

Zbigniew SUCHORAB<sup>1</sup>, Bartłomiej DENEKA<sup>1</sup>, Grzegorz ŁAGÓD<sup>1</sup> i Henryk SOBCZUK<sup>2</sup>

## MOŻLIWOŚĆ POMIARU ZASOLENIA W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH ZA POMOCĄ METODY TDR

### POSSIBILITY OF SALINITY DETERMINATION IN BUILDING MATERIALS USING TDR METHOD

**Abstrakt:** Zasolenie przegród budowlanych to powszechny problem wielu obiektów, a w szczególności historycznych. Jony soli przemieszczające się z wodą w przegrodach budowlanych są przyczyną ich zniszczenia. W dużych stężeniach krystalizują wewnątrz porów struktury materiału budowlanego i niszczą ją. Są również bardzo uciążliwe przy renowacjach obiektów zabytkowych ze względu na niekorzystny wpływ na zewnętrzne tynki elewacyjne. Możliwość pomiaru zasolenia przegród budowlanych daje informację na temat stężenia jonów w danym materiale i umożliwia dobór właściwej metody renowacyjnej z punktu widzenia istniejącego problemu. Praca przedstawia metodę TDR jako alternatywę w wyznaczaniu zasolenia przegród budowlanych. Udoskonalenie tej metody dałoby możliwość wyznaczania dwóch parametrów (wilgotności i zasolenia) w jednym kroku pomiarowym. Przedstawiono kalibrację oraz analizę przebiegu echa impulsu elektromagnetycznego przebiegającego w przegrodach budowlanych o różnej wilgotności i różnym zasoleniu.

**Słowa kluczowe:** przegrody budowlane, woda, zasolenie, TDR

Wiele obiektów budowlanych zarówno historycznych, jak i tych współcześnie wznoszonych dotkniętych jest problemem nadmiernego zawilgocenia przegród zewnętrznych. Jest ono wywołane wieloma czynnikami, do których zaliczamy w szczególności kapilarno-porowatą strukturę materiałów budowlanych zarówno naturalnych (takich jak kamienie), jak i wytwarzanych przez człowieka (cegła, beton komórkowy, materiały termoizolacyjne). Powoduje to, że przegrody budowlane wchłaniają wodę pochodzącą z gruntu, opadów i ewentualnie awarii instalacji sanitarnych.

Woda ta jest przyczyną wielu problemów eksploatacyjnych obiektów. Jednym z nich jest to, że jest ona znakomitym rozpuszczalnikiem soli, które często podciągane z gruntu lub pochodzące z wód opadowych (kwaśnych deszczy) są przyczyną niszczenia struktury materiału, a w szczególności zewnętrznych powłok tynkarskich.

W czasie eksploatacji obiektu dotkniętego problemem zawilgocenia stężenie soli w przegrodach stopniowo wzrasta na skutek migracji roztworu i odparowania wody. Ciągły wzrost stężenia soli powoduje ich krystalizację wewnątrz porowatej struktury materiału budowlanego, w rezultacie czego zmienia się jego porowata struktura. Problem ten dotyczy szczególnie zewnętrznych warstw przegród budowlanych, gdzie woda najszybciej odparowuje i w związku z tym krystalizacja postępuje najszybciej. Wówczas kryształki soli mogą, zwiększając swoją objętość, rozsadać materiały budowlane, obniżając ich parametry wytrzymałościowe oraz termoizolacyjne. Jest to widoczne na wielu obiektach, nawet współcześnie modernizowanych, gdzie już nawet po kilku latach widać wyraźną destrukcję i odpadanie tynków zewnętrznych. Na zewnętrznych powierzchniach wielu

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 081 538 43 22, email: Z.Suchorab@wis.pol.lublin.pl, bartden20@o2.pl, G.Lagod@wis.pol.lublin.pl

<sup>2</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 081 538 44 81, email: H.Sobczuk@wis.pol.lublin.pl

nieotynkowanych murów z cegły ceramicznej również pojawiają się jasne wykwitki soli pochodzące z zaprawy murarskiej bądź podciągane kapilarnie z gruntu.

