

dr inż. Aleksander Byrdy^{1*)}

ORCID: 0000-0003-0565-0275

dr hab. Marek Rembiś, prof. AGH²⁾

ORCID: 0000-0003-2879-3949

prof. dr hab. inż. Roman Kinasz³⁾

ORCID: 0000-0001-6715-9583

Selection of high-sorption clay-based plaster for machine application

Dobór receptury tynku glinianego o bardzo dobrej sorpcyjności do aplikacji mechanicznej

DOI: 10.15199/33.2024.07.03

Abstract. Modern ready mixed clay-based plasters contain a substantial amount of additives and fillers that are indispensable to make typical machine-assisted plaster application feasible. Fillers reduce the content of clay as the primary ingredient improving the indoor climate in rooms. This article presents the results of comparative studies on the sorption parameters of various clay-rich plaster compositions against the backdrop of research results for other plasters commonly used in building engineering. A plaster characterized by high sorption properties was selected and verified in terms of application potential using the shotcreting technique taking advantage of the thixotropic properties of the material. The developed composition was applied as plaster in a residential building where its effectiveness and influence on the indoor comfort in rooms were verified.

Keywords: ready mix clay-based plaster; sorption; thixotropy; indoor climate.

Streszczenie. Współcześnie stosowane tynki maszynowe produkowane na bazie gliny zawierają znaczną ilość dodatków i wypełniaczy, które mają zapewnić możliwość ich aplikacji przy użyciu typowych agregatów tynkarskich. Wypełniacze te redukują zawartość gliny jako podstawowego składnika wpływającego na poprawę klimatu wewnętrznego w pomieszczeniach. W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych parametrów sorpcyjnych różnych receptur tynków o dużej zawartości gliny na tle wyników badań innych tynków powszechnie stosowanych w budownictwie. Na podstawie przeprowadzonej selekcji dobrano tynk o bardzo dobrych właściwościach sorpcyjnych i zweryfikowano możliwość jego aplikacji techniką torkretowania, wykorzystującą właściwości tiksotropowe użytego materiału.

Słowa kluczowe: gliniany tynk maszynowy; sorpcja; tiksotropia; klimat wewnętrzny.

The newest Energy Performance of Buildings Directive [1] requires not only to analyse the energy expenditure, but also the carbon footprint across the whole life cycle (WLC – *Whole Life Carbon*) for new buildings from as soon as the year 2027. The necessity to reduce CO₂ emissions in the present-day building engineering enforces the implementation of solutions that limit energy consumption during the processes of construction and exploitation of buildings as well as their utilization. While looking for new material and construction solutions, it is also important to use materials characterized by low-energy-demand production [2]. An excellent example of such materials is plasters based on clay. Their natural origin, easily available constituents, low energy consumption of their production technology, very good performance properties and easy recycling (plasters without binders) allow classifying them as sustainable building materials [3].

Apart from ecological concerns, one of the most important advantages of clay-based plasters is their ability to regulate indoor climate in buildings. Given the high sorption properties (the absorption of water vapor for a 2 cm clay layer when the

najnowsza dyrektywa UE dotycząca efektywności energetycznej budynków [1] wymaga nie tylko analizy nakładów energetycznych na ich eksploatację, ale także analizy śladu węglowego w całym cyklu życia (WLC – *Whole Life Carbon*) w przypadku nowych budynków począwszy od 2027 r. Konieczność redukcji emisji CO₂ w nowoczesnym budownictwie wymusza wprowadzanie rozwiązań ograniczających nakłady energetyczne zarówno podczas budowy, eksploatacji, jak również w procesie utylizacji budynków. Wdrażanie nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych wymaga stosowania materiałów o niewielkim zapotrzebowaniu na energię zużywaną w procesie produkcji [2]. Doskonałym przykładem takich materiałów są tynki gliniane. Ich naturalne pochodzenie, łatwa dostępność składników, mała energochłonność technologii produkcji, bardzo dobre właściwości użytkowe oraz łatwość recyklingu (szczególnie tynków bez dodatków spajających) pozwalają na zaliczenie ich do zrównoważonych materiałów budowlanych [3].

Oprócz względów ekologicznych najważniejszą zaletą tynków glinianych jest zdolność do regulacji klimatu wewnętrznego w budynkach. Ze względu na bardzo dobre właściwości sorpcyjne gliny (absorpcja pary wodnej przez warstwę gliny grubości 2 cm, przy zmianie wilgotności względnej otoczenia z 50 do 80%, może wynosić do 300 g/m² [4]) oraz jej dużą pojemność cieplną (ciepło właściwe $c_p = 1670 \div 2500 \text{ J/(kgK)}$ [5]), tynki gliniane mogą stano-

¹⁾ Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology

²⁾ Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, AGH University of Science and Technology

³⁾ Faculty of Civil Engineering and Architecture, Department of Construction Technology and Organization, Lviv National Environmental University

*) Correspondence address: abyrdy@pk.edu.pl

relative humidity of the environment changes from 50% to 80% can be up to 300 g/m² [4]) and high heat capacity of clay (specific heat capacity $c_p = 1670 \div 2500$ J/(kgK) [5]), clay-based plasters could play a role of natural air temperature and humidity regulators in modern energy-saving buildings [6]. The main component of clay is the fine clay phase which has an important influence on the strength and sorption properties. At the same time, while drying clay exhibits a strong tendency towards shrinkage (the allowable shrinkage of clay mortar should not exceed 2% [4] and, in consequence, cracking and peeling of earthen plasters, which constitutes a major difficulty in designing the compositions of such plasters. In order to reduce this phenomenon, when selecting plaster compositions clay is enriched with sand, mineral fillers and components of plant origin [7]. Such additives have a negative influence on the sorption properties and heat capacity of decorative plasters, may reduce the feeling of comfort in rooms (specific scent of plant-derived ingredients), could complicate the production processes and increase their energy consumption [8 ÷ 10].

The primary flaw of traditional earthen plasters is high labour costs as a result of the necessity to use inefficient manual techniques of laying plaster on wall surfaces. The use of modern, machine-assisted plastering techniques requires plasters with a high content of mineral and organic fillers [9]. Such fillers extend the binding time of a plaster mix, reduce the shrinkage when plasters are drying and improve their adhesion to the substrate [11]. The content of clay in a ready-made plaster mix may drop even below 30% of its volume, thus reducing the ability of this layer to regulate the indoor climate in rooms.

The aim of the present work is to select an optimal formula for clay-rich plaster adapted to machine-aided application on walls built of modern building materials offering at the same time the best hygrothermal parameters.

Assumptions for the composition of the designed machine-applied clay plaster

According to [3], the clay present in clay-based plaster may occur in the form of powder or grains, and it may contain all sorts of materials defined as clayey minerals or cohesive materials, as well as hydrated aluminosilicates, including fine clays, silt, loess of one type or their mixtures. For practical reasons, the raw materials for the designed plaster were limited to those easily available in Poland. In order to limit the amount of mixing water, it was assumed that plaster would be produced based on the grain fraction, assuming the target plaster thickness up to 20 mm. For these reasons, it was assumed that the grain sizes in the mixture would be between 1.5 and 20 mm. To ensure the best sorption parameters of the plaster, it has been assumed that fillers will not constitute more than 50% of its volume. Quartz sand having a granulation of 0.1 ÷ 1.0 mm was used as a filler. It has also been assumed that the plaster's solvent should be water, in an amount not exceeding 33% of the dry weight of the clay plaster mixture and no more than 20% of the weight of the clay used.

wić naturalny regulator temperatury i wilgotności względnej powietrza w nowoczesnych budynkach energooszczędnych. Głównym składnikiem gliny jest faza ilasta, która również ma znaczny wpływ na parametry wytrzymałościowe i sorpcyjne. Iły podczas wysychania wykazują jednak skurcz (dopuszczalny skurcz zaprawy glinianej nie powinien być większy niż 2% [4]), czego konsekwencją jest pęknięcie i odpadanie tynków glinianych, co stanowi podstawową trudność w projektowaniu ich składu [6]. W celu ograniczenia tego zjawiska przy doborze składu tynków do gliny dodaje się piasek, wypełniacze mineralne lub składniki pochodzenia roślinnego [7]. Dodatki te mają jednak negatywny wpływ na właściwości sorpcyjne i pojemność cieplną wypraw, mogą pogarszać komfort użytkowania pomieszczeń (specyficzny zapach składników pochodzenia roślinnego), a także komplikować procesy produkcyjne i zwiększać ich energochłonność [8 ÷ 10].

Podstawową wadą tradycyjnych tynków glinianych są wysokie nakłady na robociznę w wyniku konieczności stosowania mało wydajnych technik ręcznego ich nakładania na powierzchnię ścian. W celu stosowania nowoczesnych, zmechanizowanych technik tynkarskich produkowane są tynki o dużej zawartości wypełniaczy mineralnych i organicznych [9]. Dzięki nim wydłuża się czas wiązania zaprawy, ogranicza skurcz podczas wysychania tynków oraz poprawia ich przyczepność do podłoża [11]. Zawartość gliny w gotowej mieszance tynku może ulec zmniejszeniu nawet poniżej 30% jego objętości. Dzięki temu znacznie redukuje się zdolność warstwy tynku do regulacji klimatu wewnętrznych pomieszczeń.

