

Anna Ostańska*, Danuta Barnat-Hunek**

Ocena efektywności dociepleń od strony wewnętrznej na przykładzie zabytkowego obiektu szpitalnego w Tworkach

Evaluation of the effectiveness of the insulation from the inside on the example of the historical hospital building in Tworki

Słowa kluczowe: cechy cieplno-wilgotnościowe, docieplenia obiektów zabytkowych, kondensacja międzywarstwowa, punkt rosy

Key words: thermal and moisture properties, thermal insulation of heritage buildings, interstitial condensation, dew point

WPROWADZENIE

Modernizacja energetyczna eksploatowanych zasobów mieszkaniowych, w tym obiektów zabytkowych, stała się priorytetem działań gospodarczych w ostatnich latach. Znaczenie jej podkreśla fakt dążenia do minimalizowania zużycia energii pierwotnej [1]. Wprowadzenie przepisów dyrektywy UE 2006/32/WE3 z 17 maja 2006, która nakłada na Polskę obowiązek podjęcia działań w celu zmniejszenia zużycia energii końcowej przez użytkowników obiektów w kolejnych dziewięciu latach począwszy od 1 stycznia 2008 r. Według dyrektywy zobowiązanie polskiej gospodarki do oszczędzania energii powinno wynieść w sumie około 53 500 GWh [2]. W celu poprawy efektywności energetycznej w sektorze mieszkaniowym przyjęto jako priorytet promowanie kontynuacji procesu termomodernizacyjnego i stosowania odnawialnych źródeł energii w budynkach [3].

Analiza badania Głównego Urzędu Statystycznego (1997-2007) potwierdziła, że zużycie energii końcowej w sektorze polskich gospodarstw domowych jest głównie wykorzystywane do ogrzewania budynków i wynosi prawie 31%–71% [1]. Oznacza to, że średnia jest zbliżona do zużycia energii końcowej w Europie, które wynosi około 50% [2, 4]. Wpływ termoizolacji budynków na środowisko, a zwłaszcza zu-

INTRODUCTION

Improving energy conservation in housing resources, including heritage buildings, has come to be an economic priority in recent years. The importance of this priority stems from a need to minimise the use of primary energy resources [1]. Implementation of regulations pursuant to the EU Directive 2006/32/WE3 dated 17th May 2006 means that Poland is obliged to undertake actions aimed at reducing final energy use in buildings over a period of nine years starting on 1st January 2008. According to the Directive, the Polish economy should achieve energy savings amounting to approx. 53,500 GWh [2]. Improving the energy effectiveness in the housing sector means promoting thermal insulation and applying renewable energy in buildings [3].

Analysis of National Statistical Office data (1997-2007) has confirmed that final energy use in Polish households is mainly focused on heating buildings, making up from 31% to 71% of energy use [1]. This means that the average value for final energy use is comparable to that of Europe, which is about 50% [2, 4]. The influence of thermal insulation of buildings on the environment, especially due to fuel consumption during building exploitation and environmental pollution caused by CO₂ emissions has been addressed

* Katedra Architektury, Urbanistyki i Planowania Przestrzennego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka nr 40, 20-618 Lublin, Polska, email: a.ostanska@pollub.pl

** Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka nr 40, 20-618 Lublin, Polska, e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl

* Department of Architecture, Urban Studies and Spatial Planning, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin Technical University, 40 Nadbystrzycka Street 40, 20-618 Lublin, Poland, email: a.ostanska@pollub.pl

** Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin Technical University, 40 Nadbystrzycka Street 40, 20-618 Lublin, Poland e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl

życie paliwa podczas eksploatacji i zanieczyszczenie środowiska spowodowane emisją CO₂ jest zagadnieniem wielokrotnie poruszonym w literaturze [5, 6, 7, 8]. Dane literaturowe wskazują, że w Polsce zapotrzebowanie na energię końcową związane z centralnym ogrzewaniem stanowi około 41,5%, wentylacją ok. 30%, a przygotowaniem ciepłej wody 12,5% [9].

Z tego powodu termomodernizacja staje się znaczącym potencjałem, jednak inwestycje termoizolacyjne nie zawsze są ekonomicznie i ekologicznie uzasadnione [4]. Przykładowo zastosowanie materiału izolacyjnego o wysokich parametrach cieplnych winno implikować optymalną jego grubość, wówczas koszt prac termomodernizacyjnych określony za pomocą wskaźnika rentowności przekłada się na krótki okres zwrotu poniesionych nakładów [3, 10]. W przypadku modernizacji energetycznej budynku eksploatowanego istotnym czynnikiem obniżającym wskaźnik rentowności są szkody powstałe w wyniku bezpośredniego lub pośredniego działania wilgoci w przegrodach zewnętrznych. Przyczyną zawilgocenia jest kondensacja międzywarstwowa w przegrodzie spowodowana dużą różnicą temperatury wewnętrznej i zewnętrznej [11, 12]. Cechy fizykochemiczne, w tym wilgotność, są ważnym czynnikiem wpływającym na jakość powietrza, komfort cieplny, zużycie energii w budynkach i trwałość materiałów budowlanych [13, 14].

Renowacja termiczna w obiekcie zabytkowym licowanym cegłą jest problemem złożonym ze względu na brak możliwości docieplania od zewnątrz. W obiektach zabytkowych, wznoszonych bez zastosowania właściwych izolacji poziomych, powinno być uwzględnione zjawisko nadmiernego zawilgocenia. Transportowane roztwory solne w murze prowadzą do zniszczenia struktury cegły w wyniku wielokrotnych procesów zamarzania i rozmrażania w okresie zimowym oraz zjawiska krystalizacji soli rozpuszczonych. Ponadto materiały zawierające sól charakteryzują się wyższą wilgotnością niż materiały bez soli [15]. W niedocieplonych obiektach zabytkowych zjawisko kondensacji występuje w przypadku zawilgocenia, niedostatecznej izolacyjności termicznej ścian oraz niesprawnej wentylacji pomieszczeń [16], co powoduje powstawanie mostków termicznych. Dotyczy to szczególnie przegród w strefie przyziemia, w których transport wody podciąganej kapilarnie w istotny sposób wpływa na proces przepływu ciepła, zwiększając przewodnictwo cieplne materiałów porowatych 4–6-krotnie, co potwierdzono w pracach [17, 18]. Woda w murze pośrednio negatywnie działa na środowisko wewnętrzne pomieszczeń, tworząc podłoże do rozwoju szkodliwych mikroorganizmów oraz grzybów pleśniowych [19, 20, 21], co może w konsekwencji doprowadzić do nieefektywnego wykonania docieplenia, rozwoju procesów korozji biologicznej i chemicznej, a także wzrostu kosztów eksploatacji. Niekorzystne, zmienne warunki wilgotności i temperatury wpływają na wzrost pleśni, co potwierdziły wyniki badań laboratoryjnych [20, 22, 23]. Zapewnienie odpowiednich warunków w pomieszczeniu, niedopuszczenie do kondensacji międzywarstwowej w przegrodzie może odegrać znaczącą rolę w ograniczeniu wzrostu grzybów w pomieszczeniach [20]. Wzrost wilgoci powoduje również zmianę mikroklimatu środowiska wewnętrznego, obniżenie komfortu cieplno-wilgotnościowego, co u użytkowników wywołuje choroby dróg oddechowych, infekcje, alergie oraz podrażnienia oczu i skóry [19, 24].

Analizę cech fizykochemicznych, sposób wyboru rozwiązań zaprezentowano na konkretnym obiekcie badań.

Przedmiotem analizy jest pawilon nr V znajdujący się na terenie Szpitala Psychiatrycznego przy ul. Partyzantów 2-4 w Pruszkowie k. Warszawy [25].

repeatedly in the literature [5, 6, 7, 8]. Data in the literature indicate that Poland's final energy demand is approx. 41.5% for central heating, approx. 30% for air conditioning and approx. 12.5% for water heating [9].