Powyżej wymienione problemy eksploatacyjne dowodzą istoty problemu, jakim jest nadmierne zasolenie przegród budowlanych. W celu podjęcia próby naprawy takich obiektów duże znaczenie mają zarówno pomiary stężenia soli w poszczególnych warstwach przegrody, jak i możliwość śledzenia ich zmian - monitoring.

Do najbardziej precyzyjnych metod zaliczamy metody analizy chemicznej wykonywanej w laboratoriach. Ich największymi zaletami są precyzja pomiaru oraz możliwość jakościowej oceny rozpuszczonych w przegrodzie soli. Do najważniejszych wad limitujących zastosowanie bezpośrednich, chemicznych metod detekcji soli w przegrodach budowlanych zaliczamy ich inwazyjność (konieczność pobrania próbek z badanego obiektu, wiążącą się z jego niszczeniem) oraz długi czas wykonywania pomiaru.

Metody pośrednie są mniej precyzyjne i w badaniach *in-situ* nie umożliwiają jakościowej oceny zasolenia przegród. Cechuje je jednak stosunkowo niewielka inwazyjność lub w niektórych rozwiązaniach zupełny jej brak. Dodatkowo pomiary zasolenia wykonywane za pomocą metod pośrednich są bardzo szybkie, a po zastosowaniu odpowiedniego oprzyrządowania i oprogramowania umożliwiają ciągły monitoring zmian zasolenia przegród budowlanych.

Większość obecnie stosowanych metod określania stężenia jonów to metody elektryczne, spośród których największą popularność zdobyły metody oporowe, w których wykorzystuje się zmiany przewodności elektrycznej roztworu na skutek zmian stężenia soli w nim zawartych. Mierząc oporność elektryczną roztworu lub ośrodka porowatego dotkniętego zasoleniem, możemy po odpowiedniej kalibracji określić ogólne stężenie zawartych w nim soli. Zaletą metod oporowych jest prostota konstrukcji, a co za tym idzie - mała cena dostępnych na rynku mierników, zaś najważniejszą wadą jest mała selektywność na wilgotność, w rezultacie czego pomiary obarczone są dużym błędem zależnym od zasolenia.

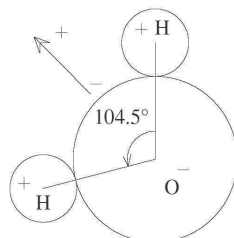
W niniejszej pracy proponujemy możliwość wykorzystania metody pomiarowej TDR (*Time Domain Reflectometry*) jako alternatywnej metody elektrycznej do określania stężenia soli rozpuszczonych w wodzie zawartej wewnątrz porów przegród budowlanych. Metoda TDR jest obecnie powszechnie stosowana w dziedzinie gleboznawstwa [1] do określania wilgotności gleb. Prowadzone są aktualnie prace nad wdrożeniem jej w dziedzinie budownictwa do określania wilgotności przegród budowlanych. Celem tej pracy jest wykazanie możliwości określania zasolenia przegród i materiałów budowlanych w jednym kroku pomiarowym, dzięki czemu możliwości metody zostaną rozszerzone.

### **Metoda TDR (Time Domain Reflectometry)**

Strukturę porowatych materiałów budowlanych tworzą trzy fazy - stała, ciekła i gazowa. Traktując je jak dielektryki najbardziej widoczny wpływ na działanie zewnętrznego pola elektrycznego wykazuje woda. Wynika to z asymetrycznego rozkładu ładunków w jej molekułach (rys. 1).