W artykule omówiono dobór optymalnej receptury tynku glinianego o dużej zawartości gliny, dostosowanej do maszynowej aplikacji na ścianach wznoszonych z nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych i jednocześnie zapewniającej najlepsze parametry higrotermiczne.

Skład projektowanego maszynowego tynku glinianego

Zgodnie z [3] zawarta w tynku glinianym glina może występować w postaci sproszkowanej i ziarnistej oraz zawierać wszelkie rodzaje glin, definiowanych jako minerały ilaste, spoiste lub jako uwodnione glinokrzemiany, w tym także gliny, iły i lessy jednego rodzaju lub ich mieszaniny. Ze względów praktycznych surowce do projektowanego tynku ograniczono do glin łatwo dostępnych na terenie Polski. W celu ograniczenia ilości wody zarobowej założono, że tynk będzie wytwarzany na bazie frakcji ziarnistej, a jego docelowa grubość nie będzie przekraczała 20 mm. Z tych powodów przyjęto, że mieszanka będzie zawierała ziarna o wielkości 1,5 – 20 mm. W celu zapewnienia jak najlepszych parametrów sorpcyjnych tynku przyjęto, że wypełniacze nie będą stanowiły w nim więcej niż 50% objętości. Jako wypełnienie dopuszczono piasek kwarcowy o uziarnieniu 0,1 ÷ 1,0 mm. Przyjęto również, że rozpuszczalnikiem tynku powinna być woda w ilości nie większej niż 33% wagi suchej mieszanki tynku glinianego i nie więcej niż 20% wagi użytej gliny.

A small amount of mixing water reduces the risk of shrinkage and peeling of drying plaster, but makes its application by means of typical plastering machines more difficult. When the clay content in a plaster composition is high and the amount of mixing water is low, the use of standard plastering machines become impossible. For this reason, it was proposed that the application of the designed plaster should be done using the technology described in the patent of [12], which assumes a plaster application method similar to that used for dry shotcrete. It was assumed that the preparation of earthen plaster should consist in fast mixing of its dry constituents

with a water solvent directly before plaster application or during its application onto the groundwork. During the process of plaster mix application, dry ingredients are cast and simultaneously sprinkled with water. The mixing water is applied in a minimal amount needed for optimal moisturizing of mixture grains and optimal working consistency allowing plaster mix application and its simultaneous levelling.

Based on the assumptions described above, 7 various compositions of microclimatic earthen plasters were prepared and subjected to tests of sorption properties. For comparison purposes, tests involved also three standard plasters commonly used in building engineering and one lime climatic plaster (Table 1).

Table 1. Description of plasters dedicated to tests of water vapour sorption

Tabela 1. Zestawienie tynków przeznaczonych do badań sorpcji pary wodnej

Sample series no./ Nr serii próbek	Plaster description or composition (shares by volume)/ Opis tynku lub skład tynku (proporcje objętościowo)	Density [kg/m ³] Ciężar objętościowy [kg/m ³]
1	silty clay/glina pylasta	1573,1
2	machine-applied, climate-regulating lime plaster/maszynowy, klimatyczny tynk wapienny	1314,3
3	kaolinite + illite : quartz sand (up to 1mm) 3 : 1/ kaolinit+illit : piasek kwarcowy (do 1 mm) 3 : 1	1684,5
4	drywall panel/plyta G-K	647,6
5	ready mixed gypsum plaster/maszynowy tynk gipsowy – Knauf MP75 Diamant	1107,5
6	illite: quartz sand (up to 1mm) 1 : 1/illit : piasek kwarcowy (do 1 mm) 1 : 1	1903,3
7	montmorillonite + illite + kaolinite: quartz sand (up to 1 mm) 1 : 1 : 1 /montmorillonit + illit + kaolinit : piasek kwarcowy (do 1 mm) 1 : 1 : 1	1597,1
8	illite: quartz sand (up to 1 mm) 1:1/illit : piasek kwarcowy (do 1 mm) 1 : 1	1794,3
9	montmorillonite: quartz sand (up to 1 mm) 1 : 1/ montmorillonit : piasek kwarcowy (do 1 mm) 1 : 1	1593,1
10	kaolinite: quartz sand (up to 1 mm) 3 : 1/ kaolinit : piasek kwarcowy (do 1mm) 3 : 1	1689,9
11	machine-applied cement-lime plaster/maszynowy tynk cementowo-wapienny	1891,8

Mąła ilość wody zarobowej redukuje ryzyko skurczu i odpadania wysychającego tynku, ale utrudnia aplikację za pomocą typowych agregatów tynkarskich, które wymagają podawania mieszanki o konsystencji plastycznej. Przy wysokiej zawartości gliny w recepturze tynku i założonej niewielkiej ilości wody zarobowej zastosowanie typowych agregatów tynkarskich nie jest możliwe. Z tego powodu do aplikacji zaprojektowanego tynku zaproponowano technologię opisaną w patencie [12], która przewiduje nakładanie tynku metodą zbliżoną do nakładania suchego torkretu. Założono, że sposób wykonania tynku glinianego powinien polegać na szybkim zmieszaniu suchych składników

z rozpuszczalnikiem wodnym bezpośrednio przed jego nałożeniem lub w trakcie nakładania na podłoże. Podczas procesu nakładania zaprawy narzucane są suche składniki z jednoczesnym spryskiwaniem ich wodą. Woda zarobowa jest aplikowana w minimalnej ilości zapewniającej optymalne zwilżenie ziaren mieszanki oraz optymalną konsystencję roboczą pozwalającą na nałożenie zaprawy na podłoże z jej jednoczesnym wyrównaniem.

Na podstawie opisanych założeń przygotowano siedem zróżnicowanych receptur mikroklimatycznych tynków glinianych, które następnie poddano badaniom. W ramach doboru receptury tynków o optymalnych właściwościach klimatycznych przebadano właściwości sorpcyjne jedenastu różnych tynków, w tym trzech typowych powszechnie stosowanych w budownictwie oraz z wapiennym tynkiem klimatycznym (tabela 1).

Verification tests for the composed clay-based plaster mixtures

To verify the optimal composition of the clay plaster, the climate chamber method described in ISO 12571 [12] was used. This method is used to assess the ability of materials to absorb water depending on changes in the relative humidity of the surrounding air.

The climatic chamber method requires drying a sample according to the recommendations of EN ISO 12570 [13] at a specific temperature until reaching a stable mass (the clay plaster samples were dried at a temperature of 40°C). Next, the sample is placed in a climatic chamber and weighed systematically until equilibrium with the environment is achieved, i.e. stable mass of the sample.

In order to find the adsorption curve, it is necessary to provide conditions corresponding to at least 4 levels of relative air humidity in the climatic chamber. They need to be programmed in stages in the range from 30% to 95% of relative humidity. In the case of desorption curve, the initial humidity

Badania weryfikujące zaprojektowane mieszanki tynkarskie na bazie gliny

W celu weryfikacji optymalnego składu tynku glinianego użyto metody komory klimatycznej opisanej w ISO 12571 [12]. Metoda ta służy do oceny zdolności materiałów do absorbowania wody w zależności od zmiany wilgotności względnej powietrza w jego otoczeniu. Metoda komory klimatycznej wymaga wstępnego wysuszenia próbki wg zaleceń EN ISO 12570 [13] w odpowiedniej temperaturze, aż osiągnie stałą masę (próbki tynków glinianych suszono w temperaturze 40°C). Następnie próbkę umieszcza się w komorze klimatycznej i systematycznie waży aż do momentu osiągnięcia równowagi ze środowiskiem, czyli stałej masy próbki.

W celu wyznaczenia krzywej adsorpcji konieczne jest zapewnienie warunków odpowiadających co najmniej czterem poziomom wilgotności względnej powietrza w komorze klimatycznej. Należy zaprogramować je etapami od 30 do 95% wilgotności względnej. W przypadku krzywej desorpcji, po-

should be at least 95% and may correspond to the last point of the sorption curve.

During the tests in a climatic chamber the sample is weighed on a regular basis until reaching a stable mass in equilibrium with the environment. The studies were conducted using a climatic chamber (Photo 1). For the tests, plaster samples measuring 60 x 60 x 20 mm were used, with 4 samples in each series (with an exception of drywall panel samples with dimensions of 100 x 100 x 12.5 mm). The samples of earthen plasters were placed on steel sieves to provide the samples with uniform access to the air. In next steps, measurements were repeated for various air humidity values in the chamber from 20% to 95% changed by 5% – 10% at a constant temperature of 20°C. The desorption of materials was analysed similarly to stage 3, within a relative air humidity range of 95% to 20%. However, the samples were not subjected to drying before examination. The sorption tests of the plaster samples were carried out over a period of four months.

Next the clay-based plaster selected based on the sorption studies was subjected to petrographic analyses. Initially, microscopic tests were carried out on samples. A sample was used to prepare a standard specimen dedicated to microscopic tests in polarized transition light. The tests were done using a petrographic polarizing optical microscope for transition light equipped with a digital camera with a resolution of 5 Mpx and an image analyser. The volume shares of particular ingredients were found by counting the corresponding measurement points along six defined parallel measurement lines. The identification was made for 600 points in a sample. The sizes of constituents were found by measuring their largest dimensions. The identification was made for 700 grains. The results were grouped in classes (fractions) of granulation and presented in a diagram.