For these reasons, upgrading thermal performance is seen as representing significant potential, even though investment in thermal insulation is not always justified on economic and environmental grounds [4]. For example, applying insulation materials of high thermal quality parameters should determine optimal thickness of insulation, in which case the costs of thermal modernisation as determined by indicators of economic viability translate into a short return on investment [3,10]. In the case of upgrading the energy performance of a building in use, a significant factor which can reduce economic viability is related to damage arising directly or indirectly from moisture present in external walls. Dampness of walls is caused by interstitial condensation which arises from large temperature differences between the inside and outside of the building [11, 12]. The physical and chemical parameters, including moisture, are important factors influencing air quality, thermal comfort, energy use in buildings and sustainability of building materials [13, 14].

Thermal upgrading of a heritage building with a brick façade is a complex problem as it is not possible to insulate from the outside. In heritage buildings built without appropriate floor insulation, the prospect of excessive damp needs to be taken into account. Transmission of salt solutions through walls leads to destruction of the brick structure due to repeated freezing and thawing in winter and crystallisation of dissolved salts. Moreover, materials containing salt are characterised by higher moisture content than salt-free materials [15].

In uninsulated heritage buildings, condensation appears where there is moisture, insufficient thermal insulation of walls and ineffective ventilation [16], resulting in thermal bridges. This relates especially to basement walls, where water is drawn in by capillary processes and influences heat transfer significantly, increasing the heat conductivity of porous materials four to six fold. This has been confirmed in research [17, 18]. Water in the wall has an indirect negative environmental impact inside the building, creating conditions conducive to the growth of damaging micro-organisms and mould fungi [19, 20, 21], which can in consequence result in ineffective thermal insulation, development of biological and chemical corrosion, as well as higher building operating costs. Laboratory tests have confirmed that unfavourable and constantly changing damp and temperature conditions nurture the growth of fungi [20, 22, 23]. Ensuring appropriate conditions inside the building and preventing interstitial condensation in walls can play an important role in limiting fungal growth [20]. Increased damp creates also changes in the micro-climate inside the building, decreasing the thermal and moisture comfort and so generating breathing-related illnesses, infections, allergies and skin and eye irritation [19, 24].

Analysis of physical and chemical parameters as a basis for choosing an appropriate solution was demonstrated in relation to research on a specific building.

The focus of the analysis was pavilion no. 5 located in the grounds of the Psychiatric Hospital at 2-4 Partyzantów Street in Pruszków near Warsaw [25].

Due to the wide spectrum of research and problems appearing in the heritage building, the paper is focused on pre-

Ze względu na szerokie spektrum badań i problemów występujących w obiekcie zabytkowym w artykule przedstawiono zgodnie z tematem ocenę stanu zachowania elementów murowych i izolacji przeciwwodnych oraz zaprezentowano fizykochemiczne przyczyny uszkodzeń murów podając stopień zasolenia i zawilgocenia murów.

Realizacja dociepleń ścian od strony wewnętrznej jest zwykle kontrowersyjna ze względu na zasady fizyki budowli. Jednak w obiektach zabytkowych ułożenie izolacji termicznej od strony wewnętrznej niekiedy jest jedynym możliwym rozwiązaniem [26], które ma na celu poprawę jakości termicznej przegród zewnętrznych i zmniejszenie kosztu utrzymania.

W artykule przeprowadzono analizę cech cieplno-wilgotnościowych przegród po dociepleniu od strony wewnętrznej w kilku wariantach dociepleń. Poddano analizie poprawność i skuteczność możliwych rozwiązań w aspekcie ekologicznym.

CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA OBIEKTU BADAŃ

Analizowany tworkowski zespół szpitalny jest obszarem z liczną zabudową zabytkową i założeniem parkowym. Budynek wzniesiony w stylu „carskim” charakteryzują się elewacjami z czerwonej ceramicznej cegły z wieloma elementami zdobniczymi, takimi jak pilastry, gzymsy, opaski okienne, reliefowe fryzy, wysunięte cokoły. Całość założenia jest wpisana do rejestru zabytków w dniu 2.01.1987 r. pod nr. 1281 [27], zatem nadrzędnym założeniem oceny stanu technicznego była zgodność zaproponowanych rozwiązań z wymogami konserwatorskimi i ograniczenie ingerencji technicznych w substancję zabytkową jedynie do działań niezbędnych z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji i zmieniających się funkcji.

Analizowany obiekt badań (ryc. 1-2) to wolnostojący budynek wchodzący w skład psychiatrycznego zespołu szpitalnego w Tworkach, usytuowany w zalesionym terenie. Na podstawie dokumentacji archiwalnej [28] stwierdzono, że wzniesiono go pod koniec XIX w.

Od 1996 roku budynek nie był użytkowany. Do dziś obiekt jest pustostanem. Pawilon zabezpieczono przed dostępem osób trzecich. Obecnie trwają prace rewitalizacyjne całego zespołu szpitalnego.

OCENA STANU TECHNICZNEGO MURU ZABYTKOWEGO

Na podstawie opracowań [25, 27, 28] i badań *in situ* elementów murowych stwierdzono, że ściany fundamentowe i pozostałe ściany konstrukcyjne wykonano z cegły ceramicznej na zaprawie wapiennej. Oceniono, że nie występują w nich pęknięcia ani rysy. Ściany zewnętrzne są na ogół dobrze zachowane, poza uszkodzeniami w strefie przyziemia. Elewacje budynku z czerwonej cegły ceramicznej pełnej (ryc. 3-4 wg dokumentacji [28] klinkierowej lub półklinkierowej grubość 1/2 cegły, czyli ok. 14 cm) z wieloma elementami zdobniczymi. Odprowadzenie wody opadowej zrealizowano na teren przyległy (ryc. 3), który przy budynku jest zróżnicowany, ponieważ lokalnie znajduje się on ponad izolacją poziomą.

Budynek nie posiada izolacji na ławach, natomiast na wysokości 1,0 m od posadzki z piasku stwierdzono w wielu miejscach izolację poziomą i fragmenty izolacji pionowej ścian piwnicznych. W elewacji zauważalne są ubytki cegieł i wypłukanie spoinowania, szczególnie w strefie przyziemia

senting an assessment of the behaviour of masonry elements and water proofing insulation, as well as presenting the physical and chemical causes of masonry damage in relation to salinity and moisture levels of the walls.

Implementing wall insulation from the inside is typically controversial due to building structure physics. But in heritage buildings, applying thermal insulation from the inside is often the only possible solution [26] for achieving the goal of improved thermal quality of external walls and reduced operating costs.

This paper is concerned with analysis of the thermal and moisture parameters of walls insulated from the inside by means of different thermal insulation options. The analysis reviews the appropriateness and effectiveness of possible solutions from the point of view of environmental performance.

GENERAL CHARACTERISTICS OF THE BUILDING UNDER STUDY

The hospital complex in Tworki consists of numerous heritage buildings and a park area. The buildings are in the “Tsarist” style characterised by façades of red ceramic brick with many decorative elements including: pilasters, cornices, window framings, relief friezes, extruding socles. The complex as a whole was inducted to the heritage building register on 02.01.1987 with reference no. 1281 [27], and so the overriding assessment of the technical aspects of proposed solutions related to meeting heritage conservation requirements and to limiting technical intervention into the building substance only to what is deemed essential from the point of view of safety of the building and its functions.

The pavilion under study (fig. 1-2) is a free-standing building in the psychiatric hospital complex in Tworki. It is located in a forested area. Based on archival documentation [28] it was determined that the building dates back to the end of the 19th century.

The building had not been used since 1996 and today it is empty. The pavilion has been secured to prevent unauthorised access. Restoration work is currently under way across the whole hospital complex.

TECHNICAL ASSESSMENT OF HISTORIC MASONRY

Based on studies [25, 27, 28] and research *in situ* of masonry elements, it was determined that the foundation walls and other structural walls are made of ceramic bricks held together with lime mortar. It was ascertained that there were no cracks or fissures. The external walls were deemed to be well preserved, excepting damage in the basement zone. The building façade is made of solid red ceramic bricks (fig. 3-4 according to documentation [28] clinker and part-clinker 14 cm thick ones, which is approx. half the thickness of a brick) with many decorative elements. Rainwater run-off is channelled to an area adjoining the site (fig. 3), with grounds locally rising above the level of the building’s foundation damp proof course.

