

dr hab. inż. Waclaw Brachaczek, prof. ATH¹⁾

ORCID: 0000-0002-4782-8409

mgr inż. Adam Chleboś^{2)*}

ORCID: 0000-0003-3429-8098

Porównanie wybranych metod pomiaru wilgotności masowej murów

Comparison of selected methods of mass moisture measurement in walls

DOI: 10.15199/33.2022.12.07

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę pomiarów wilgotności murów. Na przykładzie wybranych budynków historycznych z murami ceglanyymi oraz kamiennymi porównano wyniki pomiarów wilgotności masowej na głębokości 2, 5, 10, 15 oraz 30 cm w głąb murów badanych metodami radiową, mikrofalową, elektrooporową, karbidową oraz suszarkowo-wagową. Dodatkowo na próbkach pobranych z punktów pomiaru wilgoci zmierzono poziom obciążenia solami w celu oceny wpływu zasolenia na uzyskane wyniki wilgotności. Określono, w jakich warunkach wybrane metody, w tym metody niszczące, nie wskazują wiarygodnych wyników.

Słowa kluczowe: wilgotność masowa murów; diagnostyka; metoda suszarkowo-wagowa; metoda elektrooporowa; zasolenie murów.

Abstract. The article presents the problems of measuring the humidity of walls. On the example of selected historical buildings with brick and stone walls, the results of mass moisture measurements at a depth of 2, 5, 10, 15 and 30 cm into the wall were compared, tested using radio, microwave, electrofusion, carbide and dryer-weight methods. Additionally, the salt load level was measured on samples taken from the moisture measurement points in order to assess the influence of salinity on the obtained results of humidity. It was found under what conditions the selected methods, including destructive methods, do not show reliable results.

Keywords: walls mass moisture; diagnostics; dryer-weight method; electrofusion method; salinity of walls.

Podwyższone zawilgocenie przegród budowlanych jest najczęstszym problemem obiektów historycznych. Wilgoć wpływa na większość procesów degradacji starych budynków [1]. Dokładne badanie zawartości wilgoci w murach odgrywa kluczową rolę w ustaleniu źródła przedostawania się jej do muru, a następnie określeniu zabiegów renowacyjnych. W przypadku obiektów historycznych, różnorodność zastosowanych materiałów oraz ich późniejsze zmiany powodują, że pomimo wielu dostępnych metod pomiaru wilgotności dokładne określenie stanu ich zawilgocenia jest niejednoznaczne i nadal budzi wiele kontrowersji. Ze względu na znaczne wymiary i wartość historyczną tych obiektów, istotne jest przeprowadzenie pomiarów w taki sposób, aby w jak najmniejszym stopniu ingerować w zabytkową strukturę budynku.

W artykule omówiono wyniki badania wilgotności masowej murów ceglanych lub z kamienia granitowego na zaprawie wapienno-piaskowej wykonanych metodą mikrofalową, radiową, elektrooporową, karbidową oraz suszarkowo-wagową w celu oceny ich wiarygodności i przydatności w różnych warunkach.

Charakterystyka analizowanych obiektów

Wykonano pomiary wilgotności murów w budynkach wzniesionych w technologii tradycyjnej, ze ścianami z cegły lub z kamienia granitowego na zaprawie wapienno-piaskowej. Wszystkie mury pokryte były wtórnymi tynkami cementowo-wapiennymi lub wapiennymi o grubości 2 – 3 cm.

¹⁾ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

²⁾ Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska ATH w Bielsku-Białej

^{*} Adres do korespondencji: achlebos@semprefarby.pl

Obiekt 1: kamienica Carla Oczki zlokalizowana w Cieszynie przy ul. Stalmacha 32 (fotografia 1) wzniesiona pod koniec XIX w. Budynek usytuowany jest na terenie



Fot. 1. Elewacja obiektu 1 – kamienicy Carla Oczki w Cieszynie
Photo 1. Facade of building 1 – Carl Oczka's tenement house in Cieszyn

ze spadkiem w sąsiedztwie przylegających kamienic. Badania wykonywano od wewnątrz budynku na południowo-zachodniej ścianie zewnętrznej płytkiej piwnicy. Grubość muru ceglanoego wynosiła ok. 75 cm.

Obiekt 2: Sanktuarium Matki Bożej Wspomożenia Wiernych w Oświęcimiu zbudowane w XIV w. (fotografia 2a). Badania prowadzono na ceglanej ścianie działowej o grubości 60 cm znajdującej się w części podziemnej, pomiędzy korytarzem prowadzącym do kantyny a niewielką salką. Pomiary realizowano od strony korytarza.