The identification of the qualitative composition of a mineral sample was carried out using the X-ray powder Debye-Scherrer method. A roentgenogram was recorded using an X-ray diffractometer Philips APD X'Pert PW 3020 with the following settings: CuK α radiation, reflective graphite monochromator, tube voltage 35 keV, tube current 30 mA, step scan mode: increment = 0.050 2 θ , counting time per 1 step = 1 sec. In order to eliminate the influence of the apparatus-related effects on the intensity of analytical lines, I_0 was fine-tuned in reference to a standard quartz specimen before taking sample roentgenograms. The interplanar spacings obtained from roentgenograms were used for identification of mineral phases making up the samples based on the data from ICDD [14] and computer programme XRAYAN. To increase the accuracy of the results, the fine clay fraction < 2 μ m was extracted from the sample and ana-

czątkowa wilgotność powinna wynosić co najmniej 95% i może być ostatnim punktem krzywej sorpcji.

Podczas badań w komorze klimatycznej próbka jest regularnie ważona, aż osiągnie stałą masę w stanie równowagi z otoczeniem. Badania przeprowadzono w komorze klimatycznej (fotografia 1). Zastosowano próbki tynku o wymiarach 60 x 60 x 20 mm po 4 w każdej serii (wyjątek stanowiły próbki płyt G-K, które miały wymiar 100 x 100 x 12,5 mm). Próbki tynków glinianych ustawiono na stalowych sitkach w celu zapewnienia równomiernego dostępu powietrza. W kolejnych krokach powtarzano pomiary w przypadku różnej wilgotności powietrza w komorze (20 – 95%) zmieniającej się o 5% lub 10% w stałej temperaturze 20°C. Desorpcję materiałów badano analogicznie przy wilgotności względnej powietrza 95 – 20%, ale próbek nie suszono przed badaniem. Badania sorpcyjności przygotowanych próbek tynku przeprowadzono w okresie czteromiesięcznym.

Po dokonaniu selekcji tynku na podstawie badań sorpcyjności przystąpiono do wykonania analiz petrograficznych wybranego tyn-

ku glinianego. Wstępnie próbki badano mikroskopowo przy użyciu petrograficznego, polaryzacyjnego mikroskopu optycznego do światła przechodzącego, wyposażonego w cyfrową kamerę o rozdzielczości 5 mln pikseli, z analizatorem obrazu. Udział objętościowy składników określono przez zliczenie przypadających im punktów pomiarowych, ułożonych wzdłuż ustalonych sześciu, równoległych względem siebie, linii pomiarowych. Oznaczenie wykonano w 600 punktach w próbce. Wielkość składników ustalono natomiast przez pomiar ich największego wymiaru. Oznaczenie dotyczyło 700 ziaren. Wyniki pogrupowano w klasach (frakcjach) uziarnienia i przedstawiono na wykresie.

Oznaczenie jakości składu mineralnego próbki przeprowadzono rentgenograficznie metodą proszkową Debye-Scherrer. Rentgenogram zarejestrowano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego, stosując następujące parametry: promieniowanie CuK α ; refleksyjny monochromator grafitowy; napięcie lampy 35 kV; natężenie lampy 30 mA; rejestracja krokowa: krok = 0,050 2 θ ; czas zliczania na 1 krok = 1 s. Otrzymane z rentgenogramów wartości odległości międzyplaszczynowych wykorzystano do identyfikacji faz mineralnych wchodzących w skład badanych próbek, wykorzystując dane zawarte w katalogu ICDD [14] i program komputerowy XRAYAN. W celu zwiększenia dokładności wyników z próbki wydzielono frakcję ilastą < 2 μ m, którą analizowano w preparacie orientowanym, wysuszonym w stanie powietrzno-suchym, nasyconym glikolem etylenowym i prażonym przez godzinę w temperatu-



Photo 1. Plaster samples for sorption tests in climate chamber

Fot. 1. Próbki tynku w komorze klimatycznej do badań sorpcyjności materiałów

lysed in an oriented specimen, air-dried, saturated with ethylene glycol and calcinated for 1 hour at a temperature of 560°C while recording reflections in the angle range of 0 – 30° 2θ.

The final stage of the petrographic studies was a SEM/EDS analysis. Observations of the morphology of clay constituents was done using a NOVA NANO SEM type scanning electron microscope from FEI Company equipped with an EDAX system on a natural fracture of the sample covered with a carbon layer. The petrographic analysis and the results on plaster shrinkage observed in sorption test were used for the evaluation of the mechanical application potential of the selected mixture. The selected plaster, due to its 100% clay content, required a minimal amount of water for application and therefore could not be applied using typical plastering machines. For this reason, it was proposed that the application of the designed plaster should be done using the technology described in the patent of [15]. In this method, a dry mixture is loaded into the shotcrete machine hopper and transported under pressure (generated by a compressor) through a hose with an attached sprinkling nozzle hydrating the grains of the mixture before application. Mixture grains are hydrated only on the surface with just as much water as needed for optimal grain adhesion. Another advantage of the proposed method is the possibility to use the thixotropy phenomenon occurring as a result of vibrations that affect plaster grains during their transport from the hopper to the gun of a shotcrete machine. Grain plasticization without water facilitates the consolidation of the sprayed plaster layers. In the experiment, the application of the selected plaster was done by means of shotcrete spraying machine working in cooperation with a portable screw compressor. Plaster applications were attempted by spraying various OSB panels, concrete slabs, dry-wall panels with areas of 0.6 x 0.9 m with installed spacer strips (Photo 2). After mixture spraying, the plaster surface was smoothed using an aluminium ruler.



Photo 2. Application of the selected plaster onto substrate made of OSB panels

Fot. 2. Aplikacja wybranego tynku na podłoże z płyt OSB

Currently in Europe and in the world there is a lack of normative requirements regarding the classification of the technical parameters of clay-based plasters [16]. The only document that could be useful when it comes to clay-based plaster verification is the standard DIN 18947 [17]. Compared to the requirements for plasters described in EN 998-1 [18], this standard provides dedicated methods for verifying and classifying clay plasters, taking into account their specific properties, such as water vapor adsorption tests, shrinkage measurements, and abrasion resistance of the plasters. For these reasons in order to assess the usefulness of plaster in building engineering, the plaster selected through the sorption research in line with [12] was subjected to classification studies in accordance with the procedure described in [17]. Following [17], the adsorption of water vapour by the earthen plaster mix was found for clay samples with a thickness of 15 mm, which were sealed on their side and back surface using self-adhesive aluminium

ryze 560°C, z rejestracją refleksów w zakresie kątowym 0 – 30° 2θ.

Końcowym etapem badań petrograficznych była analiza SEM/EDS. Obserwacje morfologii składników gliny prowadzono w skaningowym mikroskopie elektronowym wraz z przystawką EDAX, na przełamie naturalnym próbki pokrytej warstwą węgla. Analiza petrograficzna była pomocna do oceny możliwości aplikacji mechanicznej wybranej mieszanki. Wybrany tynk, ze względu na 100% zawartość gliny, wymagał minimalnej ilości wody używanej podczas aplikacji tynku, dlatego nie mógł być aplikowany za pomocą typowych agregatów tynkarskich. Z tych powodów zaproponowano zastosowanie innowacyjnej techniki aplikacji tynków glinianych, zbliżonej do torkretowania, opisanej w [15]. W tej metodzie suchą mieszankę, podawaną do zasobnika torkretownicy, transportuje się pod ciśnieniem (uzyskiwanym z zastosowaniem kompresora) przewodami do pistoletu zaopatrzonego w zraszacz, który optymalnie nawilża ziarna zaprawy podczas natrysku bezpośrednio przed aplikacją tynku na powierzchni ściany. Kolejną zaletą zaproponowanej metody jest możliwość wykorzystania zjawiska tiksotropii, powstającego w wyniku drgań i wibracji, którym poddawane są ziarna tynku podczas transportu z zasobnika do pistoletu torkretownicy. Dzięki tiksotropowemu uplastycznieniu ziaren bez udziału wody zwiększa się możliwość skonsolidowania natryskiwanych warstw tynku. W ramach eksperymentu do aplikacji wy-

branego tynku użyto torkretownicy współpracującej z przewoźnym kompresorem śrubowym. W ramach prób natryskiwano tynki na różne podłoża w postaci płyt OSB, płyt betonowych oraz płyt G-K o powierzchni 0,6 x 0,9 m z zainstalowanymi listwami dystansowymi zagruntowane szlammem glinianym o grubości ok. 1 mm (fotografia 2). Po natrysku mieszanki, powierzchnię tynku gładzono za pomocą łąty aluminiowej.

