structure and Properties of New Building Materials from Nano- to Macrolevel VI*, 29–36.
- Franzoni E., Bandini S. Graziani G., 2014, Rising moisture, salts and electrokinetic effects in ancient masonries: From laboratory testing to on-site monitoring, *Journal of Cultural Heritage*, 15:112–120.
- Franzoni E., Bandini S., 2012, Spontaneous electrical effects in masonry affected by capillary water rise: The role of salts, *Construction and Building Materials* 35: 642–646, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.098.
- Franzoni E., Sandrolini F., Bandini S., 2011, An experimental fixture for continuous monitoring of electrical effects in moist masonry walls, *Construction and Building Materials*, 25:2023–2029.

- Frąc M., Jezierska-Tys S., Tys J., 2010, Populations of selected microbial and fungal species growing on the surface of rape seeds following treatment with desiccants or plant growth regulators, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 73:1230–1235.
- Gaczoł T., 2007, Wentylacja naturalna. Systemy nawiewu - wybrane przykłady, *Czasopismo techniczne A*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, 63-70.
- Gagg C.R., 2014, Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis, *Engineering Failure Analysis* 40:114–140.
- Gawin D., Kosny J., Desjarlais A., 2000, Effect of Moisture on Thermal Performance and Energy Efficiency of Buildings with Lightweight Concrete Walls, *Proc. 2000 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings "Efficiency & Sustainability"*, 3.149-3.160, Pacific Grove, California (USA), 20-25 August, 2000
- Globus A.M., Neuspina T.A., 2006, Determination of the Water Hysteresis and Specific Surface of Soils by Electronic Microhygrometry and Psychrometry, *Eurasian Soil Science*, 39(3):270–277.
- Gładyszewska-Fiedoruk K., 2011, Jak poprawić skuteczność wentylacji grawitacyjnej w typowym przedszkolu, *Energia i Budynek* 3(46).
- Goncharenko A.V., Lozovski V.Z., Venger E.F., 2000, Lichtenecker's equation: applicability and limitations, *Optics Communications*, 174:19–32.
- Guo H., Lee S.C., Chan L.Y., 2004, Indoor air quality investigation AT air-conditioned and non-air-conditioned markets in Hong Kong, *Science of the Total Environment*, 323:87–98.
- Guz Ł., Suchorab Z., Alcobia B., Sobczuk H., 2010, Wyznaczanie krzywej retencji wody materiałów porowatych za pomocą sond psychrometrycznych i TDR, *Society of Ecological Chemistry and Engineering, Proc. EcOpole*, 4(2): 371–375.
- Guz Ł., Suchorab Z., Sobczuk H., 2009, Kalibracja sond psychrometrycznych, *Society of Ecological Chemistry and Engineering, Proc. EcOpole*, 3(1): 133–138.
- Guz Ł., Suchorab Z., Sobczuk H., 2011, Modification of the Measurement Method of Relative Moisture Determination Using Peltier Probe, *Society of Ecological Chemistry and Engineering, Proc. EcOpole*, 5(1):51–56.
- Hansen E.J. de P., Hansen M.H., 2002a, TDR measurement of moisture content in aerated concrete, *Building Physics 2002, 6-th Nordic Symposium*, 381–388.

- Hansen M.H., Hansen E.J. de P., 2002b, Determination of liquid diffusivity using single point moisture content measurements and Boltzmann transformation, *Building Physics 2002, 6-th Nordic Symposium*, 389–396.
- Hassan, A.A., Toll D.G., 2014, Investigation of the directional dependence of soil resistivity in cracking clays, *Unsaturated Soils: Research & Applications*, 137, (Red. Khalili N., Russell A., Khoshghalb A.), Taylor & Francis Group, London.
- Häupl P., Grunewald J., Fechner H., 1999, Moisture behaviour of a “Gründerzeit“ – house by means of a capillary active calcium silicate inside insulation, *Proc. the Building Physics in the Nordic Countries*, pp. 225–232, Göteborg.
- Heinzow, B., 2011, Gesundheitliche Bedeutung von MVOC, *Umweltmed Forsch Prax Band*, 16.
- Hejmovaara T.J., de Water E., 1993, A computer controlled TDR system for measuring water content and bulk electrical conductivity of soils, *Rep. 41, Laboratory of Physical Geography and Soil Science*, University of Amsterdam, Amsterdam 1993.
- Hilhorst M.A., Dirksen C.E., 1994, Dielectric water content sensors: Time Domain versus Frequency Domain. *Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Evanston (Chicago) USA, United States Department of Interior Bureau of Mines, Special Publication SP19 94, 22–33.
- Hoła, J., Matkowski Z., Schabowicz K., 2007, Tomografia zawilgoconych murów ceglanych, *Czasopismo Techniczne B*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 73–81.
- Hoła J., Matkowski Z., Hoła A., 2009, Stan wilgotnościowy murów ceglanych zabytkowego kościoła, zalanych wodą podczas gaszenia pożaru, „*Fizyka Budowli*”, *Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Techniczno – Przyrodniczego w Bydgoszczy*, Bydgoszcz 2009, 19–25.
- Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K., Sikora J., Nita K. i Wójtowicz S., 2012, *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 31(6):1774–1792.
- Hudson D.B., Wierenga P.J., Hills R.G., 1996, Unsaturated hydraulic properties from upward flow into soil cores, *Soil Science Society of America Journal*, 60:388-396.
- Ito Y., Chikushi J., Miyamoto H., 2010, Multi-TDR probe designer for measuring soil moisture distribution near the soil surface, *World Congress of Soils Sci-*