Obiekt 3: Salezjańskie Publiczne Liceum Ogólnokształcące w Oświęcimiu wzniesione w XIX w. (fotografia 2b). Badano zewnętrzną ścianę fundamentową o grubości ok. 60 cm z kamienia naturalnego (na zaprawie wapiennej) od wewnątrz pomieszczenia przylegającego do szatni, znajdującego się w północnej części piwnicy obiektu.



Fot. 2. Elewacja: a) obiektu 2 – Sanktuarium Matki Bożej Wspomożenia Wiernych w Oświęcimiu; b) obiektu 3 – Salezjańskiego Publicznego Liceum Ogólnokształcącego w Oświęcimiu
Photo 2. Facade: a) building 2 – Sanctuary of Our Lady Help of Christians in Oswiecim; b) building 3 – Salesian Public High School in Oswiecim

Metody pomiaru wilgotności murów

Do pomiaru wilgotności murów wykorzystano metody, które ze względu na stopień ingerencji w badane podłoże można podzielić na niszczące oraz nieniszczące. **Metody niszczące** charakteryzują się dużą ingerencją w mur ze względu na konieczność pobrania z niego próbek. Zalicza się do nich:

- **metoda suszarkowo-wagowa** – polega na pomiarze różnicy masy próbki w stanie zawilgoconym oraz osuszonej do stałej masy [2, 4];

- **metoda karbidowa CM** – polega na pomiarze wzrostu ciśnienia w butli stalowej powstającego wskutek reakcji karbidu CaC_2 z wodą z badanej próbki [3, 4, 5].

Badania metodami niszczącymi wiążą się z ryzykiem wysuszenia próbek przez rozgrzanie wiertła i dlatego istotne jest, aby zwrócić uwagę na temperaturę wiertła.

Nieniszczące metody pomiaru wilgotności określane są jako pośrednie, gdyż polegają na pomiarze innej właściwości materiału, na podstawie której określana jest wilgotność [3]. Najczęściej stosowanymi metodami pomiaru wilgotności są badania wykonywane z użyciem urządzeń elektronicznych bazujących na metodach fizycznych. **Wybrane metody nieniszczące to:**

- **mikrofalowa** – z użyciem urządzenia dokonującego pomiaru tłumienia wysyłanej fali mikrofalowej [5]. Miernik wskazywał średnią wilgotność muru z głębokości do 30 cm;

- **radiowa** – z użyciem miernika do określenia wilgotności na niewielkiej głębokości w tzw. trybie szukania. Urządzenie mierzy tłumienie wysyłanej fali radiowej [6]. Miernik wskazywał średnią wilgotność od powierzchni do głębokości 2 cm;

- **elektrooporowa** – z wykorzystaniem urządzenia bazującego na pomiarze oporu elektrycznego próbki. Badania wymagają niewielkiej ingerencji w mur przez wykonanie otworów, do których wprowadza się elektrody na odpowiednią głębokość. Następnie mierzony jest opór elektryczny sygnału przesyłanego pomiędzy elektrodami – niewielki opór świadczy o dużej ilości wody w badanym materiale [2, 4].



Bezjednostkowe wskazania wilgotnościomierza są przeliczane na wilgotność masową muru zgodnie z [7]. Maksymalna głębokość, na której wykonywano pomiary, wynosiła 15 cm i wynikała z długości sondy.

Wyniki badań

Wyniki badań wilgotności murów zestawiono w tabeli 1. Wszystkie pomiary wykonywano od wewnątrz budynków na ścianach pokrytych tynkami, na wysokości ok. 100 cm ponad podłogą. Pomiary prowadzono na powierzchni oraz na grubości muru 2, 5, 10, 15 i 30 cm, z użyciem mierników elektronicznych wykorzystujących metody radiową, elektrooporową oraz mikrofalową. Dodatkowo z każdego punktu pomiarowego pobrano próbki materiału konstrukcyjnego w celu oznaczenia wilgotności metodą suszarkowo-wagową oraz karbidową. **Wartości wilgotności określone metodą suszarkowo-wagową przyjęto za punkt odniesienia**, gdyż jest ona uważana za najbardziej wiarygodną w pełni oddającą rzeczywisty stan wilgotnościowy murów [2, 3]. Zamieszczone w tabeli 1 wyniki badań pochodzą odpowiednio: z obiektu 1 w Cieszynie przy ul. Stalmacha 32 i są oznaczone symbolami C1-C3 (uśrednione wartości z przynajmniej