Obecnie w Europie i na świecie nie ma wymagań normowych, dotyczących klasyfikacji parametrów technicznych tynków glinianych [16]. Dokumentem przydatnym do weryfikacji tych tynków jest norma DIN 18947 [17]. W porównaniu z wymaganiami dotyczącymi tynków opisanych w EN 998-1 [18], norma ta podaje dedykowane metody weryfikacji i klasyfikacji tynków glinianych z uwzględnieniem ich specyficznych właściwości, m.in. adsorpcji pary wodnej, skurczu, czy odporności na ścieranie tynków. Z tych względów, w celu oceny przydatności do stosowania w budownictwie, tynk wyselekcjonowany w badaniu sorpcyjnym wg normy [12] poddano badaniom klasyfikacyjnym zgodnie procedurami opisanymi w [17]. Adsorpcję pary wodnej przez glinianą zaprawę tynkarską oznaczano na próbkach o grubości 15 mm, które zostały uszczelnione na powierzchni bocznej i tylnej za pomocą samoprzylepnej folii aluminiowej, aby sorpcja mogła zachodzić tylko na jednej powierzchni. Powierzchnia testowa

foil so that sorption could proceed on one surface only. The test area was 1089 cm² (33/33 cm). The samples dedicated to the tests were conditioned in a climatic chamber at a temperature of 23°C for a relative humidity of 50% until their masses stabilized. During the adsorption studies carried out in the climatic chamber, the relative air humidity was increased to 80% at a constant temperature in order to measure the increase of sample masses after 0.5 h, 1 h, 3 h, 6 h and 12 h. The measurements of sample mass changes were done using a scale with a precision of ≤ 0.01 g.

The final test verifying the usefulness of the designed plaster was a study of indoor climate conditions in two similar rooms covered with the selected clay-based plaster and typical cement-lime plaster. The ISO 7730 standard [19] regarding the methodology of analytical determination and interpretation of thermal comfort was used to assess the thermal comfort in the rooms by means of calculating the PMV index and criteria of local thermal comfort. PMV is an index based on thermal equilibrium of the human body. It is recommended that PMV should be in the range: $-0,5 < PMV < +0,5$.

The effectiveness of climate regulation by the use of layers of the selected earthen plaster was evaluated by conducting measurements in two neighbouring residential rooms. In room 01 (see Fig. 1) an 18-mm-thick layer of the selected plaster was applied following the shotcreting method. Room 02 was finished with machine cement-lime plaster with a thickness of 10 mm studied also as the reference material in the initial, verification sorption research (samples in test series 11 – see Table 1). Data readout was done simultaneously in both rooms and outside the building. The study of the indoor microclimate in a residential building situated in Kraków was conducted from 06.09.2022 to 18.09.2022. The measurements were carried out at 10-minute intervals.

The test was carried out using a Babuc measurement setup (Photo 3), which included a central unit (BABUC A/M), globe thermometer, wet-bulb thermometer with natural ventilation, psychrometric probe and anemometric probe. The following parameters were recorded during the study: ambient temperature, radiant temperature of partition areas, relative air humidity in the room, airflow velocity in the room and atmospheric pressure. External climate conditions (temperature and relative air humidity) were recorded simultaneously in 10-minute periods using a digital recorder EasyLog.

In both rooms (Fig. 1) the partition walls were mostly made of flat roof finished on the inside with drywall panels (sam-

wynosiła 1089 cm² (33/33 cm). Próbkę do badań kondycjonowano w komorze klimatycznej w temperaturze 23°C przy wilgotności względnej 50%, do momentu, aż ich masa się ustabilizowała. Podczas **badania adsorpcji** realizowanego w komorze klimatycznej, wilgotność względną powietrza zwiększono do 80 % w tej samej temperaturze, określając przyrost masy próbek do badań po 0,5 h, 1 h, 3 h, 6 h i 12 h. Pomiarów zmiany masy próbek dokonywano za pomocą wagi o dokładności $\leq 0,01$ g.

Końcowym badaniem weryfikującym przydatność opracowanego tynku było **badanie jakości klimatu wewnętrznego** porównywalnych pomieszczeń wykonanych odpowiednim tynkiem glinianym i typowym tynkiem cementowo-wapiennym. Do oceny komfortu cieplnego pomieszczeń zastosowano wytyczne normy ISO 7730 [19], w której zawarto metodę analitycznego wyznaczania i interpretację komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźnika PMV oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego. Wskaźnik PMV bazuje na równowadze cieplnej ciała ludzkiego. Zaleca się, aby wskaźnik ten wynosił $-0,5 < PMV < +0,5$.

W celu oceny skuteczności regulacji klimatu przez zastosowanie warstw wyselekcjonowanego tynku glinianego przeprowadzono pomiary w dwóch sąsiadujących pomieszczeniach mieszkalnych. W pomieszczeniu 01 (rysunek 1) naniesiono dobrany tynk grubości 18 mm metodą torkretowania ścian. Pomieszczenie 02 zostało wykończony maszynowym tynkiem cementowo-wapiennym o grubości 10 mm badany również jako porównawczy materiał we wstępnych, weryfikacyjnych badaniach sorpcyjnych (tabela 1, seria nr 11). Odczyt danych był dokonywany jednocześnie w obu pomieszczeniach oraz na zewnątrz budynku.

Badanie mikroklimatu wewnętrznego zostało zrealizowane w budynku mieszkalnym zlokalizowanym w Krakowie w okresie od 6.09.2022 r. do 18.09.2022 r. Pomiary prowadzono w odstępach dziesięciominutowych.

Badanie wykonano za pomocą zestawu pomiarowego Babuc (fotografia 3), który zawierał jednostkę centralną (BABUC A/M), termometr kulisty, termometr wilgotny z naturalną wentylacją, sondę psychrometryczną i sondę anemometryczną. W ramach badania prowadzono pomiary: temperatury otoczenia; temperatury promieniowania powierzchni przegrod; wilgotności względnej powietrza i prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniu oraz ciśnienia atmosferycznego. Warunki klimatu zewnętrznego (temperatura i wilgotność względna powietrza) były rejestrowane jednocześnie w dziesięciominutowych przedziałach czasowych za pomocą rejestratora cyfrowego.

W obu badanych pomieszczeniach (rysunek 1) znaczną część przegrod stanowił stropodach wykończony od strony wewnętrz-

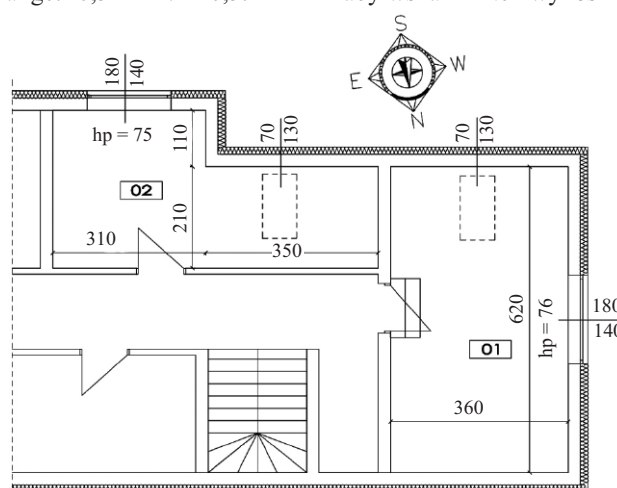


Fig. 1. Floor plan of the analysed rooms: 1 – room with clay-based plaster; 2 – room with cement-lime plaster

Rys. 1. Rzut pomieszczeń, w których wykonywano badania klimatu wewnętrznego: 1 – pomieszczenie z tynkiem glinianym; 2 – pomieszczenie z tynkiem cementowo-wapiennym

ples in test series 4 – see Table 1). During the tests, the surface layer of the floor was cement screed with a thickness of 5 cm. The percentage shares of individual partition areas in the rooms are shown in Table 2. During the tests, the rooms were not airconditioned and the changes of the indoor temperature depended mostly on the outdoor conditions as the rooms had only natural ventilation systems.

Tests results

The results of the studies on the materials' ability to absorb water vapor, conducted according to [12] ISO 12571 for samples 1 ÷ 11 (see Table 1) are shown in Fig. 2. The diagram shows clearly a lack of sorption properties of the commonly used plasters (see Fig. 2 series 4, 5 and 11), but also much worse parameters of the plaster advertised as climatic plaster (series 2).

In the tests, samples 7 and 9 were destroyed (see Photo 4) as a result of shrinkage and swelling of Montmorillonite. For this reason, the formulations related to series 7 and 9, despite their best results, were disqualified, and the composition corresponding to series 1 (which samples showed a shrinkage level of 0.46%) was selected for further investigations.