- ence, *Soil Solutions for a Changing World*, 1–6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Jagjit S., Jagjit S. (Red.), 1994, *Building Mycology: Management of Decay and Health in Buildings*, Taylor & Francis.
- Janssen H., Scheffler G.A., Plagge R., 2016, Experimental study of dynamic effects in moisture transfer in building materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98:141–149.
- JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)
- Joekar-Niasar V., Hassanizadeh S.M., 2011, Effect of fluids properties on non-equilibrium capillarity effects: Dynamic pore-network modeling, *International Journal of Multiphase Flow*, 37(2):198–214.
- Jones S. B., Wraith J. M., Or D., 2002, Time domain reflectometry measurement principles and applications, *Hydrological Processes*, 16, 141–153.
- Jones S.B., Or D., 2003, Modeled effects on permittivity measurements of water content in high surface area porous media, *Physica B*, 338:284–290.
- Jones W.P., 2005, *Air Conditioning Engineering*, Fifth Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Ju S.H., Kung K.J.S., 1997, Mass types, element orders and solution schemes for the Richards equation, *Computers & Geosciences*, 23(2):175–187.
- Ju Z., Liu X., Ren T., Hu C., 2010, Measuring Soil Water Content With Time Domain Reflectometry: An Improved Calibration Considering Soil Bulk Density, *Soil Science*, 175(10):469–473.
- Kassem EA-R., 2005, *Measurements of moisture suction in hot mix asphalt mixes*, Texas A&M University.
- Kelley K.M., Stenson A.C., Dey R., Whelthon A.J., 2014, Release of drinking water contaminants and odor impacts caused by green building cross-linked polyethylene (PEX) plumbing systems, *Water Research*, 67:19–32.
- Knight J.H., 1992, Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content, *Water Resources Research*, 28:2345–2352.
- Kotowicz N., Frąc M., Lipiec J., 2014, The importance of Fusarium fungi in wheat cultivation – pathogenicity and mycotoxins production: a review, *Journal of Animal and Plant Sciences*, 21:3326–3343.

- Korhonen C.J., Janoo V.C., Berini C.M., 1997, Time-Domain Reflectometry of Water Content in Portland Cement Concrete, *Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report*, 97–27.
- Korjenic A., Bednar T., 2012, An analytical solution of a moisture transfer problem for coupled room and building component, *Energy and Buildings*, 47:254–259.
- Koronthalyova O., 2011, Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete, *Construction and Building Materials*, 25:879–885.
- Koronthalyova O., Matiasovsky P., 2002, Moisture dependant thermal conductivity analysis of the low density CSH based materials, *Building Physisc 2002 – 6th Nordic Symposium*, 515–522.
- Książek M., 2010, Mykologiczne skutki powodzi, cz. 1, *Dachy*, 12 (132)
- Książek M., 2011, Mykologiczne skutki powodzi, cz. 2, *Dachy*, 1(133)
- Kubik J., Wyrwał J., 2005, Podstawy fizyki materiałów budowlanych, (Red. Klemm P.) Budownictwo Ogólne, Tom 2, Fizyka Budowli, Arkady, Warszawa.
- Kuske M., Romain A., Nicolas J., 2005a, Microbial volatile organic compounds as indicators of fungi. Can an electronic nose detect fungi in indoor environments?, *Building and Environment*, 40:824–831.
- Kuske M., Rubio R., Romain A., Nicolas J., Marco S., 2005b. Fuzzy k-NN applied to moulds detection, *Sensors and Actuators B-Chemical*, 106:52–60.
- Lee J., Horton R., Jaynes D.B., 2000, A time domain reflectometry method to measure immobile water content and mass exchange coefficient, *Soil Science Society of America Journal*, 64:1911–1917.
- Lee J., Horton R., Noborio K., Jaynes D.B., 2001, Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe, *Journal of Contaminant Hydrology*, 51:131–144.
- Lichtenecker K., 1926, Die Dielektrizitaetskonstante natuerlicher und kuenstlicher Mischkoerper, *Physikalische Zeitschrift*, 27:115–158.
- Ling S., Gao T., Liu J., Li Y., Zhou J., Li J., Zhou C., Tu C., Han F., Ye X., 2010, The fabrication of an olfactory receptor neuron chip based on planar multi-electrode array and its odor-response analysis, *Biosensors and Bioelectronics*, 26 (3):1124–1128.
- Linnow K., Halsberghe L., Steiger M., 2007, Analysis of calcium acetate efflorescences formed on ceramic tiles in a museum environment, *Journal of Cultural Heritage*, 8(1):44–52.