The building footing has no damp proof course, though foundation damp proofing and fragments of vertical damp proofing in walls were found in the cellar at the level of 1.0 metre above a sandy floor.

Damaged bricks and washed out pointing are visible in the façade, especially in the basement and cellar, where there

i piwnic, gdzie są zacieki i zamakanie ścian. Powstały one m.in. w wyniku braku izolacji pionowych i szkód mrozowych, co objawia się lokalnie słabą wytrzymałością cegieł (ryc. 4). W części pomieszczeń piwnic występują miejsca napraw tynku wykonane jako tynk cementowo-wapienny bądź cementowy (ryc. 5-6), który wykazuje liczne spękania skurczowe i nie pozwala odparować wilgoci. W ekspertyzie [25] stwierdzono duże zawilgocenie ścian piwnic i przyziemia. Jest to spowodowane brakiem izolacji pionowej na ścianach, brakiem skutecznej wentylacji w piwnicach i złym doбором materiałów naprawczych przy poprzednich remontach.

Określono fizykochemiczne przyczyny uszkodzeń murów. W tym celu przeprowadzono badania wilgotności murów metodą nieniszczącą za pomocą urządzenia GANN HYDROMETTE UNI 2. Oceniając poziom zawilgocenia ścian przyjęto klasyfikację wg normy DIN: ściana mokra $w > 12\%$, ściana mocno zawilgocona $w = 8 \div 12\%$, ściana średnio zawilgocona $w = 5 \div 8\%$, ściana o podwyższonej wilgotności $w = 3 \div 5\%$, ściana o dopuszczalnej wilgotności $w = 0 \div 3\%$. Na ich podstawie stwierdzono, że zawilgocenie wszystkich ścian kształtowało się na poziomie muru mokrego zarówno powierzchniowo, jak i strukturalnie, czyli niedopuszczalnym w dalszej eksploatacji.

Określono rodzaj i stężenie soli w murach. W tym celu ze ścian pobrano próbki od wewnątrz i wykonano badania chemiczne. Miejsca poboru próbek wybrano tak, aby objąć nimi efekt transportu soli wraz z podciąganiem kapilarnym wilgoci. Wykonana w pierwszej kolejności analiza jakościowa pozwoliła na stwierdzenie obecności w poszczególnych próbkach: chlorków, siarczanów i azotanów. Następnie wykonano analizę półilościową za pomocą zestawu do badania soli firmy VISCOLOR.

Do oceny stopnia zawartości soli w murze przyjęto następującą skalę WTA [29]: stopień zasolenia mały $< 0,8\%$, średni $0,8 \div 2,3\%$, wysoki $> 2,3\%$ (tab. 1).

Tabela 1.
Stopień zasolenia wg wytycznych WTA [29]

Stopień zasolenia	Mały	Średni	Wysoki
Chlorki	$< 0,2\%$	$0,2-0,5\%$	$> 0,5\%$
Azotany	$< 0,1\%$	$0,1-0,3\%$	$> 0,3\%$
Siarczany	$< 0,5\%$	$0,5-1,5\%$	$> 1,5\%$
Sole łącznie	$< 0,8\%$	$0,8-2,3\%$	$> 2,3\%$

Wyniki tych badań oraz badania pH roztworu zestawiono w tablicy 2.

Tabela 2. / Table 2.

Wyniki badań półilościowych określających zawartość soli w murze / Results of semi-quantitative tests to determine the salt content of walls

Nr próbki Sample No.	Wysokość nad poziomem posadzki miejsca pobrania próbek Sampling height above floor level [cm]	Masa próbki Sample mass [g]	pH	Chlorki	Siarczany	Azotany	Sole łącznie	
				Chlorides	Sulphite	Nitrates	[%]	stopień zasolenia próbki Salinity level of sample
				[%]	[%]	[%]	[%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	150	10	5,5	0,020	0,500	0,004	0,524	mały, lokalnie średni low, medium locally
2	50	10	6,1	0,025	0,400	0,020	0,445	mały / low
3	100	10	5,5	0,300	0,600	0,110	1,010	średni / medium
4	100	10	5,5	0,025	0,240	0,005	0,270	mały / low
5	50	10	6,7	0,020	0,400	0,003	0,423	mały / low

are damp patches and wet walls. This damage is a result of the lack of vertical damp proofing and freezing of damp masonry, and caused localised weakening of brick strength (fig. 4). In parts of the cellar, there are places where the plaster has been repaired with lime-cement or cement plaster (fig. 5-6), which has numerous cracks resulting from contractions and prevents moisture from evaporating. The building audit [25] confirmed considerable damp in cellars and basement walls. This was caused by the lack of vertical damp-proofing of walls, lack of effective ventilation in the cellars and use of inappropriate materials in previous repair work.

The physical and chemical causes of masonry damage were determined. Assessment of the moisture content of the walls was carried out in a non-invasive way by means of a GANN HYDROMETTE UNI 2. A scale was used to assess the moisture level of the walls based on a classification according to the DIN standard: wet wall $w > 12\%$, very damp wall $w = 8 \div 12\%$, moderately damp wall $w = 5 \div 8\%$, wall with elevated moisture level $w = 3 \div 5\%$, wall with acceptable moisture level $w = 0 \div 3\%$. Based on this moisture content scale, all the walls were determined to be wet walls both at the surface and structurally – and so, preventing the building from being brought into use.

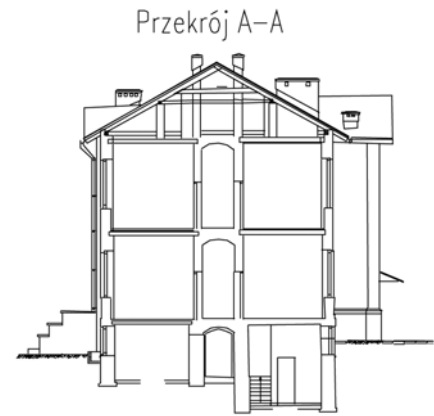
The type and concentration of salt content in the walls was also determined. For this purpose, samples were taken from the inside and analysed chemically. The sampling sites were selected so as to cover the effect of salt transfer through the capillary rise of water. In the first instance, quality analysis of specific samples determined the presence of: chlorines, sulphates and nitrates. Next, a semi-quantitative analysis was carried out by means of a VISICOLOR salt assessment set.

For the purposes of assessing the salt content in the walls, the following WTA scale was adopted [29]: low level of salinity $< 0,8\%$, average $0,8 \div 2,3\%$, high $> 2,3\%$ (tab. 1).

Table 1.
Salinity level according to WTA guidelines [29]

Salinity level	Low	Medium	High
Chlorides	$< 0.2\%$	$0.2-0.5\%$	$> 0.5\%$
Nitrates	$< 0.1\%$	$0.1-0.3\%$	$> 0.3\%$
Sulphites	$< 0.5\%$	$0.5-1.5\%$	$> 1.5\%$
Combined salts	$< 0.8\%$	$0.8-2.3\%$	$> 2.3\%$

The results of these tests and the liquid solution pH test are presented in table 2.



Ryc. 1. Widok ogólny elewacji południowo-zachodniej i schemat przekroju poprzecznego A-A
 Fig. 1. General view of the south-east façade and A-A cross-section



Ryc. 2. Widok elewacji północno-wschodniej
 Fig. 2. The north-east view of the building's façade



Ryc. 3. Budynek główny, widok elewacji północno-zachodniej, zacieki, algi w strefie przyziemia
 Fig. 3. Main building: view of the north-west façade. Damp patches and algae on basement walls



Ryc. 4. Strefa przyziemia, ubytki cegieł elewacyjnych powstałe w wyniku szkód mrozowych na mokrym murze
 Fig. 4. Basement wall. Damaged bricks in the façade caused by freezing of damp masonry



Ryc. 5. Piwnica, zawilgocenie, ubytki i naprawy tynków zaprawą cementową
 Fig. 5. Cellar – damp, damage and repair of plaster with cement mortar

Analiza wyników badań (tab. 2) potwierdziła zróżnicowane stężenie soli zarówno w cegle, jak i w zaprawie. Obiekt wymaga likwidacji bądź zmniejszenia zawartości soli w murze i zabezpieczenia przeciwwodnego, co jest niezbędne do uzyskania odpowiedniego podłoża w celu poprawy parametrów jakości energetycznej ścian zewnętrznych i całego obiektu.