Series 1 samples were subjected to petrographic analyses in the next stage of the studies. The main constituents of the plaster turned out to be quartz grains making up 28.5% of the volume and clayey minerals corresponding to 26.7% of the volume (Table 3, Photo 5A, 6A.) Quartz grains have various shapes and degree of roundness. Smaller grains are typically sharp-edged and irregular in shape. Larger grains are better rounded. They have rounded edges and are isometric, sometimes with oval shapes. Quartz grains are accompanied by few feldspars constituting 4.1% of the volume. They are represented by microcline and plagioclase (albite). Their

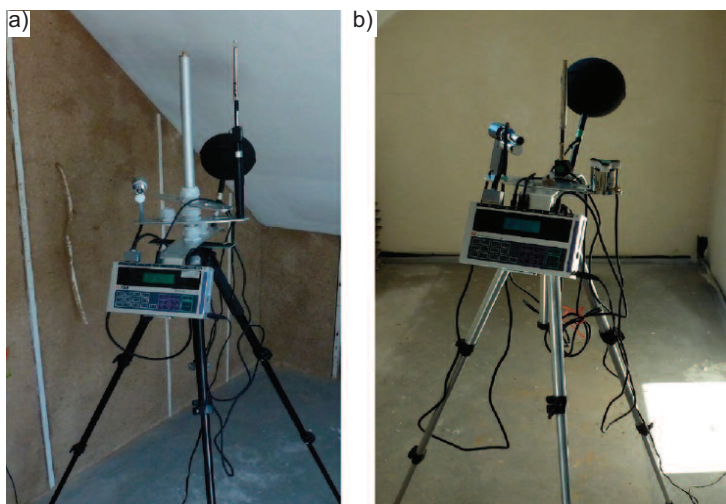


Photo 3. Thermal comfort measuring devices: a) in room no. 01; b) in room no. 02 (Fig. 1)

Fot. 3. Zestawy pomiarowe do oceny komfortu cieplnego: a) w pomieszczeniu nr 01; b) w pomieszczeniu nr 02 (rysunek 1)

Table 2. Characteristics of the partitions of tested rooms

Tabela 2. Charakterystyka przegród badanych pomieszczeń

Rooms no./ Nr pomieszczenia	Floors [m ²]/ Podłogi [m ²]	Walls [m ²]/ Ściany [m ²]	Ceilings [m ²]/ Sufity [m ²]	Total/ Suma	Percentage share of wall plasters [%]/Procentowy udział tynków ściennych [%]
01	22,3	19,9	25,9	68,1	29,2
02	17,6	24,0	18,1	59,7	40,2

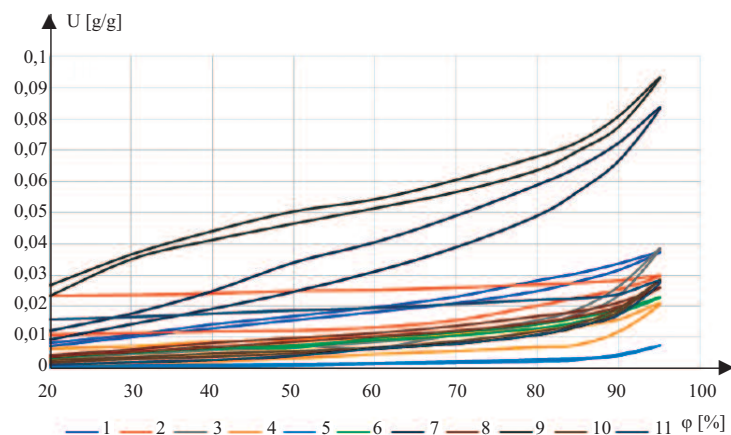


Fig. 2. Sorption test results of plaster samples 1 – 11 (Table 1)

Rys. 2. Wyniki badań sorpcyjności próbek tynków 1 – 11 (tabela 1)

nej płytami gipsowo-kartonowymi (tabela 1, próbki serii badawczej 4). Podczas badań, warstwę wierzchnią podłogi w pomieszczeniach stanowiła wylewka cementowa o grubości 5 cm. Procentowy udział poszczególnych powierzchni przegród w badanych pomieszczeniach pokazano w tabeli 2. Podczas prowadzonych badań pomieszczenia nie były ogrzewane, dlatego zmiana temperatury wewnętrznej zależała przede wszystkim od warunków zewnętrznych, ponieważ w pomieszczeniach działała jedynie naturalna wentylacja grawitacyjna.

Wyniki badań

Wyniki badania zdolności materiałów do absorbowania pary wodnej, przeprowadzonych na próbkach 1 ÷ 11 (tabela 1) wg [12] pokazano jako zmianę masy zawartości wilgoci w stanie równowagi U przy określonej wilgotności względnej powietrza w otoczeniu próbki φ (rysunek 2). Na wykresach wyraźnie widać brak właściwości sorpcyjnych powszechnie stosowanych tynków (seria 4, 5 oraz 11), ale także znacznie gorsze parametry tynku oferowanego jako tynk klimatyczny (seria 2).

W wyniku przeprowadzonych testów, próbki serii 7 i 9 uległy destrukcji (fotografia 4), będącej rezultatem skurczu i pęcznienia montmorillonitu. Z tych względów receptury serii 9 i 7, pomimo najlepszych parametrów sorpcyjnych, zostały zdyskwalifikowane, natomiast do dalszych testów wytypowano recepturę serii 1, której próbki wykazały skurcz na poziomie 0,46%.

W kolejnym etapie badań próbki serii 1 poddano analizom petrograficznym. Głównymi składnikami dobranej gliny okazały się ziarna kwarcu mające udział 28,5% obj. i minerały ilaste stanowiące 26,7% jej objętości (tabela 3, fotografie 5A i 6A). Ziarna kwarcu mają zróżnicowane kształty i stopień obtoczenia. Mniejsze z nich są zwykle ostrokrawędziste o nieregularnych kształtach. Ziarna większe są lepiej obtoczone. Mają za-

presence was also confirmed by X-ray studies (Fig. 3, 4). Similar to the case of quartz, larger specimens of feldspar exhibit better roundness and greater isometry. Quartz and feldspar grains have sizes in the range of 0.005 – 1.00 mm, wherein grains smaller than 0.125 mm make up 82.3% of the volume.

Clayey minerals occur among the grains described above. They are blade-shaped with sizes smaller than 2 μm making larger packets, which are usually aligned in the form of thin rims around the grains, constituting a sort of a contact-like binder. They also occur in the form of larger concentrations in spaces between the grains of quartz and feldspar (Photo 6A). The X-ray analysis demonstrated that these are minerals from the group of monmorillonite (smectite) and illite with admixtures of ferrous chlorite and kaolinite (Fig. 3, 4). The dominant presence of montmorillonite and illite was confirmed by SEM studies (Photo 6 B, C.). Clayey minerals are accompanied by muscovite blades (6.3% of the volume) and concentrations of glauconite (1.4% of the volume) and iron hydroxides (5.2% of the volume). The latter minerals are responsible for yellowish colouration. A substantial share (15.4% of the volume) is made up by concentrations of microcrystalline calcite (see Photo 5B, 6D; Fig. 3, 4). They have various sizes from 0.05 to 0.9 mm. Often, smaller quartz grains are entrapped in their vicinity. In clay there are sulfate minerals: anhydrite constituting 8.8% of the volume and gypsum (3.6% of the volume). Gypsum occurs as individual, elongated crystals with lengths in the range from 0.04 to 0.1 mm, usually concentrated in the form of aggregates with sizes up to 1.3 mm (Photo 5C and 6D, F). Anhydrite takes more irregular forms (Photo 6D). Plaster mixture 1 was also subjected to sorption tests in ac-



Photo 4. Some of plaster samples after sorption tests – destruction of series 9 samples is visible

Fot. 4. Część próbek tynków po badaniu sorpcyjności – widoczna destrukcja próbek serii 9

Table 3. Clay mineral composition
Tabela 3. Skład mineralny gliny

Constituent/Składnik	Constituent share [volume %] Udział składnika [% obj.]
Quartz/Kwarc	45,7
Feldspar/Skalenie	4,1
Muscovite/Muskowit	6,3
Glauconite/Glaukonit	1,4
Calcite/Kalcyt	15,4
Gypsum/Gips	3,6
Anhydrite/Anhydryt	8,8
Ferric oxides/Wodorotlenki żelaza	5,2
Clayey minerals/Minerały ilaste	26,7
Total/Suma	100,0

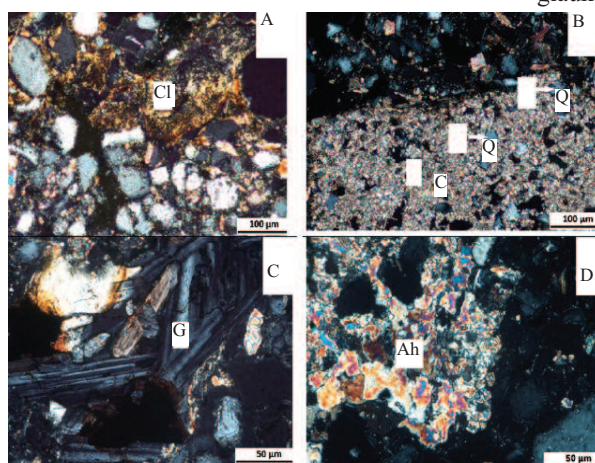


Photo 5. Microscopic image in transition light. Crossed polarizers: A – concentration of clay minerals (Cl) between quartz grains; B – concentration of microcrystalline calcite (C) containing fine quartz grains (Q); C – concentration of gypsum crystals (G); D – concentration of anhydrite (Ah)

Fot. 5. Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym. Polaryzatory skrzyżowane: A – skupienie minerałów ilastych (Cl) między ziarnami kwarcu; B – skupienie mikrokrystalicznego kalcytu (C) zawierające drobne ziarna kwarcu (Q); C – skupienie kryształów gipsu (G); D – skupienie anhydrytu (Ah)

okrągłone krawędzie i są izometryczne, czasem o owalnym kształcie. Ziarnom kwarcu towarzyszą nieliczne skalenie obecne w udziale 4,1% obj. Reprezentowane są przez mikroklin i plagioklasy (albit). Ich obecność potwierdziły także badania rentgenograficzne (rysunki 3, 4). Podobnie jak w przypadku kwarcu, większe osobniki skaleni wykazują lepsze obtoczenie i większą izometryczność. Ziarna kwarcu i skaleni mają wielkość w zakresie 0,005 – 1,00 mm, przy czym 82,3% obj. stanowią ziarna o wielkości poniżej 0,125 mm.