- Lins Y., Schanz T., Fredlund D.G., 2009, Modified Pressure Plate Apparatus and Column Testing Device for Measuring SWCC of Sand, *Geotechnical Testing Journal*, 32(5):1–15.
- Litavcova E., Korjenic A., Korjenic S., Pavlus M., Sarhadov I., Seman J., Bednar T., 2014, Diffusion of moisture into building materials: A model for moisture transport, *Energy and Buildings*, 68 Part A:558–561.
- Livingston N.J., Topp G.C., 2006, Soil Water Potential, (Red. Carter M.R., Gregorich E.G.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition, Canadian Society of Soil Science, 2006, Taylor & Francis Group, LLC.
- Lu Xiaoshu, 2002, Modelling of heat and moisture transfer in buildings. I. Model program, *Energy and Buildings* 34:1033–1043.
- Lubelli B., van Hees R.P.J., Brocken H.J.P., 2004, Experimental research on hygroscopic behaviour of porous specimens contaminated with salts, *Construction and Building Materials*, 18: 339–348.
- Macieik L., 2008, Kominy i wentylacja grawitacyjna w budynku, *Instalacje* 3/2008.
- Malicki M.A., Campbell E.C., Hanks R.J., 1989, Investigation on power factor of the soil electrical impedance as related to moisture, salinity and bulk density, *Irrigation Science*, 10:55–62.
- Malicki M.A., Hanks R.J., 1989, Interfacial contribution to two electrode soil moisture sensor readings, *Irrigation Science*, 10:41–54.
- Malicki M.A., Plagge R., Renger M., Walczak R.T., 1992, Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed cores, *Irrigation Science*, 13:65–72.
- Malicki M.A., Skierucha W.M., 1989, A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulse, *Irrigation Science*, 10(2):153–163.
- Malicki, M. A., Plagge, R., Roth, C.H., 1996, Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil, *European Journal of Soil Science*, 47:357–366.
- Mallants D., Jacques D., Tseng P-H., van Genuchten M. Th., Feyen J, 1997, Comparison of three hydraulic property measurement methods, *Journal of Hydrology*, 199:295–318.

- Mastrorilli M., Katerji N., Rana G., Nouna B.B., 1998, Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 90:81–89.
- Matsumoto M., Hokoi S., Hatano M., 2001, Model for simulation of freezing and thawing processes in building materials, *Building and Environment*, 36(6):733–742.
- Maxwell Garnett J.C., 1904, Colours in metal gases and metal films, *Transactions of the Royal Society (London)* 203:385–420.
- Mohamed A.M.O., 2006, *Principles and Applications of Time Domain Electrometry in Geoenvironmental Engineering*, CRC Press.
- Mojid M.A., Cho H., 2002, Response of the core and shield rod soft time-domain reflectometry probe to transverse soil-water content heterogeneity, *Journal of Hydrology*, 262:21–27.
- Molhave, L., 1991, Volatile organic compounds, air quality and health, *Indoor Air*, 1:357–376.
- Molhave, L., Nielsen G. D., 1992, Interpretation and limitations of the concept "Total Volatile Organic Compounds" (TVOC) as an indicator of human responses to exposures of volatile organic compounds (VOC) in indoor air, *Indoor Air* 2:65–77.
- Morath S., Hung R., Bennett J., 2012, Fungal volatile organic compounds: A review with emphasis on their biotechnological potential, *Fungal Biology Reviews*, 26:73–83.
- Moret D., Lopez M.V., Arrue J.L., 2004, TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers, *Journal of Hydrology*, 297:229–235.
- Morillas H., Maguregui M., Trebolazabala J., Madariaga J.M., 2015, Nature and origin of white efflorescence on bricks, artificial stones, and joint mortars of modern houses evaluated by portable Raman spectroscopy and laboratory analyses, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 136B:1195–1230.
- Mualem Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12:513–522.
- Mudarri D., Fisk, W.J., 2007, Public Health and Economic Impact of Dampness and Mold, *Indoor Air*, 17(3):226–235.
- Najm M.R.A., Mohtar R.H., Drnevich V.P., Braudeau E., 2008, Improving TDR Measurements through Accounting for Soil Shrinkage Properties, *ASABE An-*

- nual International Meeting Sponsored by ASABE Rhode Island Convention Center Providence, Rhode Island June 29 – July 2, 2008.*
- Nantka M.B., 2011, Warunki wewnętrzne w budynku wielorodzinnym z wentylacją naturalną (cz. 1), *Rynek Instalacyjny* 6.
- Nasraoui M., Nowik W., Lubelli B., 2009, A comparative study of hygroscopic moisture content, electrical conductivity and ion chromatography for salt assessment in plasters of historical buildings, *Construction and Building Materials*, 23:1731–1735.
- Nilsson L.O., 1980, *Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements and related material properties, Division of Building Materials*, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1980.
- Nissen H.H., Moldrup P., 1995, Theoretical background for the TDR methodology. P Report No. 11. *Danish Institute of Plant and Soil Science, Lyngby*, 9-23.
- Nissen H.H., Moldrup P., Henriksen K., 1998, Time Domain Reflectometry Measurements of Nitrate Transport in Manure-Amended Soil, *Soil Science Society of America Journal*, 62:99–109.
- Noborio K., Horton, R., Tan, C.S., 1999, Time Domain Reflectometry Probe for Simultaneous Measurement of Soil Matric Potential and Water Content, *Soil Science Society of America Journal*, 63:1500-1505.
- Noborio K., 2001, Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 31:213–237.
- O'Connor K.M., Dowding C.H., 1999, *Geomeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes*, CRC Press, 1999.
- Ochsner T.E., Horton R., Ren T., 2001, Simultaneous Water Content, Air-Filled Porosity, and Bulk Density Measurements with Thermo-Time Domain Reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 65:1618–1622.
- Oliver A., 1997, *Dampness in buildings*. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK.
- Ościk J., 1973, *Adsorpcja*, PWN, Warszawa.
- Page M.C., Braver S.L., MacKinnon D.P., 2003, *Levine's Guide to SPSS for Analysis of Variance*, 2nd Edition, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, NJ, USA.
- Parczewski W., 1977, *Materiały budowlane*, PWN, Warszawa.
- Pasanen A-L., Kalliokoski P., Jantunen M., 1994, Recent studies of fungal growth on building materials, *Health Implications of Fungi in Indoor Environments*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 485–493.