Analysis of test results (tab. 2) confirmed variations in saline concentration in both bricks and mortar. The building must be demolished unless saline concentration in walls is reduced and the building is damp-proofed, as this is essential for creating an appropriate base for improving the quality of energy parameters of external walls and the pavilion as a whole.



Ryc. 6. Ściana nadziemia, mur ceglany na zaprawie wapiennej
Fig. 6. Wall above ground level – brick with lime mortar

Na podstawie ekspertyzy [25] stwierdzono, że budynek nie spełnia warunków termicznych wynikających z rozporządzenia [30]. Ze względu na zabytkowy charakter budynku zalecono poprawę przenikalności przegród od strony wewnętrznej.

ZALECENIA DO PROJEKTU TECHNICZNEGO REWITALIZACJI OBIEKTU BADAŃ

Zalecono kompleksową poprawę termiczną murów na podstawie stwierdzonego w roku 2007 stanu technicznego obiektu badań [25]. Szczegółowa poprawa energetyczna zabytkowego muru z cegły obejmowała m.in.:

- odgrzybienie i osuszenie ścian;
- wykonanie izolacji wtórnej murów (poziomej i pionowej) z zabezpieczeniem przed mechanicznym uszkodzeniem;
- ocieplenie ścian od strony wewnętrznej, w dwóch wariantach technologii realizacji:
 - „na sucho” (1) za pomocą specjalnie skonstruowanej przegrody na ruszcie z wykorzystaniem wełny i specjalistycznej folii wykorzystującej zjawisko odbicia promieniowania cieplnego, poprawiającej ognioodporność przegród (np. specjalistyczną trójwarstwową folię – polietylen z aluminium, warunkiem zastosowania tej folii jest sprawna wentylacja pomieszczeń i zachowanie obustronnej pustki 4 cm) lub
 - „na mokro” (2) za pomocą gotowych płyt termoizolacyjnych, paroprzepuszczalnych, aktywnych kapilarnie, zapobiegających zagrzybieniu, poprawiających niepalność przegród np. płyt z silikatowo-wapiennych;
- konserwację i hydrofobizację elewacji klinkierowej.

ANALIZA CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWA MURU DOCIEPLONEGO OD WEWNĄTRZ

W obiekcie zabytkowym w Tworkach sprawdzono obliczeniowo zalecenia dotyczące m.in. propozycji rozwiązań poprawy parametrów termicznych w przegrodach zewnętrznych zawartych w p. 3. ekspertyzy [25] i kilku innych propozycji rozwiązań znajdujących się obecnie na rynku.

Przeprowadzone obliczenia dotyczą przypadków rozwiązań dwóch technologii realizacji, tj. metody: „lekkiej suchej” (1) i „lekkiej mokrej” (2). Kontrolni poddano parametry cieplno-wilgotnościowe. W tym celu przeprowadzono analizę

Based on the audit [25], it was determined that the building does not meet the thermal parameters as set out in the relevant regulations [30]. On account of the heritage character of the building, it was recommended that wall permeability be improved from the inside.

RECOMMENDATIONS FOR TECHNICAL PLANS FOR RENOVATION OF THE BUILDING UNDER STUDY

An overall thermal improvement of the walls was recommended as a result of an assessment of the technical standing of the building in 2007 [25]. Specific energy improvements of the heritage brick masonry included, inter alia:

- elimination of fungi and drying of walls;
- secondary damp-proofing of walls (horizontal and vertical) secured against mechanical damage;
- thermal insulation of walls from the inside using two technological options:
 - ‘dry’ (1) using a specially constructed partition on a grate filled with wool and a specialised foil reflecting heat rays, which also improves the fire-resistance of walls (e.g. a specialised three-layer polyethylene and aluminium foil, which requires effective ventilation of room interiors and a cavity of 4 cm on both sides) or
 - ‘wet’ (2) using ready-made thermal insulation panels, which are vapour permeable and allow capillary processes to take place, thereby preventing fungal growth and improving the fire-resistance of the partition, e.g. silicate-calcium panels;
- restoration and water proofing of the clinker façade.

ANALYSIS OF THE THERMAL AND MOISTURE PROPERTIES OF MASONRY WALLS INSULATED FROM THE INSIDE

The recommendations for the heritage building in Tworki relating to proposals for improving thermal parameters of external walls cited on p. 3 of the audit [25] and a few other solutions currently available on the market were verified by calculations.

Calculations related to two technological methods of implementation, i.e. ‘light dry’ method (1) and ‘light wet’ method (2). Thermal and moisture parameters were subjected to testing. For this purpose, analysis was carried out for one option using the first method of thermal insulation and for several options within the second method. This provided a means for testing the appropriateness and effectiveness of the solutions proposed for increasing energy effectiveness of the heritage building in question.

Five insulation materials were selected for the analysis, differing considerably in their properties, application, as well as technological process of realisation. The following structural options for the walls were selected:

0. original wall made of ceramic brick,
1. mineral wool with air cavity and a three-layer aluminium foil (1),
2. autoclaved aerated concrete (AAC) (2),
3. polyurethane with plasterboard and vapour barrier film (2),
4. silicate-calcium panels (2),
5. polyurethane panels with openings filled with mineral material enabling capillary processes (2).

przegród dla jednego wariantu w metodzie pierwszej docieplenia i kilku wariantów rozwiązań w metodzie drugiej. Na tej podstawie w analizowanym obiekcie zabytkowym sprawdzono poprawność i skuteczność przyjętych rozwiązań projektowych służących poprawie efektywności energetycznej obiektu badań.

Do analizy wybrano pięć materiałów izolacyjnych, które różnią się znacznie właściwościami, zastosowaniem, jak i technologią realizacji. Wybrano następujące **warianty** konstrukcji przegród:

0. mur pierwotny z cegły ceramicznej,
1. wełna mineralna z pustką powietrzną z trójwarstwową folią aluminiową (1),
2. beton komórkowy (2),
3. płyta poliuretanowa z płytą g-k i folią paroizolacyjną (2),
4. płyta silikatowo-wapienna (2),
5. poliuretanowa płyta z otworami wypełnionymi materiałem mineralnym przewodzącym kapilarnie (2).

Szczegółowej analizie poddana została zabytkowa ściana zewnętrzna wykonana z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej, oblicowana cegłą klinkierową drażoną. Obliczenia wykonano zgodnie z normą [31]. Właściwości materiałowe dla każdej warstwy zdefiniowano na podstawie norm [32, 33]. Dla Pruszkowa przyjęto strefę klimatyczną IIIa, która jest zgodna z geograficznym położeniem obiektu budowlanego (Pruszków). Przewidziano warunki klimatyczne w pomieszczeniu jako stałe, zatem przyjęto temperaturę minimalną 20°C, a wilgotność względną 55%. Przyjęto klasę budynku pod względem wilgotności jako mieszkania mało zagęszczone.

Wyniki wszystkich obliczeń ścian pod kątem właściwości cieplno-wilgotnościowych przedstawiono w tabeli 3.

Obliczenia współczynnika temperaturowego $f(R_{si})$ pozwoliły ustalić, że efektywna jego wartość na powierzchni wewnętrznej przegród wyznaczona na podstawie wartości współczynnika przenikania ciepła (U) elementu oraz oporu przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej (R_{si}) wynosi od 0,914 do 0,970. Natomiast największa kondensacja nastąpi w styczniu. Wartość czynnika temperaturowego $f(R_{si, min})$, w tym miesiącu wynosi 0,820. Zatem wymagany normą [31] warunek $f(R_{si}) > f(R_{si, max})$ jest spełniony. Wynika stąd, że w żadnej z analizowanych przegród nie nastąpi rozwój pleśni.