Parametrem mierzonym techniką TDR jest przenikalność dielektryczna  $\epsilon$ , będąca miarą zachowania cząstek materii po przyłożeniu zewnętrznego, zmiennego pola elektrycznego [1]. Wskutek przyłożenia do ośrodka pola elektrycznego molekuły wody obracają się zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola. Konsekwencją takiego porządkowania dipoli jest

gromadzenie energii wyzwolanej w chwili, gdy pole elektryczne zanika. Energię tę wyraża się w postaci rzeczywistej części względnej przenikalności elektrycznej ośrodka  $\varepsilon'$ .



Rys. 1. Asymetryczna budowa molekuly wody [2]

Fig. 1. Asymmetric character of water molecule [2]

Wielkość ta jest podstawowa przy pomiarach wilgotności ośrodków porowatych. Z kolei urojona część zespolonej przenikalności dielektrycznej ( $\varepsilon''$ ) wyraża straty energii zewnętrznego pola elektrycznego, wywołane przewodnictwem jonowym ośrodka zależnym od stężenia soli. Przenikalność dielektryczna ośrodka o niezerowej przewodności elektrycznej wyraża się równaniem zespolonym [2, 3]:

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

gdzie:  $\varepsilon'_{\omega}$  - rzeczywista część przenikalności dielektrycznej ośrodka dla danej częstotliwości  $\omega$ ,  $\varepsilon''_{\omega}$  - urojona część przenikalności dielektrycznej dla danej częstotliwości  $\omega$ ,  $i$  - jednostka urojona,  $\sigma_0$  - przewodność elektryczna,  $\varepsilon_0$  - przenikalność dielektryczna próżni ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m),  $\omega$  - częstotliwość kołowa zewnętrznie przyłożonego pola elektrycznego.

Z powyższego równania wynika, że straty energii pola związane z jonową przewodnością elektryczną zasadniczo obserwuje się dla małych częstotliwości. Zaletą techniki TDR w pomiarach wilgotnościowych jest wysoka częstotliwość pola, dlatego przyjmuje się, że przewodność elektryczna nie ma znacznego wpływu na mierzoną wartość przenikalności dielektrycznej i w pomiarach wilgotności może być pomijana. Zawarte w materiale jony wpływają jednak na przebieg impulsu elektromagnetycznego odczytywanego przez mierniki TDR, obniżając energię powracającego od sondy echa. Może to być przyczyną trudności pomiarowych w przypadku ośrodków o dużym zasoleniu (całkowicie wytłumiony powracający impuls, będący podstawą pomiaru), jednak w większości przypadków wpływ ten nie jest tak duży. W pracy wykazano możliwość określenia wpływu zasolenia materiału na tłumienie odczytanego przez miernik TDR, powracającego od sondy impulsu elektromagnetycznego, co w rezultacie może pozwolić na określenie zasolenia badanego materiału.

### Część doświadczalna

Celem eksperymentu było wykazanie wpływu wzrostu stężenia jonów w materiale budowlanym na osłabienie impulsu elektromagnetycznego w sondzie TDR, a następnie

przedstawienie powyższych zależności przy poszczególnej wilgotności objętościowej materiału. Rezultatem prowadzonych badań będzie możliwość wykorzystania informacji pobranej z sondy TDR do określenia zasolenia materiału przy danej wilgotności.

Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano klasyczne stanowisko pomiarowe [4] w następującej konfiguracji: miernik TDR sterowany komputerem PC, sondy TDR (LP/mts, Easy Test), próbki betonu komórkowego o wymiarach 6×6×12 cm (rys. 2), roztwory soli KCl o następujących stężeniach: 0,0125%, 0,025%, 0,05% i 0,1%.



Rys. 2. Próbkę betonu komórkowego z zainstalowaną sondą TDR

Fig. 2. Aerated concrete samples with installed TDR probe

Próbki betonu komórkowego wysuszono w temperaturze 105°C do stałej masy, a następnie zainstalowano w nich sondy TDR (rys. rys. 2 i 3). Tak przygotowane próbki przebadano metodą reflektometryczną (zebrano krzywe TDR dla poszczególnych próbek, które posłużyły do dalszej analizy), a następnie nasycano je stopniowo uprzednio przygotowanymi roztworami chlorku sodu (rys. 4).