- Pavlík Z., Černý R., 2004, Application of TDR measurement technology for construction materials in semi-scale experiments, *International Agrophysics*, 18:249–252.
- Pavlík Z., Černý R., 2005, Semi-scale testing of hygric performance multilayered systems of porous materials using the TDR measuring technology, *Proc. Monitoring and Modelling the Properties of Soil as Porous Medium, Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences*, Lublin 2005, 109–126.
- Pavlík Z., Fiala L., Černý R., 2005, TDR calibration functions of hygroscopic materials, *Review of Current Problems in Agrophysics, Polish Academy of Sciences*, 303–308.
- Pavlík Z., Fiala L., Sobczuk H., Suchorab Z., Černý R., 2006a, Application of TDR method for determination of moisture content in calcium silicate, *Proc. Trwałość materiałów i konstrukcji budowlanych, Kamień Śląski*, 21–22.06.2006, 4 str., Katedra Fizyki Materiałów I Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa – Politechnika w Ostrawie, Komisja Inżynierii Budowlanej – o/PAN w Katowicach.
- Pavlík Z., Jirickova M., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z., 2006b, Determination of Moisture Diffusivity using the Time Domain Reflectometry (TDR) Method, *Journal of Building Physics*, 30(1):59–70.
- Pavlík Z., Fiala L., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z., 2006c, Application of TDR Method for Determination of Moisture Content in Calcium Silicate, *Roczniki Inżynierii Budowlanej*, 6(1):97–100.
- Pavlík Z., Michálek P., Černý R., 2006d, Experimental Assessment of Hygrothermal Performance of a Building Envelope with Hydrophilic Mineral Wool Thermal Insulation in Semi-Scale Conditions, *Roczniki Inżynierii Budowlanej*, 6(1):101–104.
- Pavlík Z., Pavlíková M., Fiala L., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z., 2007a, Application of Time-Domain Reflectometry Method for Measuring Moisture Content in Porous Building Materials, *Trends in Applied Sciences Research*, 2(3):188–200.
- Pavlík Z., Fiala L., Pavlíková M., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z., 2007b, Calibration of the Time Domain Reflectometry Method for Measuring Moisture Content in AAC of Various Bulk Densities, *Proc. ISEMA 2007. Hamamatsu: Shizuoka University*, 151–158.

- Pavlík Z., Fiala L., Černý R., 2008, Determination of Moisture Content of Hygroscopic Building Materials Using Time Domain Reflectometry, *Journal of Applied Sciences*, 8(9):1732–1737.
- Pavlík Z., Suchorab Z., Sobczuk H., 2009, Two-Rods Sensor Installation Method and Its Effect on Applicability of TDR Method for Moisture and Salt Concentration Measurement, *Proc. 18th Annual CTU University-Wide Seminar, Special Issue, Part A*, February 2009, 13:58–59.
- Pavlík Z., Mihulka J., Fiala L., Černý R., 2012, Application of time-domain reflectometry for measurement of moisture profiles in a drying experiment, *International Journal of Thermophysics*, 33:1661–1673.
- Pełech A., *Wentylacja i klimatyzacja, Podstawy*, Wyd. Politechnika Wrocławska, 2011.
- Perrson M., Berndtsson R., 1998, Noninvasive Water Content and Electrical Conductivity Laboratory Measurements using Time Domain Reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 62:1471–1476.
- Piotrowska M., Żakowska Z., Gliścińska A., Bogusławska-Kozłowska J., 2001, Rola mikroflory powietrza zewnętrznego w kształtowaniu bioarozulu grzybowego pomieszczeń zamkniętych, *II konferencja naukowa "Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych"*, 30–31 maja 2001, Politechnika Łódzka, Łódź.
- Piotrowska M., Żakowska Z., 2011, Wilgotność w budynku, *Tynki*, 4: 18-20.
- Piotrowski J (red.), *Pomiary, czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- Plagge R., Roth C.H., Renger M., 1996, Dielectric soil water content determination using time-domain reflectometry (TDR), *Proc. of Second Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (Ed. A. Kraszewski)*, IEEE Microwave Theory and Techniques Society, San Francisco 1996, 59–62.
- Plagge R., Scheffler G., Grunewald J., 2005, Automatic measurement of water uptake coefficient of building materials, *Proc. 7th Nordic Building Physics Symposium in Reykjavik*, 13-15 June 2005, 15–22.
- Polder D., van Santen, 1946, The effective permeability of mixtures of solids, *Physica*, 12:257–271.