Tabela 1. Wyniki pomiarów wilgotności masowej [%] na różnej głębokości muru
Table 1. Results of mass humidity measurements [%] at various wall depth

Punkt pomiarowy	Wilgotność masowa [%] na głębokości muru													
	2 cm			5 cm			10 cm			15 cm			30 cm	
	radio-wa *	elektrooporowa	suszarkowo-wagowa	elektrooporowa	suszarkowo-wagowa	elektrooporowa	suszarkowo-wagowa	elektrooporowa	karbido-wa CM	suszarkowo-wagowa	mikrofa-lową *	karbido-wa CM	suszarkowo-wagowa	
C1	19,4	19,0	18,1	18,8	14,2	17,3	14,5	16,7	14,2	14,7	27,3	14,3	15,2	
C2	14,8	13,4	14,2	14,1	14,0	15,8	14,3	15,4	13,6	14,6	12,2	14,8	15,1	
C3	≥20	19,8	15,9	19,2	15,7	18,3	15,4	17,5	14,1	15,6	19,8	15,5	16,3	
O1	16,6	17,2	10,7	9,0	7,5	7,5	6,9	7,3	6,1	6,2	6,8	6,2	6,4	
O2	18,6	16,2	9,2	11,8	7,6	10,5	7,2	8,3	6,5	6,9	8,5	6,7	7,0	
O3	≥20	19,0	10,3	12,2	8,9	10,6	8,0	10,3	7,2	7,5	9,2	6,3	7,2	
S1	≥20	≥20	2,8	12,7	2,5	11,8	2,1	12,3	2,4	2,0	39,5	2,3	2,3	
S2	≥20	19,8	3,0	12,6	2,2	12,6	2,2	11,3	2,2	2,1	38,6	2,0	1,9	
S3	≥20	18,7	1,9	13,0	2,3	13,2	2,1	14,1	2,1	2,1	36,1	2,1	2,2	

* pomiary dotyczyły wskazywanych przez przyrząd pomiarowy uśrednionych wartości wilgotności masowej od powierzchni ściany do ustalonej głębokości

5 pomiarów), O1 – O3 z obiektu 2, tj. Sanktuarium Matki Bożej Wspomożenia Wiernych w Oświęcimiu, zaś S1 – S3 z obiektu 3, tj. budynku Salezjańskiego Publicznego Liceum Ogólnokształcącego. Z uwagi na zły stan techniczny obiektu 3 (S1 – S3) niemożliwe było pobranie próbki zaprawy, gdyż ulegała ona rozkruszeniu. Analizowano więc próbki samego kamienia, tylko minimalnie oblepionego resztkami zaprawy.

Oprócz wykonanych pomiarów wilgotności masowej, z każdego punktu pomiarowego pobrano próbkę do badań poziomu obciążenia jonami chlorkowymi Cl^- , azotanowymi NO_3^- i siarczanowymi SO_4^{2-} metodą półilościową (tabela 2). Kolorem białym zaznaczono wartości klasyfikowane jako niskie, żółtym jako średnie wg [8]. Nie stwierdzono wysokiego obciążenia solami. Próbkami były zwierciny pobrane z całej grubości otworów do wprowadzania sond.

Ze względu na bardzo małą wartość wilgotności muru obiektu 3 oznaczoną metodą suszarkowo-wagową oraz karbidową, wykonano dodatkowo pomiary nasiąkliwości masowej próbek pobranych z głębokości 5, 10, 15 i 30 cm. Uzyskane wartości nasiąkliwości były bardzo zbliżone do wartości wilgotności masowej i nie przekraczały 3,0%.

Tabela 2. Wyniki pomiarów obciążenia solami [%] ścian
Table 2. Salinity measurement results [%] of the walls

Charakterystyka	Próbki								
	C1	C2	C3	O1	O2	O3	S1	S2	S3
Cl^- [%]	0,13	0,25	0,13	0,0	0,0	0,25	0,0	0,0	0,0
NO_3^- [%]	0,10	0,13	0,05	0,13	0,25	0,25	0,08	0,13	0,13
SO_4^{2-} [%]	0,40	0,20	0,20	0,80	0,60	0,80	0,60	0,60	0,80