Pomiędzy opisanymi ziarnami występują minerały ilaste. Mają one postać blaszek o wielkości mniejszej niż 2 μm, tworzących większe pakiety, które zazwyczaj ułożone są w formie cienkich otoczek wokół ziaren, tworząc swoistą formę spoiwa o charakterze kontakto-wym. Występują także w formie większych skupień w przestrzeni między ziarnami kwarcu i skaleni (fotografia 6A). Analiza rentgenograficzna wykazała, że są to minerały z grupy montmorillonitu (smektytu) i illitu z domieszkami żelazistego chlorytu i kaolinitu (rysunki 3, 4). Obecność dominujących ilości montmorillonitu i illitu potwierdziły badania SEM (fotografie 6B i 6C). Minerałom ilastym towarzyszą blaszki muskowitu (6,3% obj.) oraz skupienia glaukonitu (1,4% obj.) i wodorotlenków żelaza (5,2% obj.). Te ostatnie nadają glinie żółtawe zabarwienie. Znaczny udział (15,4% obj.) stanowią skupienia mikrokrystalicznego kalcytu (fotografie 5B, 6D i rysunki 3, 4). Mają one zróżnicowaną wielkość od 0,05 do 0,9 mm. Niejednokrotnie zamknięte są w ich obrębie mniejsze ziarna kwarcu. W glinie występują także minerały siarczanowe: anhydryt stanowiący 8,8% obj. i gips (3,6% obj.). Gips ma postać pojedynczych, wydłużonych kryształów o długości 0,04 – 0,1 mm, które są zazwyczaj skupione w formie agregatów o wielkości dochodzącej do 1,3 mm (fotografie 5C i 6D, F). Anhydryt przybiera formy bardziej nieregularne (fotografia 6D). Mieszanekę tynku 1, pobraną podczas apli-

cordance with [17] in order to carry out product classification. The results of the studies allowed concluding that series 1 plaster exhibited according to [7] the highest adsorption class WSIII.

Based on the measurements conducted in this work of the parameters of indoor climate, the PMV index was calculated for each data readout. The calculations of the PMV index were carried out based on the assumptions regarding the user's activity and clothing for a residential room. The changes of the PMV index in both rooms in the analysed period of time are shown in Fig. 5.

Summary

The applied method of plaster verification through studies of sorption properties of plaster samples according to the [12] guidelines proved to be effective. A disadvantage of this testing method is a long time needed for the research. Therefore, in order to reduce the time of the procedure it is advisable to follow the testing method described in [17], which additionally verifies the time of plaster reaction on humidity changes in the environment. An advantage of the first method is its ability to verify the changes in sorption properties (sorption and desorption) of the designed plasters in a wide range of humidity variations with respect to the surroundings. However, the usefulness of the plasters is best assessed based on the range of relative air humidity changes in residential rooms, i. e. the range of 40 – 80 %. The desorption process is also crucial for the evaluation of plasters. For example, comparing changes in ambient humidity for clay plaster from series 1 and cement-lime plaster from series 11 (see Fig. 2), the properties of both plasters are similar. However, the desorption test results clearly indicate that the absorbed moisture is bound in the chemical processes of the maturing plaster. Additionally, testing plasters at humidity levels above 80% provides a better opportunity to verify the effects of

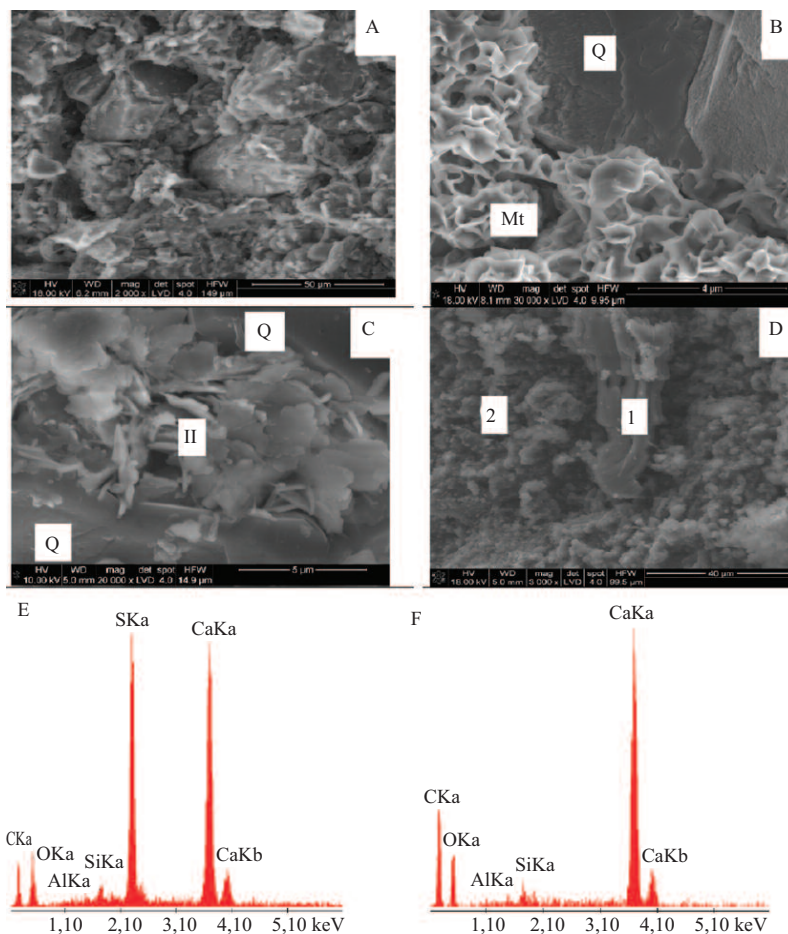


Photo 6. Scanning electron microscopic image (SEM): A – quartz grains and clayey minerals between them as a binder; B – montmorillonite concentration (Mt) adjacent to quartz grains (Q); C – illite concentration (II) between quartz grains (Q); D – gypsum crystal (1) surrounded by microcrystalline calcite (2); E – EDS spectrum from position 1 (gypsum); F – EDS spectrum from position 2 (calcite)

Fot. 6. Obraz ze skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM): A – ziarna kwarcu i występujące między nimi minerały ilaste stanowiące spoiwo; B – skupienie montmorillonitu (Mt) przylegające do ziarna kwarcu (Q); C – skupienie illitu (II) między ziarnami kwarcu (Q); D – kryształ gipsu (1) w otoczeniu mikrokrystalicznego kalcytu (2); E – widmo EDS pozycji 1 (gips); F – widmo EDS pozycji 2 (kalcyt)

kacji maszynowej, poddano badaniom sorpcji w celu dokonania klasyfikacji produktu zgodnie z normatywnymi niemieckimi [17]. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że tynk serii 1 miał najwyższą klasę adsorpcji WSIII wg [17].

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów parametrów klimatu wewnętrznego obliczono wskaźnik PMV w przypadku każdego odczytu danych. Obliczenia wskaźnika PMV dokonano na podstawie założeń dotyczących aktywności i ubioru użytkownika obowiązujących w przypadku pomieszczenia mieszkalnego. Zmianę wskaźnika PMV w obu pomieszczeniach w czasie okresu pomiarowego pokazano na rysunku 5.

Podsumowanie

Zastosowana metoda weryfikacji tynków przez badanie właściwości sorpcyjnych próbek tynku wg zaleceń [12] okazała się

skuteczna. Mankamentem tej metody jest długi czas realizacji badań, dlatego w celu przyspieszenia weryfikacji tynków warto zastosować metodę badań opisaną w [17], która dodatkowo weryfikuje szybkość reakcji tynków na zmianę wilgotności otoczenia. Zaletą metody zgodnej z [12] jest możliwość weryfikacji zmian właściwości sorpcyjnych (sorpcji i desorpcji) projektowanych tynków w szerokim zakresie zmian wilgotności względnej otoczenia. Do oceny przydatności tynków najbardziej wskazany jest jednak zakres zmian wilgotności w pomieszczeniach mieszkalnych przy wilgotności względnej powietrza 40 – 80%. Do oceny tynków istotny jest również proces desorpcji, np. porównując w tych warunkach wilgotności otoczenia tynk gliniany serii 1 i tynk cementowo-wapienny serii 11 (rysunek 2), właściwości obu tynków są zbliżone, ale wyniki badań desorpcji wyraźnie wskazują, że absorbowana wilgoć jest wiązana w procesach chemicznych dojrzewającego tynku. Poza tym badanie tynków przy wilgotności ponad 80% daje większą możli-