Ocena przegród zewnętrznych (tab. 4) pozwoliła ustalić, że w pięciu spośród sześciu (wraz z wariantem pierwotnym) wariantów analizowanych ścian występuje kondensacja pary wodnej na jednej lub dwóch powierzchniach stykowych. Stwierdzono też, że na każdej z tych powierzchni kondensat wyparuje w miesiącach letnich. Tylko w wariantcie (1) rozwiązanie z wełną mineralną i warstwami powietrza niewentylowa-

The external wall made of solid ceramic bricks with lime mortar, clad with clinker bricks was analysed. Calculations were carried out in accordance with accepted standards [31]. The material properties for each layer were determined on the basis of defined standards [33]. Climate zone IIIa was adopted for Pruszków, in accordance with the geographic location of the building (in Pruszków). Climate conditions for the interior were determined to be constant with a minimum temperature of 20°C and a relative humidity of 55%. In terms of moisture levels, the building was classified as low density housing.

Results of the calculations of thermal and moisture properties for various wall insulation options are presented in tab. 3.

Calculation of the temperature coefficient $f(R_{si})$ determined that its value at the internal wall surface defined on the basis of the value of the thermal transmittance coefficient (U) of the material and the thermal resistance of the internal surface (R_{si}) amounted to 0.914 to 0.970. The highest condensation was found to appear in January. The temperature coefficient $f(R_{si, min})$ for this month was determined to be 0.820. The required standard [31] that $f(R_{si}) > f(R_{si, max})$ was met. The conclusion is that mould does not appear in any of the options analysed.

Assessment of the external walls (tab. 4) determined that in five of the six wall options analysed (including the original option) water vapour condensation takes place on one or two contact surfaces. It was also determined that the condensation on all these surfaces evaporates in summer months. Only in option (1), where mineral wool is combined with layers of unventilated air, condensation of water vapour does not take place during the whole year (fig. 7). The graphs present the distribution of saturated water vapour pressure and partial pressure of water vapour in walls for the month of January as this is the month in which the highest condensation appears according to calculations.

In the case of the remaining thermal insulation options, there are two contact surfaces (points where the curves for pressure of saturated water vapour and partial pressure cross), which are shown in table 4 and in figure 8-9.

Analysis of the results (fig. 8-9) relating to partial pressure enabled determination of the value of the saturated water vapour pressure. It was determined on this basis that the calculated value exceeds the value of the saturated water vapour pressure. This phenomenon can be observed between the layer of solid bricks and the clinker cladding and between the layer of solid bricks and the insulation material, for all options except for that using mineral wool. In the case of the original wall (option 0), condensation of water vapour takes place between the solid brick and the clinker brick (tab. 4). Mass g_c [kg/m^2] defines the amount of condensate per 1 m^2 surface area and

Tabela 3.
Zestawienie obliczeń parametrów cieplnych sześciu wariantów ścian

Mur –	U [W/m^2K]	R [m^2K/W]	$f(R_{si})$	$f(R_{si, max})$	Wilgoć
Wariant 0	1,08	0,927	0,927	0,820	wyparuje
Wariant 1	0,18	5,518	0,970	0,820	wyparuje
Wariant 2	0,28	3,535	0,953	0,820	wyparuje
Wariant 3	0,51	1,945	0,914	0,820	wyparuje
Wariant 4	0,44	2,278	0,927	0,820	wyparuje
Wariant 5	0,35	2,880	0,942	0,820	wyparuje

Table 3.
Heat parameter calculations for 6 wall options

Wall –	U [W/m^2K]	R [m^2K/W]	$f(R_{si})$	$f(R_{si, max})$	Moisture
Option 0	1.08	0.927	0.927	0.820	evaporates
Option 1	0.18	5.518	0.970	0.820	evaporates
Option 2	0.28	3.535	0.953	0.820	evaporates
Option 3	0.51	1.945	0.914	0.820	evaporates
Option 4	0.44	2.278	0.927	0.820	evaporates
Option 5	0.35	2.880	0.942	0.820	evaporates

Tabela 4.
Ocena przegród pod kątem występowania kondensacji międzywarstwowej

Wariant	Miesiące występowania kondensacji	Miesiąc występowania największej kondensacji	Max. ilość kondensatu g _e [kg/m ²]	Opis warstw, między którymi wystąpiła kondensacja
0	Mur pierwotny bez docieplenia			
	listopad – – marzec	styczeń	0,0661	cegła pełna – klinkier
1	Ściana docieplona wełną mineralną i folia aluminiową			
	brak kondensacji			
2	Ściana docieplona płytą poliuretanową z płytą g-k i paroizolacją			
	październik – – kwiecień	styczeń	0,0678	cegła pełna – płyta
			0,0175	cegła pełna – klinkier
3	Ściana docieplona płytą wapienno – krzemianową			
	październik – – maj	styczeń	0,0373	cegła pełna – klinkier
			0,2966	cegła pełna – silikat
4	Ściana docieplona betonem komórkowym			
	październik – – maj	styczeń	0,0304	cegła pełna – klinkier
			0,481	cegła pełna – gazobeton
5	Ściana docieplona płytą poliuretanową perforowaną			
	październik – – maj	styczeń	0,0226	cegła pełna – klinkier
			0,1295	cegła pełna – płyta

nego, kondensacja pary wodnej nie wystąpi w ciągu całego roku (ryc. 7). Na wykresach przedstawiono rozkład ciśnienia pary wodnej nasyconej i cząstkowe ciśnienie pary w przegrodach dla stycznia, ponieważ jest to miesiąc, w którym występuje potwierdzona obliczeniowo największa kondensacja.

W pozostałych przypadkach dociepleń występują dwie powierzchnie styku (punkty przecięcia wykresów ciśnienia pary nasyconej i ciśnienia cząstkowego), co pokazano w tabeli 4 i na rycinach 8-9.

Analiza wyników (ryc. 8-9) dotyczących ciśnienia cząstkowego pozwoliła ustalić wartość ciśnienia nasycenia pary wodnej. Na tej podstawie stwierdzono, że obliczona wielkość przekracza wartość ciśnienia pary nasyconej. Sytuacja taka ma miejsce między cegłą pełną a klinkierem oraz między cegłą pełną i zastosowanym materiałem izolacyjnym we wszystkich wariantach, poza wełną mineralną. Natomiast w przypadku muru pierwotnego (wariant 0) do kondensacji pary wodnej dochodzi pomiędzy cegłą pełną, a klinkierem (tab. 4). Masę g_e [kg/m²] określającą ilość kondensatu na 1m² powierzchni określono przemnażając strumień kondensacji na powierzchniach stykowych przez czas równy liczbie sekund w miesiącu. Na tej podstawie obliczono maksymalną ilość kondensatu występującego w poszczególnych przegrodach, co przedstawiono w tabeli 4.

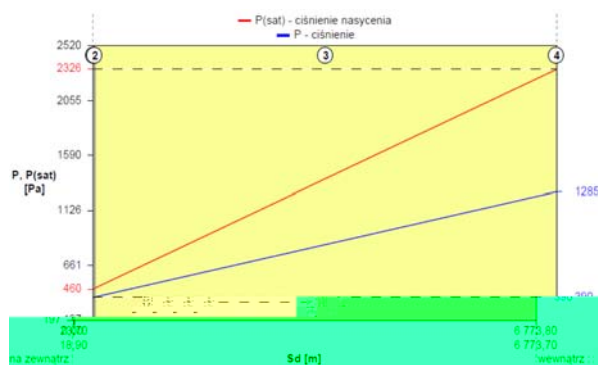
W czterech przegrodach spośród pięciu analizowanych wariantów dociepleń stwierdzono możliwość wystąpienia kondensacji międzywarstwowej, którą obliczeniowo potwierdzono w styczniu dla muru pierwotnego (0) przed dociepleniem i wszystkich przegród ocieplonych w technologii mokrej (warianty: 2, 3, 4, 5). Niewielka ilość kondensatu występuje na styku cegły ceramicznej pełnej z cegłą klinkierową drażoną (warianty: 0, 2, 3, 4, 5). Najwięcej kondensatu skropi się na po-