Analiza wyników

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że pomiary wykonane na głębokości do 2 cm metodą radiową oraz metodą elektrooporową z wykorzystaniem krótkich elektrod długości 2 cm, są zróżnicowane i nie odzwierciedlają rzeczywistej

kondycji murów. W związku z tym, że w badanych budynkach grubość tynku wynosiła $2 \div 3$ cm, pomiary wskazują przede wszystkim wilgotność samego tynku. Tynki w budynkach historycznych charakteryzują się z reguły znacznym stopniem degradacji, dużą porowatością, co przekłada się na tendencję do podciągania kapilarnego i higroskopijnego wilgoci. Duże zróżnicowanie wilgotności wynika ze znacznej podatności tej części muru na wpływ zmian temperatury i wilgotności powietrza wewnątrz pomieszczenia. Wykonywanie pomiarów od zewnątrz obarczone byłoby jeszcze większym błędem z uwagi na dodatkowy wpływ opadów atmosferycznych oraz zmianę nasłonecznienia i temperatury ściany.

Do pomiarów wilgotności na głębokości 5 cm zastosowano metodę elektrooporową i suszarkowo-wagową. Stwierdzono, że duża wilgotność powierzchni murów dwóch pierwszych budynków (C1-C3 i O1-O3) wpływała na wynik wilgotności na głębokości 5 cm. Nie odnotowano takiej zależności w przypadku obiektu 3 (S1-S3). Wilgotność badana na tej głębokości była większa niż wewnątrz muru.

W przypadku wykonywania pomiarów metodą elektrooporową, suszarkowo-wagową oraz karbidową, na głębokości 10, 15 i 30 cm, nie stwierdzono wpływu wilgotności powierzchniowej na wilgotność muru. W przypadku obiektu 1 i 2, niezależnie od zastosowanej jednej z wymienionych metod, otrzymano porównywalne wyniki. Dane uzyskane metodą mikrofałową wykazywały się najmniejszą powtarzalnością i w większości punktów pomiarowych najbardziej odbiegały od uzyskanych innymi metodami. Zauważono, że wpływ na wyniki uzyskane metodami niszczącymi miał materiał konstrukcyjny. Ściany obiektów 1 i 2 wzniesiono z cegły, podczas gdy ściana obiektu 3 wykonana jest z kamienia granitowego charakteryzującego się niewielką chłonnością. Pomiary obiektu 3 wykonane metodą suszarkowo-wagową obarczone są również błędem, z uwagi na fakt pobrania praktycznie kamienia, który wykazywał się

minimalną chłonnością wody, a o realnej wilgotności muru w tym miejscu decydowała przede wszystkim zaprawa. Była ona jednak na tyle osłabiona, że nie udało się pobrać próbek zawierających jej nieco więcej. Potwierdzają to badania nasiąkliwości masowej próbek pobranych do badań wilgotności metodą suszarkowo-wagową. Bardzo zbliżone wyniki wilgotności masowej i nasiąkliwości sugerują, iż resztki zaprawy w murze były całkowicie wysyczone wodą, a mała wartość wilgotności związana była z niewielką ilością zaprawy w pobranej próbce. W związku z tym zestawione w tabeli 1 pomiary wilgotności w obiekcie 3, określone metodą suszarkowo-wagową, nie mogą być traktowane jako realne wartości. Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku metody karbidowej, co miało związek z tą samą metodą pobierania próbek do badań.

W przypadku pomiarów wykonywanych z użyciem aparatu wykorzystującego metodę mikrofalową, zbliżone wyniki z metodą suszarkowo-wagową odnotowano tylko w przypadku obiektów 1 i 2. Wyniki uzyskane tą metodą są wartościami uśrednionymi od powierzchni do badanej głębokości, zatem znaczny wpływ na wynik wywierała wilgotność powierzchniowa. W przypadku obiektu 3 wskazania metody mikrofalowej można uważać za bardziej wiarygodne niż metody karbidowej czy suszarkowo-wagowej. Wartości przekraczające 35% wilgotności masowej uzyskane metodą mikrofalową na ścianie obiektu 3 należy interpretować jako większe od rzeczywistych, gdyż wpływ wywiera wilgotność powierzchniowa.