Rys. 3. Próbkę betonu komórkowego z zainstalowanymi sondami TDR w trakcie eksperymentu

Fig. 3. Aerated concrete samples with installed TDR probes during experiment

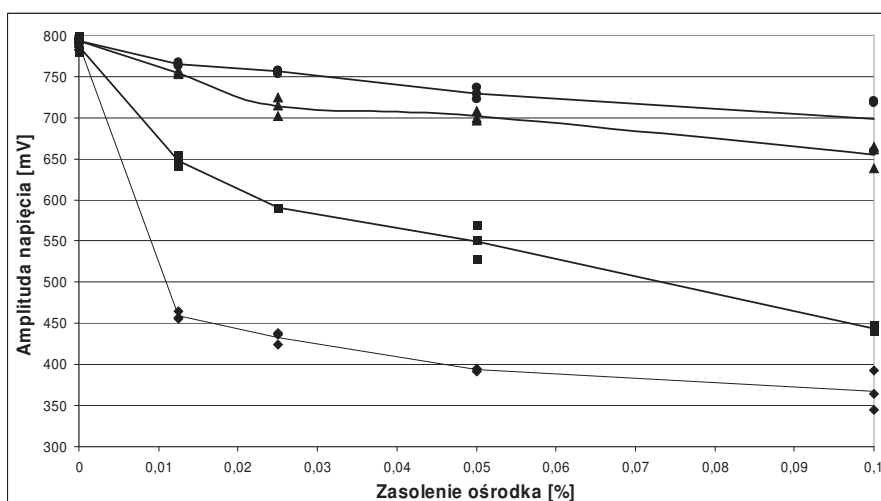


Rys. 4. Nasywanie próbek betonu komórkowego roztworami chlorku sodu

Fig. 4. Saturation of aerated concrete samples with sodium chloride solutions

### Omówienie wyników

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu zebrano szereg krzywych przebiegu impulsu elektromagnetycznego w sondzie TDR dla próbek o różnym stanie wilgotności i różnym stężeniu jonów. Dane od miernika TDR przekazywane były do komputera PC, gdzie za pomocą typowych narzędzi (program MS Excel) dokonano ich analizy. Na rysunku 5 przedstawiono rezultaty przeprowadzonych badań. Na wykresach zaprezentowano interpretację odpowiedzi sond TDR na zadany impuls skokowy dla czterech wybranych wilgotności ośrodka (10, 20, 30 i 40%<sub>vol</sub>) przy różnym ich zasoleniu (w zależności od stężenia dozowanego roztworu).



Rys. 5. Zmiany napięcia powracającego echa impulsu TDR w zależności od stężenia jonów soli chlorku sodu dla czterech wybranych objętości wilgotnościowych betonu komórkowego.

Fig. 5. Voltage changes of the returning TDR signal in the relation to sodium chloride ions concentration for four chosen volumetric moistures of the aerated concrete

Pod pojęciem amplituda napięcia należy tutaj rozumieć różnicę pomiędzy amplitudą impulsu powracającego z ośrodka w stosunku do wartości amplitudy impulsu wchodzącego do ośrodka. Niezależnie od wartości wilgotności wartość powracającego napięcia wskutek wzrostu zasolenia spada, co spowodowane jest wzrostem przewodności jonowej ośrodka. Należy tutaj zaznaczyć, iż wzrost przewodności jonowej ma znaczący wpływ jedynie na spadek napięcia, nie na szybkość propagacji impulsu, zatem nie wpływa na czas powrotu generowanego piku, co jest podstawą funkcjonowania metody TDR (reflektometrii w domenie czasu).