Table 4.
Assessment of walls in relation to the appearance of interstitial condensation

Option	Months in which condensation appears	Months in which the highest condensation appears	Max. amount of condensate g _e [kg/m ²]	Description of layers, between which condensation appears
0	Original wall without insulation			
	November – – March	January	0.0661	Solid brick – clinker
1	Wall insulated with mineral wool and aluminium foil			
	No condensation			
2	Wall insulated with polyurethane panels with plasterboard and vapour barrier film			
	November – – April	January	0.0678	Solid brick – panel
			0.0175	Solid brick – clinker
3	Wall insulated with calcium-silicate panels			
	October – – May	January	0.0373	Solid brick – clinker
			0.2966	Solid brick – silicate
4	Wall insulated with AAC			
	October – – May	January	0.0304	Solid brick – clinker
			0.481	Solid brick – AAC
5	Wall insulated with perforated polyurethane panels			
	October – – May	January	0.0226	Solid brick – clinker
			0.1295	Solid brick – panel

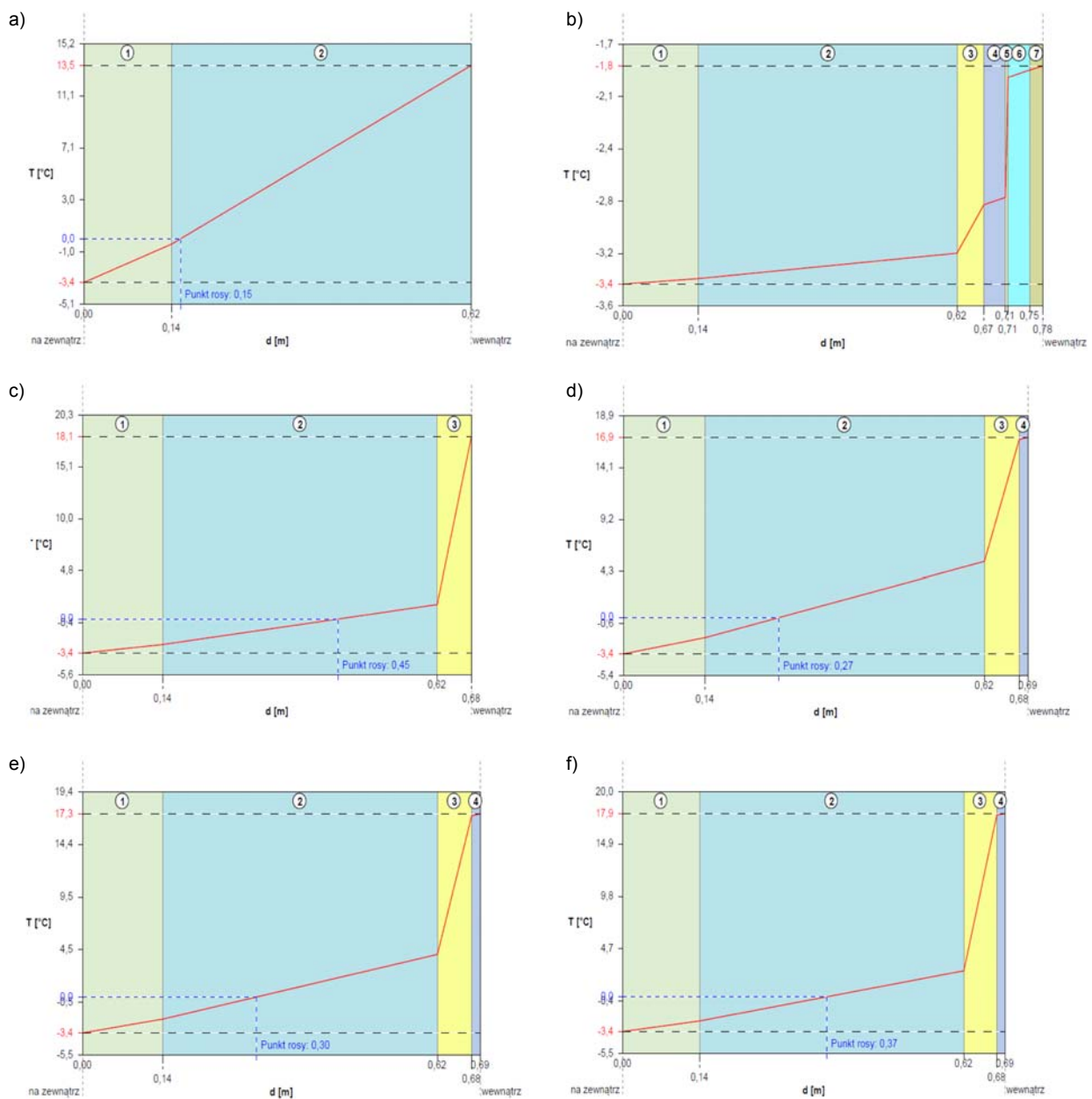
was calculated by multiplication of the condensation stream on contact surfaces by the number of seconds in a month. The maximum amount of condensation appearing in specific walls was calculated in this way and is presented in tab. 4.

In four of the five thermal insulation options analysed, the possibility of interstitial condensation appearing was determined and confirmed through calculations for the month of January for the original wall (0) prior to insulation and for all the walls thermally insulated with the 'wet' method options (options: 2, 3, 4, 5). A small amount of condensate appeared between solid ceramic bricks and clinker bricks (options: 0, 2, 3, 4, 5). The largest amount of condensation appeared on the surfaces where solid ceramic bricks contact insulation polyurethane panels, calcium silicate panels and AAC (from 0.068 to 0.481 kg/m²). Detailed analysis of the annual moisture balance and calculations of the maximum accumulated moisture con-



Ryc. 7. Wykres rozkładu ciśnienia pary wodnej w przegrodzie w styczniu – wariant 1 – wełna

Fig. 7. Distribution of water vapour pressure in the wall for the month of January – option 1 – wool



Ryc. 10. Wykres rozkładu temperatury w analizowanych przegrodach dla najzimniejszego miesiąca w roku – styczeń: a) wariant 0, b) wariant 1, c) wariant 2, d) wariant 3, e) wariant 4, f) wariant 5

Fig. 10. Temperature distribution for the walls analysed for the coldest month of the year – January: a) option 0, b) option 1, c) option 2, d) option 3, e) option 4, f) option 5

Paroprzepuszczalność przegród spadła przy zastosowaniu materiałów o wysokim oporze dyfuzyjnym S_d (ryc. 10c i f, wariant 2 i 5 – płyta poliuretanowa). Punkt rosy dla tych wariantów został przesunięty z 15 cm na 45 i 37 cm w głąb ściany licząc od powierzchni zewnętrznej przegrody (ryc. 10c i f, wariant 2 i 5), co spowodowało większe zawilgocenie przegród i zmniejszyło możliwość wyparowania zakumulowanej wilgoci. W przypadku zastosowania betonu komórkowego punkt rosy znajduje się 30 cm od powierzchni zewnętrznej przegrody (ryc. 10e, wariant 4), natomiast w wariantcie z płytami wapienno – krzemianowymi o wysokich parametrach paroprzepuszczalności głębokość ta wynosi 27 cm (ryc. 10d, wariant 3). Jedynie w wariantcie z wełną mineralną i pustką powietrzną (ryc. 10b, wariant 1) punkt rosy nie występuje.

37 cm inwards into the wall counting from the external wall surface (fig. 10c and f, options 2 and 5), which caused increased wall damp and decreased capacity for evaporation of accumulated moisture. In the case of AAC, the dew point is located 30 cm from the external wall surface (fig. 10e, option 4), whereas it is 27 cm from the external wall surface for the option using calcium-silicate panels with high water vapour permeability (fig. 10d, option 3). Only the option using the mineral wool combined with air cavity has no dew point (fig. 10b, option 1).