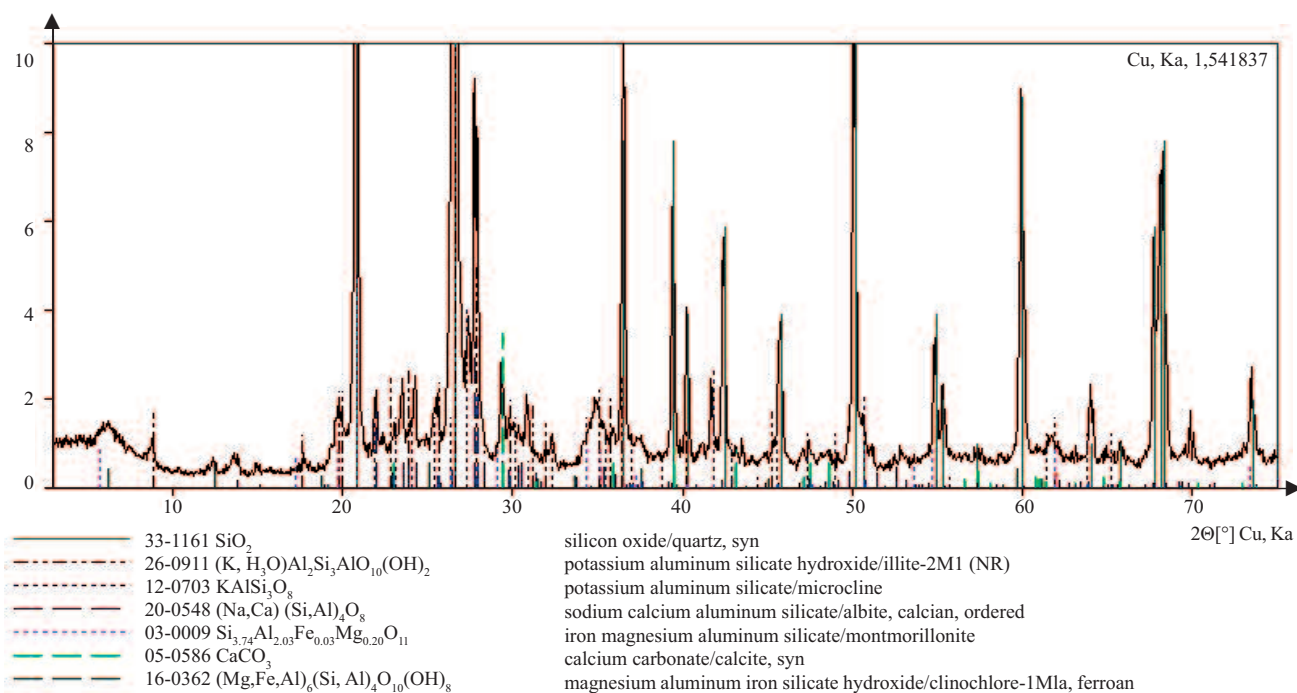


Fig. 3. X-ray diffractogram of clay. Results of qualitative analysis: quartz (33-1161); illite (26-0911); microcline (12-0703); albite (20-0548); montmorillonite (03-0009); calcite (05-0586); clinochlore (16-0362). Numbers in brackets refer to models of identified minerals in the [13] database

Rys. 3. Dyfraktogram rentgenowski gliny. Wyniki analizy jakościowej: kwarc (33-1161); illit (26-0911); mikroklin (12-0703); albit (20-0548), montmorillonit (03-0009); kalcyt (05-0586), klinochlor (16-0362). W nawiasach podano numery wzorców zidentyfikowanych minerałów w kartotece [13]

swelling components of the plasters, which significantly impact the assessment of the durability of plaster coatings.

To evaluate the suitability of the selected plaster, it was necessary to conduct additional tests beyond the described sorption tests. These included verification of shrinkage, compressive strength, flexural strength, and assessment of plaster adhesion to basic building substrates. The conducted tests on the physical properties of the plaster confirmed the suitability of the proposed mix for use in modern construction. However, the available literature lacks testing methods for assessing the durability of plasters subjected to sorption and desorption cycles, which affect their performance characteristics.

The composition of the series 1 plaster selected in the initial verification phase turned out to be optimal in terms of its physical and chemical properties. Most of the plaster components, i. e. clayey minerals, calcite, gypsum, anhydrite and glauconite play a role of a binder in clay connecting other gra-

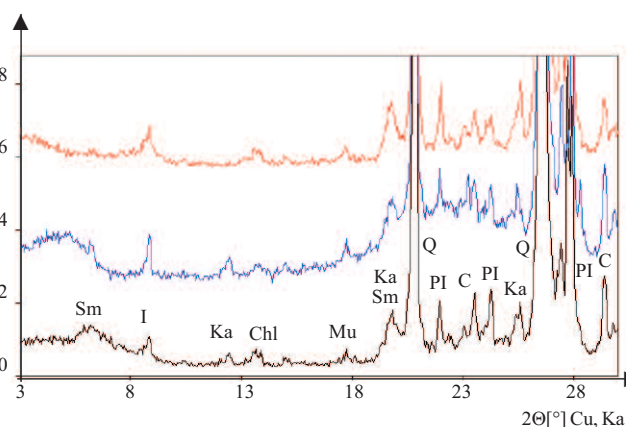


Fig. 4. X-ray diffractograms of clay. Black line – specimen in air-dry state, blue line – specimen saturated with ethylene glycol, red line – specimen scorched for an hour at 560°C. Symbols: Sm – smectite (montmorillonite), I – illite, Ka – kaolinite, Chl – chlorite, Mu – muscovite, Q – quartz, Pl – plagioclase, C – calcite

Rys. 4. Dyfraktogramy rentgenowskie gliny. Linia czarna: preparat w stanie powietrzno-suchym; linia niebieska – preparat nasycony glikolem etylenowym, linia czerwona – preparat prażony przez godzinę w temperaturze 560°C. Stosowane oznaczenia: Sm – smektyt (montmorillonit), I – illit, Ka – kaolinit, Chl – chloryt, Mu – muskowitz, Q – kwarc, Pl – plagioklaz, C – kalcyt

ność weryfikacji skutków pęcznienia składników tynków, które mają ważny wpływ na ocenę trwałości wypraw tynkarskich.

W celu oceny możliwości stosowania dobranego tynku konieczne było oprócz opisanych badań sorpcyjnych, przeprowadzenie dodatkowych testów weryfikujących skurcz, wytrzymałość na ściskanie i na zginanie oraz oceny przyczepności tynku do podstawowych podłoży budowlanych. Badania te potwierdziły przydatność zaproponowanej mieszanki do stosowania w nowoczesnym budownictwie. W dostępnej literaturze brakuje jednak metod badawczych

do oceny trwałości tynków poddawanych cykлом sorpcji i desorpcji, które mają wpływ na ich cechy użytkowe. Skład dobranego we wstępnej weryfikacji tynku serii I okazał się optymalny ze względu na jego właściwości fizyczne i chemiczne. Większość składników tynku, tj. minerały ilaste, kalcyt, gips, anhydryt i glaukonit, pełni w glinie funkcję spoiwa łączącego ze sobą pozostałe ziarna. Ich zróżnicowa-

ins. Their diverse chemism (carbonates, sulfates and silicates) causes that as a binder they play various functions in the developed plaster. The presence of gypsum and anhydrite has an influence on plaster cohesion, binding time, it reduces shrinkage and, in a narrow range, stabilizes the air humidity. A substantial share of microcrystalline calcium carbonate (calcite) improves workability, adhesion, elasticity and micro-damage self-healing ability. The presence of clayey minerals, in particular montmorillonite that relatively easily absorbs in its structure the hydroxyl group (-OH), determines the sorption properties of clay. The complex molecular structure and microscopic dimensions of blades and grains of the minerals constituting the binder and the characteristic alignment of its aggregates in the form of thin rims on grains or tiny concentrations partially filling in pores gives the clay in question thixotropic properties.

It is mainly the thixotropic properties of the plaster that make it possible to use the innovative machine-assisted technology to apply the material of natural origin that does not require additives or a complicated production technology. The production of the selected plaster requires only extracting the material from a natural deposit, drying it using solar energy, and then crushing and packing it into the so-called big bags as ready-for-use material. Based on the plastering work carried out in the laboratory, it can be stated that the quality of the plaster mix used is very high. Both its visual effect and technical parameters (adhesion, hardness, sorption parameters) allow stating that the developed plaster mixture has high application potential. The innovative technology of plastering clay walls offers considerable savings on production costs and a reduced time of executing finishing layers. An additional important advantage of the developed plasters is their easy utilization and recycling of both the plaster itself and the waste originating from plaster application works.