- Połodnik B., Dudzińska M.R., 2011a, The impact of the room occupation and the indoor air parameters on the aerosol particle concentration in classrooms, *Proc. Indoor Air 2011*, 5–10 June 2011, Austin TX – Paper ID 1081.
- Połodnik B., Dudzińska M.R., 2011b, Thermal conditions and aerosol particle number concentration in a lecture room, *In: Management of Indoor Air Quality*, CRC Press, London, 2011, 101–107.
- Ponizovsky A.A., Chudinova S.M., Pachepsky Y.A., 1999, Performance of TDR calibration models as affected by soil texture, *Journal of Hydrology*, 218: 35–43.
- Quinones H., Ruelle P., 2001, Operative Calibration Methodology of a TDR Sensor for Soil Moisture Monitoring under Irrigated Crops, *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2(1):31–45.
- Raczkowski A., Dumala S., Skwarczyński M., 2011, *Układy wentylacji, klimatyzacji i chłodnictwa*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, vol. 77.
- Rayleigh L., 1892, On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of the medium, *Philosophical Magazine*, 34:481–502.
- Ren T., Noborio K., Horton R., 1999, Measuring Soil Water Content, Electrical Conductivity, and Thermal Properties with a Thermo-Time Domain Reflectometry Probe, *Soil Science Society of America Journal*, 63:450–457.
- Reynolds W.D., Topp G.C., 2006, Soil Water Desorption and Imbibition: Psychrometry, *In: Carter M.R., Gregorich E.G. (ed.), Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition*, Canadian Society of Soil Science, Taylor & Francis Group, LLC.
- Richards L.A., Ogata G., 1961, Psychrometric measurements of soil samples equilibrated on pressure membranes, *Proc. Soil Science Society of America*, 25: 456–459.
- Rirsch E., Zhang Z., 2010, Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties, *Construction and Building Materials* 24:1815–1820.
- Robinson D.A., Gardner C.M.K., Cooper J.D., 1999, 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*, 223:198–211.
- Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., Friedman S.P., 2003, A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry, *Vadose Zone Journal*, 2:444–475.

- Roth K., Schulin R., Flübler H., Attinger W., 1990, Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resources Research*, 26:2267–2273.
- Rozej A., Polednik B., Dudzińska M., 2008, Microbiological quality of air in the new auditorium. *Proc. XII International Conference on Air Conditioning Air Protection & District Heating*, Wrocław, 373–378.
- Salonen H., Pasanen A-L., Lappalainen S., Riuttala H., Tuomi T., Pasanen P., Back B., Reijula K., 2009a, Volatile organic compounds and formaldehyde as explaining factors for sensory irritation in office environments, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(4):239–47.
- Salonen H., Pasanen A-L., Lappalainen S., Riuttala H., Tuomi T., Pasanen P., Back B., Reijula K., 2009b, Airborne concentrations of volatile organic compounds, formaldehyde and ammonia in Finnish office buildings with suspected indoor air problems, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(3), 200–9.
- Samson R.A., Flanningan B., Verhoeff A.P., Adan O.C.G., Hoekstra E.S., 1994, *Health Implications of Fungi in Indoor Environments*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 529-538.
- Schapp M.G., de Lange L., Heimovara T.J., 1996, TDR calibration of organic forest floor media, *Soil Technology*, 11:205–217.
- Scheffler G., Plagge R., 2007, *Determination of Instantaneous Moisture Content and Moisture Potential Profiles*, University of Technology, Dresden, AHSRAE.
- Scheffler G.A., 2008, Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage, *National German Foundation CUSANUSWERK*.
- Selker, J.S., Graff, L., Steenhuis, T., 1993, Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe, *Soil Science Society of America Journal*, 57:934–936.
- Shao M., Horton R., 1998, Integral method for estimating soil hydraulic properties, *Soil Science Society of America Journal*, 62(3): 585–592.
- Shargatov V.A., Il'ichev A.T., Tsyarkin G.G., 2015, Dynamics and stability of moving fronts of water evaporation in a porous medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83:552–561.
- Skierucha W., 2000, Accuracy of Soil Moisture Measurement by TDR Technique, *International Agrophysics*, 14:417-426.