CONCLUSION

Results of the analysis of the thermal and moisture properties of the external wall of the heritage pavilion in the hospital

PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników badań z przeprowadzonej analizy obliczeniowej właściwości cieplno-wilgotnościowych muru zewnętrznego pawilonu zabytkowego zespołu szpitalnego docieplonego od wewnątrz stwierdzono, że wszystkie rozpatrywane przegrody zaprojektowano prawidłowo zarówno pod kątem uniknięcia rozwoju pleśni (tab. 3), jak i temperatury punktu rosy.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że tylko dwa warianty dociepleń spełniają wymagania odnośnie do przewodności cieplnej przegród, przy założonej jednakowej grubości izolacji termicznej (6 cm). Najbardziej korzystny współczynnik przenikania ciepła uzyskano (tab. 3) bowiem w przypadku docieplenia „na sucho” (wariant 1), a w przypadku docieplenia „na mokro” w wariant 2. Pozostałe warianty przewyższają maksymalną wartość dopuszczalną współczynnika przenikania przegrody ($0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$) o wartości od 16 do 70%. Aby warunek był spełniony w przypadku bloczków z betonu komórkowego, grubość warstwy izolacyjnej musiałaby być dwukrotnie większa.

W czterech przegrodach spośród pięciu analizowanych wariantów stwierdzono możliwość wystąpienia kondensacji międzywarstwowej, którą obliczeniowo potwierdzono w miesiącu styczniu dla muru pierwotnego (wariant 0) przed dociepleniem i wszystkich przegród ocieplonych w technologii mokrej (warianty: 2, 3, 4, 5). Niewielka ilość kondensatu występuje na styku cegły ceramicznej pełnej z cegłą klinkierową drażoną (warianty: 0, 2, 3, 4, 5). Najwięcej kondensatu skropi się na powierzchni styku pomiędzy cegłą ceramiczną pełną, a przyjętymi do docieplenia płytami poliuretanowymi, silikatem wapiennym i betonem komórkowym (od $0,068$ do $0,481 \text{ kg/m}^2$). W przypadku zastosowania płyt poliuretanowych maksymalna ilość kondensatu występująca na powierzchniach stykowych jest o prawie 7 razy mniejsza niż w przypadku betonu komórkowego, a płyt wapienno-krzemianowych o ponad 4 razy mniejsza. Duża porowatość płyt wapienno-krzemianowych powoduje, że materiał jest aktywny kapilarnie, co jest szczególnie właściwością umożliwiającą przegrodzie samoczynną regulację wilgotności w układzie powietrze-materiał [34]. Choć materiał ten nie zabezpieczył skutecznie przegrody przed stratami ciepła, ponieważ posiada większy współczynnik przewodności cieplnej $\lambda = 0,06 \text{ [W/mK]}$ w porównaniu z innymi materiałami izolacyjnymi o 30, a nawet 70%. Woda zawarta w materiale dodatkowo zmniejsza jego parametry cieplne, to jest odpowiednim materiałem do stosowania w trudnych warunkach na ścianach zawilgoconych.

Ostatecznie stwierdzono w czterech wariantach występowanie kondensacji w przegrodzie, ale mimo to stwierdzono, że wszystkie warianty dociepleń zaprojektowano prawidłowo, ponieważ kondensat zgromadzony w przegrodzie całkowicie wyparuje w miesiącach letnich. Możliwość występowania takiej sytuacji jest dopuszczona przez normę i nie powinna mieć negatywnego wpływu na pozostałe parametry przegrody. Należy zwrócić uwagę, że niezmiernie istotną jest, w analizowanym obiekcie zabytkowym, skutecznie działająca wentylacja grawitacyjna.

Spośród analizowanych wariantów (1-5) na uwagę zasługuje wariant 1 (realizacja „na sucho”), który jako jedyny spełnia wszystkie analizowane wymogi niezbędne do prawidłowego projektowania dociepleń przegród budowlanych. Na tej podstawie stwierdzono, że wariant ten winien być rekomendowany do zastosowania w obiektach zabytkowych.

complex, which was thermally insulated from the inside, indicate that all assessed insulation options were designed properly in relation to avoiding development of moulds (tab. 3) and to dew point temperature.

It is important to note that only two insulation options met the requirements related to thermal transmittance of walls, in the situation of adopting an identical thickness of thermal insulation material (6 cm) for all cases. The most favourable thermal transmittance coefficient (tab. 3) was achieved with “dry” insulation (option 1), and with option 2 in the case of “wet” insulation. The remaining options exceeded the maximum value of the thermal transmittance coefficient allowed for the walls ($0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$) by 16 to 70%. Meeting this condition in the case of AAC blocks would have required the insulation layer to be twice as thick.

It was determined that in four of the five options tested, there was a possibility of interstitial condensation, which was confirmed through analysis for the month of January for the original wall (option 0) prior to thermal insulation and for all walls insulated with “wet” technology (options 2, 3, 4 and 5). A small amount of condensation appeared between the layer of solid ceramic bricks and clinker brick cladding (options: 0, 2, 3, 4, 5). The largest amount of condensate appeared on contact surfaces of solid ceramic bricks and polyurethane insulation panels, calcium silicate and AAC (from 0.068 to 0.481 kg/m^2). In the case of polyurethane panels, the maximum amount of condensate appearing on contact surfaces is nearly seven times smaller than in the case of AAC and four times smaller than in the case of calcium-silicate panels. A high porosity of the calcium-silicate panels enables capillary processes to take place, which is a special property allowing for self-regulation of moisture levels at the air-material interface [34]. However, this material did not effectively secure the wall against heat loss, due to its heat conductivity coefficient $\lambda = 0,06 \text{ [W/mK]}$ which is higher by 30 to 70% when compared to other insulation materials. Although the water contained in the material reduces further its thermal parameters, it is appropriate for use in difficult conditions where walls are damp.

In the analysis, condensation was found in four options. Despite this, it was determined that in all tested options the insulation was properly designed as the condensate accumulated in the wall would completely evaporate during summer months. The possibility of such an eventuality is foreseen in prevailing standards and should not have a negative impact on other wall parameters. It is important to note that efficiently functioning natural ventilation was determined to be of great significance for the heritage building under study.

From among the options analysed (1-5), special attention should be given to option 1 (“dry” insulation) on the grounds that this was the only one, which fulfilled all requirements essential for the proper thermal insulation design of walls. That is why this option should be recommended for use in heritage buildings.

ACKNOWLEDGMENT

The research for this paper was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education as part of a statutory research project – number S/19/2014 and S/14/2014.