W większości przypadków wartość wilgotności uzyskana metodą elektrooporową były większa od wartości uzyskanych metodami niszczącymi. Jest to związane głównie z występowaniem w murze soli wpływających na poprawę przewodności elektrycznej, co jest interpretowane przez urządzenie pomiarowe jako większa wilgotność masowa ściany od rzeczywistej. Zauważono to zwłaszcza w przypadku obiektów 2 i 3, gdzie stwierdzono największe obciążenie solami. Wpływ zasolenia próbki na uzyskane wartości wilgotności odnotowano także w przypadku metody karbidowej. Wyniki badania wykonywanego tą metodą były zbliżone do uzyskanych metodą suszarkowo-wagową. Ewentualne różnice wynikały z faktu, że niecała woda z próbki reagowała z karbidem, co przełożyło się na zmniejszenie ciśnienia w butli i mniejsze od rzeczywistego wskazanie wilgotności. W literaturze odnotowywano podobne obserwacje przy zwiększonym zasoleniu próbki i wodzie występującej w formie związanej [3, 4].

Podsumowanie

Wiarygodne wyniki wilgotności analizowanych budynków uzyskano na głębokości 10 cm i większej. Pomiary na głębokości 2 i 5 cm nie dają realnej wiedzy na temat rozkładu wilgotności w murze z uwagi na grubość tynku i duży wpływ wilgotności przypowierzchniowej.

W przypadku murów o regularnej budowie wykonanych z materiałów o dużej nasiąkliwości najbardziej wiarygodne wyniki można uzyskać z użyciem metod niszczących, zwłaszcza

czy suszarkowo-wagowej. Metody te nie sprawdzają się w przypadku murów o złożonej, nieregularnej budowie i osłabionej zaprawie, z uwagi na różną chłonność materiału budulcowego oraz brak możliwości pobrania reprezentacyjnej próbki zawierającej odpowiednią ilość zaprawy. W takich przypadkach korzystniejsze są metody mikrofalowa i elektrooporowa.

Na wartość wilgotności uzyskanej metodą radiową i mikrofalową wpływa wilgotność powierzchniowa, gdyż wskazanie miernika jest uśrednioną wartością wilgotności od powierzchni ściany do odpowiedniej głębokości. Oznacza to małą powtarzalność wyników uzyskanych tymi metodami. Wykonanie badania metodą radiową oraz mikrofalową ma sens np. w przypadku badania nieotynkowanej ściany ceglanej, gdzie pomiary mogą stanowić pomoc w dobraniu punktów pomiarowych pod inne metody badawcze.

Zasolenie muru wpływa na wyniki uzyskane metodą elektrooporową i karbidową. Sole poprawiają przewodność elektryczną muru i w efekcie metoda elektrooporowa podaje wynik większy od rzeczywistego, a brak reakcji całej wody z karbidem przy wodzie występującej w formie związanej przekłada się na niedoszacowane wskazanie wilgotności w metodzie karbidowej.

Realna ocena rozkładu wilgotności w murze powinna bazować na pomiarach wykonanych co najmniej dwiema metodami pomiarowymi i musi być wsparta analizą informacji dotyczących budynku, materiału, z jakiego został zbudowany, jego chłonności oraz poziomu obciążenia solami.

Fotografie: A. Chleboś

Literatura

- [1] Rokieli M. Renowacje obiektów budowlanych. Projektowanie i warunki techniczne wykonania i odbioru robót. 2014. Warszawa. Wydawnictwo Medium.
- [2] Trochonowicz M. Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych. Budownictwo i Architektura. 2010; 7: 131 – 144.
- [3] Matkowski Z. Problemy związane z metodyką pomiarów wilgotności ścian murowanych w obiektach zabytkowych. Materiały Budowlane. 2014; 3: 14 – 16.
- [4] Jasięko J, Matkowski Z. Zasolenie i zawilgocenie murów ceglanych w obiektach zabytkowych – diagnostyka, metodyka badań, techniki rehabilitacji. Wiadomości Konserwatorskie. 2003; 14: 43 – 48.
- [5] Schabowicz K, Hoła J, Matkowski Z. Tomografia impedancyjna w badaniach zawilgoconych murów ceglanych. Czasopismo Techniczne. Budownictwo. 2007; 104.1-B: 73 – 81.
- [6] <https://www.protimeter.com/>.
- [7] Karyś J. Tabela przeliczeniowa ze wskazań przyrządu na wilgotność masową dla wilgotnościomierza Protimeter Surveymaster dla murów i posadzek, publikacja udostępniona przez dystrybutora przyrządów pomiarowych MERA Sp. z o.o.
- [8] Merkblatt WTA. 2004. Merkblatt 2-9-04 Sanierputzsysteme. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.: 24. München.
- [9] PN-EN ISO 12570 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze.

Przyjęto do druku: 07.10.2022 r.