- Skierucha W., Malicki M.A., 2004, *TDR Method for the Measurement of Water Content and Salinity of Porous Media*, Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin.
- Skierucha W., Wilczek A., Alokina O., 2008, Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements, *Sensors and Actuators A*, 147:544–552.
- Skierucha W., 2005, *Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną*, Acta Agrophysica PAN, Rozprawy i monografie.
- Skierucha, W., Wilczek A., 2010, A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range, *Sensors*, 10(4):3314–3329.
- Skierucha, W., Wilczek A., Szyłowska A., Sławiński C. and Lamorski K., 2012, A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity, *Sensors*, 12(10):13545–66.
- Sobczuk H., 2008, *Sonda do pomiaru wilgotności ośrodków porowatych, zwłaszcza materiałów budowlanych*, patent nr 198492 B1 z dnia 30.06.2008.
- Sobczuk H., Plagge R., 2007, *Time Domain Reflectometry Method in Environmental Measurements*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, vol. 39, Lublin.
- Sobczuk, H., Suchorab, Z., 2005, Calibration of TDR Instruments for Moisture Measurement of Aerated Concrete. In Skierucha, W. and Walczak, T. (Red.) *Monitoring And Modelling the Properties of Soil as Porous Medium*, Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin, 156-165.
- Sobczuk H., Suchorab Z., 2011a, *Sonda do pomiaru wilgotności przegród budowlanych, zwłaszcza o chropowatych powierzchniach*, Patent 211295 z dnia 2.09.2011.
- Sobczuk H., Suchorab Z., 2011b, *Sonda do pomiaru wilgotności, zwłaszcza elementów o powierzchniach wypukłych*, Patent 211294 z dnia 2.09.2011.
- Sobczuk H., Suchorab Z., 2011c, *Sonda do pomiaru wilgotności, zwłaszcza elementów o zakrzywionych powierzchniach*, Patent 211296 z dnia 3.11.2011.
- Solecki G., Wilczek A., Szyłowska A., Nakonieczna A., Paszkowski B., Skierucha W., 2013, Selected issues of the TDR based measurement of the soil apparent dielectric permittivity oriented to the evaluation of soil moisture, *VI International Scientific Symposium "Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture"*, Lublin, Poland, 169–173.

- Soncela R. Sampaio S., Vilas Boas M.A., Tavares M.H.F, Smanhotto A., 2013, Construction and calibration of TDR probes for volumetric water content estimation in a Distroferric Red Latosol, *Engenharia Agrícola*, 33(5):919–928.
- Spalitańska K., Wróbel K., Suchorab Z., 2007, Kalibracja metody pomiarowej TDR do wyznaczania wilgotności cegły ceramicznej pełnej, *Proc. Problemy Inżynierii Środowiska, XXVII Międzynarodowe Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA 2007*, 148–154.
- Staszowska A., Dudzińska M.R., 2011, Degradation of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Indoor Air by Ozone, *ICCE 2011, Zurich, September 2011*, 350.
- Staszowska A., Dudzińska M.R., 2008, Polibromowane etery difenylowe (PBDE) w pomieszczeniach na stały i czasowy pobyt ludzi - źródła, poziomy, przemiany, *Problemy Jakości Powietrza Wewnętrznego w Polsce* (Red. J. Sowa i M. Mijakowski), Wyd. WIŚ PW, Warszawa 2008
- Stefańczyk B. (red), 2005, *Budownictwo ogólne, tom 1, materiały i wyroby budowlane*, Arkady, Warszawa 2005.
- Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H., 2005a, Adaptation of reflectometric techniques for moisture measurement of rock walls on the example of Janowiec Castle, *Proc. City of Tomorrow and Cultural Heritage, Pomerania Outlook, International Workshop*, December 08-09, 2005, Gdańsk, Poland (I): 71–74.
- Suchorab Z., Sobczuk H., Łagód G., Pavlik Z., Černý R., 2005b, Zastosowanie metody TDR do pomiaru wilgotności materiałów budowlanych, materiały, tom 2, *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, 33:1063–1070.
- Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H., 2008, Pomiary wilgotności murów z kazimierskiej opoki wapiastej przy zastosowaniu metody TDR, *Budownictwo i Architektura*, 2(1):125–140.
- Suchorab Z., Deneka B., Łagód G., Sobczuk H., 2009a, Możliwość pomiaru zasolenia w materiałach budowlanych za pomocą metody TDR, *Society of Ecological Chemistry and Engineering, Proceedings of EcOpole*, 3(1):199–205.
- Suchorab Z., Jarmuła M., Sobczuk H., Pavlík Z., Černý R., 2009b, Zastosowanie metody TDR do pomiaru podciągania kapilarnego w ścianie modelowej z cegły ceramicznej pełnej, *Society of Ecological Chemistry and Engineering, Proceedings of EcOpole*, 3(1):207–213.
- Suchorab Z., Sobczuk H., Rożej A., Łagód G., 2009c, Comparison of Reflectometric and Gravimetric Methods for Examination of Sewage Sludge Addi-