A comparison of indoor climate comfort parameters of the test rooms confirmed that the climate of the residential rooms finished with the selected plaster (see Tables 1 and 2) was improved in comparison to the climate of the rooms with typical cement-lime plaster (see Fig. 5). In the rooms with the earthen plaster during the test period there was a stable climate without sudden temperature or relative air humidity changes

The average air temperature during the study period was approximately 3.2°C lower. The clay plaster layers reduced fluctuations in relative air humidity to about 20% during the measurement period, compared to relative humidity differences of up to 58% in a room finished with cement-lime plaster.

ny skład chemiczny (węglany, siarczany i krzemiany) sprawia, że jako spoiwo pełnią różne funkcje w dobranym tynku. Obecność gipsu i anhydrytu wpływa na spoiwość tynku, czas wiązania, ogranicza skurcz i w pewnym, niewielkim zakresie utrzymuje stabilną wilgotność powietrza. Duży udział mikrokrystalicznego węgla wapnia (kalcytu) poprawia urabialność, przyczepność, elastyczność i zdolność do samoleczenia mikrouszkodzeń. Obecność minerałów ilastych, przede wszystkim montmorillonitu dosyć łatwo absorbującego grupę hydroksylową (-OH), decyduje o właściwościach sorpcyjnych gliny. Złożona budowa molekularna, mikroskopijne wielkości blaszek i ziaren minerałów tworzących spoiwo oraz charakterystyczny sposób ułożenia ich agregatów w formie cienkich otoczek na ziarnach lub drobnych skupień częściowo wypełniających pory sprawia, że omawiana glina ma właściwości tiksotropowe, dzięki którym można było zastosować innowacyjną technikę maszynową do aplikacji tynku pochodzenia naturalnego niewymagającego stosowania domieszek ani skomplikowanej technologii produkcji. Wytwarzanie omawianego tynku polega na wydobyciu materiału ze złoża, wysuszeniu go energią słoneczną, pokruszeniu i zapakowaniu do worków typu big bag.

Na podstawie wykonanych prac tynkarskich w pomieszczeniu badawczym stwierdzono bardzo dobrą jakość zastosowanego tynku. Zarówno pod względem wizualnym, jak i parametrów technicznych (przyczepność, twardość, parametry sorpcyjne). Innowacyjna technologia tynkowania pozwala na znaczne oszczędności kosztów produkcji i skrócenie czasu wykonywania warstw wykończeniowych. Dodatkową, ważną zaletą opracowanych tynków jest łatwość utylizacji i recyklingu zarówno samego tynku, jak i odpadu powstającego podczas aplikacji tynku.

Porównanie parametrów komfortu klimatu wewnętrznego badanych pomieszczeń potwierdziło poprawę klimatu w pomieszczeniach mieszkalnych wykończonych dobranym tynkiem (tabela 1 i 2) w porównaniu z pomieszczeniami z typowym tynkiem cementowo-wapiennym (rysunek 5). W okresie badawczym w pomieszczeniach z tynkiem glinianym panował stabilny klimat bez nagłych zmian temperatury i wilgotności

względnej powietrza. Warstwy tynku glinianego spowodowały zmniejszenie średniej temperatury o ok. 3,2°C i ograniczenie wahań wilgotności względnej powietrza w okresie prowadzenia pomiarów do ok. 20%, podczas gdy w pomieszczeniu wykończonym tynkiem cementowo-wapiennym różnica wilgotności względnej dochodziła do 58%. Moż-

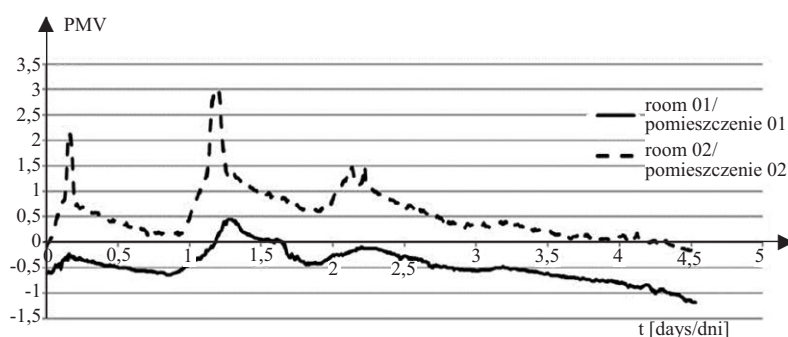


Fig. 5. Distribution of the Predicted Mean Vote (PMV index) between 16th and 20th of September 2022, in the room 01 (Fig. 1), finished with clay plaster (Series 1, Table 1), and in the room 02 (Fig. 1), finished with cement-lime plaster (series 11, Table 1)

Rys. 5. Rozkład wskaźnika statystycznego odczuwania ciepła PMV w kolejnych dniach pomiarów prowadzonych w okresie od 16.09.22 do 20.09.22 w pomieszczeniu 01 (rysunek 1) wykończonym tynkiem glinianym serii 1 (tabela 1) i w pomieszczeniu 02 (rysunek 1) wykończonym tynkiem cementowo-wapiennym serii 11 (tabela 1)

Therefore, as a result of the conducted studies, it can be concluded that the use of clay plaster, besides improving indoor climate comfort, may allow for the reduction of cooling costs in rooms.

Given the 100% natural origin of the plaster and the use of solar energy in its production, the selected material is characterized by a very low CO₂ equivalent. As a result, the plaster conforms to the most up-to-date pro-ecological trends in the building industry aiming at a reduction of the so-called carbon footprint in building technologies. The selected material represents a type of clay that is readily available in Central Europe. Therefore, this material can be widely used as a component of machine-applied plasters produced for the needs of energy-efficient buildings in Europe.

The research work described in this paper was supported by a grant awarded within the European Funds for Małopolska 2021-2027 – Priority I Funds for research, development and entrepreneurship in the years 2021-2027, project no. RPMP.01.02.03-IP.01-12-009/21 in cooperation with the company Formes Sp. z o.o. The research was supported by AGH University of Science and Technology (contract no. 16.16.140.315).

Received: 06.05.2024

Revised: 03.07.2024

na więc stwierdzić, że zastosowanie tynku glinianego, poza poprawą komfortu klimatu wewnętrznego, umożliwia ograniczenie kosztów chłodzenia pomieszczeń.

Ze względu na w 100% naturalne pochodzenie tynku i wykorzystanie energii słonecznej do jego produkcji charakteryzuje się on bardzo niskim ekwiwalentem CO₂. Dzięki temu odpowiada on najnowszemu trendom proekologicznym w budownictwie, zmierzającym do redukcji tzw. śladu węglowego w technologiach budowlanych. Dobry materiał wytwarzany jest z glin łatwo dostępnych w Europie Środkowej, dlatego może być powszechnie stosowany jako składnik tynków maszynowych produkowanych na potrzeby europejskiego budownictwa energooszczędnego.

Prace badawcze opisane w artykule zostały wsparte grantem przyznany w ramach Europejskich Funduszy dla Małopolski 2021-2027 – Priorytet I Fundusze europejskie dla badań i rozwoju przedsiębiorczości w latach 2021-2027, projekt nr RPMP.01.02.03-IP.01-12-009/21 we współpracy z firmą Formes Sp. z o.o. Praca była współfinansowana przez AGH Akademię Górniczo-Hutniczą (nr umowy 16.16.140.315).

Wpłynął do redakcji: 06.05.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.07.2024 r.

Literature

- [1] EPBD. Energy Performance of Buildings Directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.
- [2] Santos T, Gomes MI, Coelho F, Faria P. Earth-based and current plasters: assessment of efficiency and contribution to indoor air quality, 5th Historic Mortars Conference: 19-21 June 2019, Pamplona, Spain, 2019. RILEM Publications.
- [3] Lagouin M, Aubert JE, Laborel-Préneron A, Magniont C. Influence of chemical, mineralogical and geotechnical characteristics of soil on earthen plaster properties. *Constr Build Mater* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124339>.
- [4] Minke G. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser Basel 2005. <https://doi.org/10.1007/3-7643-7873-5>.
- [5] EN 12524 Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values.
- [6] Darling EK, Cros CJ, Wargocki P, Kolarik J, Morrison GC, Corsi L. Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements. *Build Environ*. 2012; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.004>.
- [7] Lima J, Faria P. Eco-efficient earthen plasters: The influence of the addition of natural fibers, in: RILEM Bookseries. Kluwer Academic Publishers 2016. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_24.
- [8] Maddison M, Mauring T, Kirsimäe K, Mander Ü. The humidity buffer capacity of clay– sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands. *Build. Environ*. 2009; vol. 44, no. 9: 1864-8.
- [9] Emiroğlu M, Yalama A, Erdoğan Y. Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios. *Appl Clay Sci* 2015. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.005>.
- [10] Mercan E, Yilmazer S. Study of physical and mechanical properties of aerogel-modified expanded perlite aggregate and clay (AEP/C) board. *Constr Build Mater*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129602>.
- [11] Faria P, Lima J, Nabais J, Silva V. Assessment of adhesive strength of an earth plaster on different substrates through different methods, 5th Historic Mortars Conference: 19-21 June 2019, Pamplona, Spain, 2019. RILEM Publications.
- [12] ISO 12571: 2021 Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties.
- [13] EN ISO 12570 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of moisture content by drying at elevated temperature.
- [14] International Centre for Diffraction Data (ICDD) (2005) Powder Diffraction File PDF-2. Pennsylvania.
- [15] Sroczyński A. 2020. European Patent No. EP 3325427, Formes Sp. z o.o., Zielonki, PL, 2020.10.21
- [16] Delinière R, Aubert JE, Rojat F, Gasc-Barbier M. Physical, mineralogical and mechanical characterization of ready-mixed clay plaster. *Building and Environment* 2014; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.012>
- [17] DIN 18947:2013-08 Lehmputzmörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren.
- [18] EN 998-1 Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar.
- [19] ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.