W przypadku wilgotności objętościowych w zakresie  $\theta = 0,1$ ;  $\theta = 0,2$  amplitudy są stosunkowo wysokie, a wpływ zasolenia pochodzącego od roztworów o znacznym zasoleniu nie jest duży, lecz widoczny. Dla wilgotności 10%<sub>vol</sub> napięcie odczytane na pikie powracającym jest o ponad 150 mV mniejsze w porównaniu z próbką suchą, zaś dla wilgotności 20%<sub>vol</sub> różnica wynosi ok. 250 mV. W przypadku większej wilgotności ten spadek jest większy i tak dla 30%<sub>vol</sub> obserwowany jest już znaczny spadek energii impulsu powracającego nawet przy niewielkiej koncentracji jonów, a przy stężeniu 0,1% wynosi ponad 400 mV w porównaniu do próbki niezasolonej. Największe spadki napięcia powracającego sygnału widoczne są w przypadku nasyconych próbek (40%). Wyraźnie widoczny jest tutaj spadek energii sygnału wraz z zasoleniem, przy czym maksymalne wartości notowane są dla maksymalnego stężenia równego 0,1%.

## Wnioski

TDR (*Time Domain Reflectometry*) jest metodą ciągle rozwijaną, mającą duży, w dalszym ciągu nie w pełni wykorzystany, potencjał pomiarowy. Badania wykonane w ramach tej pracy są próbą rozszerzenia możliwości metody do pomiaru nietypowego dla niej parametru - zasolenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań widać, że wzrost zasolenia nie pociąga za sobą zmian w odczycie wilgotności, co niewątpliwie stanowi przewagę metody nad typowymi metodami elektrycznymi, jednocześnie właściwa interpretacja impulsu elektromagnetycznego powracającego z dielektryka (materiału porowatego zawierającego jony soli) pozwoli na określenie zasolenia tego materiału, dzięki czemu w jednym kroku pomiarowym zostaną określone dwa niezależne parametry (wilgotność i zasolenie). Dzięki temu możliwości metody zostaną rozszerzone.

Przedstawione zagadnienie jest dosyć skomplikowane i wymaga w dalszym ciągu wielu badań, jednak, jak wykazują przedstawione powyżej wyniki, istnieje możliwość odczytu wilgotności i zasolenia na podstawie właściwej oceny odpowiedzi sondy TDR.

## Podziękowanie

Powyższe badania były przeprowadzone w ramach projektu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w Polsce Nr 4952/B/T02/2008/34.

## Literatura

- [1] Topp G.C., Davis J.L. i Annan A.P.: *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res., 1980, **16**, 574-582.
- [2] Skierucha W. i Malicki M.A.: *TDR Method for the Measurement of Water Content and Salinity of Porous Media*. Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin 2004.

- [3] Sobczuk H. i Plagge R.: *Time Domain Reflectometry Method in Environmental Measurements*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Vol. 39, Lublin 2007.
- [4] Suchorab Z., Sobczuk H., Rożej A. i Łągód G.: *Comparison of reflectometric and gravimetric method for examination of sewage sludge additions influence on water properties of reclaimed soils*. Proceedings ECOpole'05, Jamrozowa Polana - Hradec Kralove, 20-22 X 2005, Towarzystwo Chemii i Inżynierii Ekologicznej, 281-286.

### **POSSIBILITY OF SALINITY DETERMINATION IN BUILDING MATERIALS USING THE TDR METHOD**

**Abstract:** Salinity of the building barriers is a common problem in many objects, especially the historical ones. Ions of salt which are moved by water through the walls are the reason of their destruction. In high concentrations they crystallize inside the pores of a building structure and destroy it. They are also very inconvenient in old building renovations because of their harmful influence on external plasters. The possibility of building barriers salinity measurement gives the information about the ions concentration in the material and enables finding the suitable renovation method from the point of view of the problem. This paper presents the TDR method as an alternative in determination of building barriers salinity. Development of this method would give the possibility to measure two parameters of the barrier (water content and salinity) in one single measurement step. In the paper there are presented calibration and the analysis of the TDR electromagnetic pulse echo running in building barriers with different moisture and salinity.

**Keywords:** building barriers, water, salinity, TDR