- tions Influence on Water Properties of Reclamated Soils, *Ecological Chemistry and Engineering*, 16(4):257–264.
- Suchorab Z., Sobczuk H., 2009, Dielectric properties of building materials, *Proc. Thermophysics 2009*, Valtice 29–30.10.2009, Czech Republic, 138–146.
- Suchorab Z., Sobczuk H., Skwarczyński M., 2010a, Determination of red brick conductivity coefficient depending on moisture, *Proc. Thermophysics 2010*, Valtice 5–7.11.2010, Czech Republic, 283–289.
- Suchorab Z., Widomski M., Łagód G., Sobczuk H., 2010b, Capillary rise phenomenon in aerated concrete. Monitoring and simulations, *Proceedings of ECOpole*, 4(2):285–290.
- Suchorab Z., Barnat-Hunek D., 2011a, Badania podciągania kapilarnego wody przez płyty wapienno-krzemianowe z wykorzystaniem technik reflektometrycznych TDR, *Materiały Budowlane - technologie - rynek - wykonawstwo*, 6 (466):74–75.
- Suchorab Z., Barnat-Hunek D., 2011b, Sondy powierzchniowe TDR w bezinwazyjnych pomiarach wilgoci obiektów zabytkowych. *Karta Krakowska 2000 10 lat później. Monografia 400 Seria Architektura*. Politechnika Krakowska, Kraków, 283–293.
- Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H., 2011a, Influence of Moisture on Heat Conductivity of Aerated Concrete, *Ecological Chemistry and Engineering S*, 18(1):111–120.
- Suchorab Z., Sobczuk H., Pavlik Z., 2011b, Examination of Capillary Rise Phenomenon in Aerated Concrete Using The Surface TDR Probe, *Proceedings of ECOpole*, 5(1):115-120.
- Suchorab Z., Sobczuk H., Żelazna A., 2011c, Water Content Measurement of Building Materials Using Surface TDR Probe, *Ecological Chemistry and Engineering A*, 18(7):877–886.
- Suchorab Z., 2011, Pomiary terenowe wilgotności murów z wykorzystaniem powierzchniowych sond TDR, *Materiały Budowlane - technologie - rynek - wykonawstwo*, 4 (464):22–24.
- Suchorab Z., Widomski M., 2011, Determination of Salinity Changes in Building Materials Using Electric Methods, *Proceedings of ECOpole*, 5(1):121-126.
- Suchorab Z., 2012, In-situ Measurements of Moisture Using Surface TDR Probes, *Annual Set The Environment Protection*, 14:107–122.

- Suchorab Z., Fic S., Barnat-Hunek D., 2013, Ocena zjawiska podciągania kapilarnego w murze budynku o charakterze zabytkowym za pomocą powierzchniowej sondy TDR, *Budownictwo i Architektura*, 12(4):83–93.
- Suchorab Z., 2013a, Laboratory measurements of moisture in a model red-brick wall using the surface TDR probe, *Proceedings of ECOpole*, 7(1):171–176.
- Suchorab Z., 2013b, Noninvasive moisture measurement in building materials, *Environmental Engineering IV (Red.) Pawłowski, Dudzińska & Pawłowski*, Taylor & Francis Group, London, 433–439.
- Suchorab Z., Zarzeka-Raczkowska E., 2013, Determination of saturated water conductivity coefficient in building materials, *Modern materials, installations and construction technologies (Red.) Fic S.* - Biała Podlaska: Wydawnictwo PSW JPII, 192–197.
- Suchorab Z., Guz. Ł., Łagód G., Sobczuk H., 2015, The Possibility of Building Classification for Mould Threat Using Gas Sensors Array, *Advanced Materials Research*, 1126:161–168.
- Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Franus M., Łagód G., 2016, Mechanical and Physical Properties of Hydrophobized Lightweight Aggregate Concrete with Sewage Sludge, *Materials*, 2016, 9(5):317.
- Szymański E., 1997, *Materialoznawstwo budowlane*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- Śliwowski L., 1982, *Komfort cieplny ludzi w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych*, Wyd. Politechnika Warszawska.
- Tang S.B., Yu Q.L., Li H., Yu C.Y., Bao C.Y., Tang C.A., 2013, Mesomechanical model of moisture diffusion and shrinkage cracking in building material – Model development, *Construction and Building Materials*, 47:511–5.
- Tinga W.R., Voss W.A.G., Blossey D.F., 1973, Generalized approach to multiphase dielectric mixture theory, *Journal of Applied Physics*, 44:3897–3902.
- Toll D.G., Hassan A.A., King J.M., Asquith J.D., 2013, New devices for water content measurement, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 1199–1202.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16:574–582.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 2003, The Early Development of TDR for Soil Measurements, *Vadose Zone Journal*, 2:492–499.

- Topp G.C., Davis J.L., Annan P., 1982, Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients, *Soil Science Society of America Journal*, 46:672–678.
- Topp G.C., Reynolds W.D., 1998, Time Domain Reflectometry: a seminar technique for measuring mass and energy in soil. *Soil & Tillage Research*, 47:125–132.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Bailey, W.G., Zebchuk, W.D., 1984, The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe, *Canadian Journal of Soil Science*, 64:313–321.
- Trochonowicz M., 2010, Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych, *Budownictwo i Architektura*, 7:131–144.
- Turski R., Malicki M.A., 1974, A precise laboratory meter of a dielectric constant of soil of a different moisture, *Polish Journal of Soil Science*, 7:71–79.
- Udawatta R.P., Anderson S.H., Motavalli P.P., Garrett H.E., 2011, Calibration of a water content reflectometer and soil water dynamics for an agroforestry practice, *Agroforest Systems*, 82(1):61–75.
- Van Belleghema M., Steeman M., Janssens A., De Paepe M., 2014, Drying behaviour of calcium silicate, *Construction and Building Materials*, 65: 507–517.
- Van Genuchten T.Th., 1980, A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44:892–898.
- Viitanen, H., 2001, Biodegradation of cultural heritage state of the art, Finland. *ARIADNE Proceedings*, Prague.
- Voutilainen J., 2005, Methods and Instrumentation for Measuring Moisture in Building Structures, *Helsinki University of Technology Applied Electronics Laboratory, Series E: Electronic Publication E7*, Espoo, Finland.
- Wardeh G. Perrin B., 2008, Freezing–thawing phenomena in fired clay materials and consequences on their durability, *Construction and Building Materials*, 22 (5):820–828.
- Wargocki P., 2005, Measurements of Perceived Indoor Air Quality, *Energy Efficient Technologies in Indoor Environment*, Politechnika Śląska, Gliwice.
- Ważny J., Karyś J. (Red), 2001, *Ochrona budynków przed korozją biologiczną*, Arkady, Warszawa.
- Wątroba J., 2002, *Wprowadzenie do analizy wariancji*, StatSoft Polska Sp. z o.o..

- Whalley W.R., 1993, Consideration on the use of Time Domain Reflectometry (TDR) for measuring soil water content, *European Journal of Soil Science*, 44(1):1–9.
- Wiener O., 1912, Die Theorie des Mischkoerpers fuer das Feld der stationaeren Stroemung, *Abandlungen der Mathematischen-Physischen Klasse der Koeniglichen Saechsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, 32:509–604.
- Wilczek A., Szyplowska A., Nosalewicz A., Skierucha W., Wilczek W., 2013, Project of an automatic system for soil moisture regulation using TDR technique, *VI International Scientific Symposium "Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture"*, Lublin, Poland, 197–200.
- Wilkins K., Larsen K., Simkus M., 2000, Volatile metabolites from mold growth on building materials and synthetic media, *Chemosphere*, 41:437–446.
- Williams R., 2002, Overview of the project to determine the thermal resistance of masonry walls in dry and moist states and a conversion procedure to determine the appropriate design value, *Building Physisc 2002 – 6th Nordic Symposium*, 539–546.
- Williams L.J., Abdi H., 2010, Fisher's Least Significant Difference (LSD) Test, In Neil Salkind (Red.), *Encyclopedia of Research Design*. Thousand Oaks, CA, USA. Sage.
- Wiszniewska M., Walusiak J., Guntarowska B., Żakowska Z., Pałczyński C., 2004, Grzyby pleśniowe w środowisku komunalnym i w miejscu pracy - istotne zagrożenia zdrowotne, *Medycyna Pracy*, 55(3):257–266.
- Wit K.E., 1967, *Aparatus for measuring hydraulic conductivity of undisturbed soil samples*, Inst. For Land and Water Management Reearch Tech. Publ., 52, Wageningen.
- Wraith J.M., Robinson D.A., Jones S.B. and Long D.S., 2005, Spatially characterizing apparent electrical conductivity and water content of surface soils with time domain reflectometry, *Computers and Electronics in Agriculture*, 46:239–261.
- Wróbel K., Spalitać K., Suchorab Z., Możliwość pomiaru wilgotności cegły ceramicznej pełnej z zastosowaniem metody TDR, *Problemy Inżynierii Środowiska, XXVII Międzynarodowe Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA 2007*, 159–164.
- Wu S.Y., Zhou Q.Y., Wang G., Yang L., Ling C.P., 2010, The relationship between electrical capacitance-based dielectric constant and soil water content, *Environmental Earth Sciences*, 62(5):999–1011.

- Yanful E.K., Mousavi M., Yang M., 2003, Modeling and measurement of evaporation in moisture-retaining soil covers, *Advances in Environmental Research*, 7: 783–801.
- Zaradny H., 1990, *Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach*, Prace IBW PAN nr 23, Gdańsk
- Zawadzki S., Olszta W., 1981, Zmodyfikowany aparat Wita do laboratoryjnego oznaczania przepuszczalności wodnej gleb, *Wiadomości IMUZ*, XIV(2): 187–194.
- Zegelin S.J., White I., Russell G.F., 1992, A critique of the time domain reflectometry for determining field soil-water content, (*Red. Topp i in.*). *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI, 187–208.
- Zegelin, S.J., White I., Kenkins D.J., 1989, Improved field probe for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry, *Water Resources Research*, 25:2367–2376.
- Żukiewicz-Sobczak W., Sobczak P., Imbor K., Krasowska E., Zwoliński J., Horoch A., Wojtyła A., Piątek J., 2012, Zagrożenia grzybowe w budynkach i w mieszkaniach – wpływ na organizm człowieka, *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu*, 18(2):141–146.
- Zyska B., 1999, *Zagrożenia biologiczne w budynku*, Arkady, Warszawa.

Źródła internetowe:

- www.pibp.pl, Polski Instytut Budownictwa Pasywnego i Energii Odnawialnej imienia Güntera Schlagowskiego Sp. z o.o., październik 2016.
- www.r-project.org, The R Project for Statistical Computing październik 2016.
- www.statsoft.pl, StatSoft Polska, październik 2016.
- www.matweb.com, MatWeb Material Property Data, październik 2016.

Akty prawne:

Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.

Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).

PN-82-/B-02020 „Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia.

PN-EN ISO 12571:2013-12 „Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych - Określanie właściwości sorpcyjnych”.

PN-EN 1936:2010 „Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości”.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690).

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2008 nr 201 poz. 1240).

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2013 poz. 926).