łum. M.S.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Efektywność wykorzystania energii w latach 1997–2007*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2009.
- [2] *Krajowy Plan Działań dotyczący efektywności energetycznej (EEAP)*, Warszawa 2007.
- [3] Dylewski R., Adamczyk J., *Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls*, Building and Environment, 46, 2011:2615-2623, DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.06.023
- [4] Dylewski R., Adamczyk J., *Economic and ecological indicators for thermal insulating building investment*, Energy and Buildings, 54, 2012:88-95, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.021
- [5] Anastaselos D., Giama E., Papadopoulos A.M., *An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions*, Energy and Buildings, 41, 2009:1165-1171. DOI: /10.1016/j.enbuild.2009.06.003
- [6] Ozel M., *Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials*, Energy and Buildings, 49, 2012:552-559. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.03.002
- [7] Zabalza Bribian I., Valero Capilla A., Aranda Uson A., *Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential*, Building and Environment, 46, 2011:1133-1140. DOI:10.1016/j.buildenv.2010.12.002
- [8] Van Ooteghem K., Xu L., *The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada*, Building and Environment, 49, 2012:212-226. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.09.028
- [9] Szkarlat K., Mróz K.T., *Wpływ systemów zarządzania budynkiem (BMS) na charakterystykę energetyczną budynku*, Energy and Buildings, 39 (8), 2010.
- [10] Dylewski R., Adamczyk J., *Ecological indicators of construction investment*, Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 27 (99), 2011:47-51.
- [11] Liu, Y., Wang, Y., Wang, D., Liu, J., *Effect of moisture transfer on internal surface temperature*, Energy and Buildings, 60, 2013:83-91. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.019
- [12] Kumaran, M.K., Lackey, J.C., Normandin, N., van Reenen, D., *Vapor permeances, air permeances, and water absorption coefficients of building membranes*, Journal of Testing and Evaluation, 2006:241-245.
- [13] Teodosiu, R., *Integrated moisture (including condensation) – Energy-airflow model within enclosures. Experimental validation*, Building and Environment, 61, 2013:197-209. DOI:10.1016/j.buildenv.2012.12.011
- [14] Rana, R., Kusy, B., Jurdak, R., Wall, J., Hu, W., *Feasibility analysis of using humidex as an indoor thermal comfort predictor*, Energy and Buildings, 64, 2013:17-25. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.04.019
- [15] Koniorczyk M., Grymin W., Konca P., Gawin D., *Transport i krystalizacja soli podczas wysychania materiałów budowlanych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 59 (3/12/III), 2012:25-32.
- [16] Homod, R.Z., Sahari, K.S.M., *Energy savings by smart utilization of mechanical and natural ventilation for hybrid residential building model in passive climate*, Energy and Buildings, 60, 2013:310-329. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.034
- [17] Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H., *Influence of moisture on heat conductivity coefficient of aerated concrete*, Ecological Chemistry and Engineering, S 18, 2011:111-120.
- [18] Garbalińska H., Bochenek M., *Wpływ podciągania kapilarnego na przewodność cieplną betonu komórkowego*, Inżynieria i Budownictwo, 5, 2013:260-262.
- [19] Dyląg M. and Bień M., *Negatywne zjawiska związane z obecnością grzybów w pomieszczeniach zamkniętych* (In Polish), Mikol. Lek., 13(1), 2006:49-54.
- [20] Ababutain I.M., *Influence of some environmental factors on the growth of Aspergillus niger and Cladosporium sphaerospermum*, American Journal of Applied Sciences, 10, 2013:159-163. DOI:10.3844/ajassp.2013.159.163
- [21] Johansson, P., Svensson, T., Ekstrand-Tobin, A., *Validation of critical moisture conditions for mold in building materials*, Building and Environment, 62, 2013:201-209. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.01.012
- [22] Johansson, P., Bok, G., Ekstrand-Tobin, A., *The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions*, Building and Environment, 65, 2013:178-184. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.004
- [23] Thelandersson, S., Isaksson, T., *Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions*, Building and Environment, 65, 2013:18-25. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.03.016
- [24] Takada, S., Matsushita, T., *Modelling of evaporation of moisture from the skin, eyes and respiratory tract, to evaluate dryness sensations in areas of low humidity*, Journal of Building Physics, 36 (4), 2013:422-437. DOI:10.1177/1744259112473951
- [25] Ostańska A., *Ekspertyza techniczna budynku Pawilon nr V dla potrzeb projektu modernizacji obiektu w ramach rewitalizacji Szpitala Tworowskiego*, 2007.
- [26] Barnat-Hunek D., Karwacka A., Stankiewicz K., Kowalczyk A., *Analiza cieplno-wilgotnościowa przegród zewnętrznych ocieplonych od strony wewnętrznej*, Energy-saving and ecological materials, installations and technologies in construction. Brest-Odessa-Simferopol-Biała Podlaska, Wydawnictwo PSW JPPI, Biała Podlaska 2012, 9-18.
- [27] Murza-Mucha M., *Szpital Tworowski – Ekspertyza Architektoniczna*, Pracownia Architektoniczna GRAFFITI, 2007.
- [28] Hasczewski H., Ratajski T., *Opinia techniczna konstrukcyjno-budowlana – Pawilon nr V na terenie Szpitala Psychiatrycznego Z.O.Z. w Tworach*, Pracownia Projektowa Spółdzielni Mieszkaniowej: EKSPERYMENT, 1985.
- [29] Markblatt 2-9-04/D *Sanierputzsysteme*. Instrukcja WTA.
- [30] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, Dz.U. 2002 nr 75, poz. 690.
- [31] PN-EN ISO 13788:2003 *Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa. Metody obliczania*.
- [32] PN-EN 12524:2003 *Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaryczne wartości obliczeniowe*.
- [33] PN-EN ISO 6946:2008 *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania*.
- [34] Suchorab Z., Barnat-Hunek D., *Badania podciągania kapilarnego wody przez płyty wapienno-krzemianowe z wykorzystaniem technik reflektometrycznych TDR*, Materiały Budowlane, 6(2011), 74-75.

Streszczenie

Warunkiem skutecznej naprawy termicznej obiektu zabytkowego jest osuszenie zawilgoconych ścian i właściwy dobór rozwiązań technologicznych. Fizykochemiczne przyczyny uszkodzeń muru mają wpływ na jakość poprawy termicznej budynku. Różnorodność produktów renowacyjnych utrudnia podjęcie trafnej decyzji odnośnie do ich wyboru. W artykule przeprowadzono analizę cech cieplno-wilgotnościowych ściany przyziemia. W eksperymencie badawczym, uwzględniając zabytkowy charakter obiektu, przyjęto docieplenie od wewnątrz, co pokazano w dwóch wariantach technologii. Analizę materiałową oparto na pięciu przykładach rozwiązań docieplenia, która miała na celu wskazanie odpowiedniego doboru materiałów naprawczych, kompatybilnych z indywidualnymi cechami obiektu zabytkowego. W tym celu oceniono następujące parametry: współczynnik przenikania ciepła u , temperaturę punktu rosy, minimalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej. Sprawdzono też, czy zachodzi zjawisko kondensacji międzywarstwowej w przegrodzie, w celu zapobiegania szkodliwej krytycznej wilgotności powierzchni oraz rozwój pleśni.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wszystkie rozpatrywane przegrody zaprojektowano prawidłowo, zarówno pod kątem uniknięcia rozwoju pleśni, jak i temperatury punktu rosy. Jednakże tylko dwie spośród pięciu propozycji rozwiązań dociepleń spełniają wymagania odnośnie do przewodności cieplnej przegród, przy założonej jednakowej grubości izolacji termicznej. W czterech przegrodach zaproponowanych rozwiązaniach materiałowych stwierdzono możliwość wystąpienia kondensacji międzywarstwowej, ale w przypadku prawidłowej wentylacji pomieszczeń kondensat zgromadzony w przegrodzie całkowicie wyparuje w miesiącach letnich. W przypadku zastosowania płyt poliuretanowych z płytą g-k i folią paroizolacyjną maksymalna ilość kondensatu występująca na powierzchniach stykowych jest prawie o 7 razy mniejsza niż w przypadku betonu komórkowego, a płyt wapienno-krzemianowych nawet o ponad 4 razy mniejsza.

Spośród analizowanych wariantów (1-5) potwierdzono zasadność stosowania w obiekcie badań wariantu 1 (realizacja „na sucho”), który jako jedyny spełnia wszystkie analizowane wymogi niezbędne do prawidłowego projektowania dociepleń przegród budowlanych. Na tej podstawie stwierdzono, że wariant ten winien być rekomendowany do zastosowania w obiektach zabytkowych, gdyż daje najlepsze rezultaty poprawy cech fizykochemicznych i efekty dociepleń. Wyniki potwierdzają też efekty ekologiczne osiągnięte w wyniku efektywnego oszczędzania energii i poprawy komfortu cieplnego.

Abstract

Effective restoration of the thermal performance of a heritage building is conditional on the drying of damp walls and choosing the most appropriate technological solution. Physical and chemical causes of damage to walls influence the quality of a building's thermal performance improvement. The variety of renovation products now available makes it difficult to choose what is most appropriate. The paper presents an analysis of the thermal and moisture properties of basement walls. Experimental research focused on thermal insulation from the inside due to the heritage character of the building, using two technological approaches. Materials analysis was based on five different thermal insulation solutions. The goal was to recommend the most appropriate choice of materials for restoration, which would be compatible with the specific character of the heritage building in question. With this goal in mind, the following parameters were assessed: the thermal transmittance coefficient u , dew point temperature, minimum temperature coefficient on internal surfaces. Tests were also carried out to determine whether interstitial condensation was taking place in walls with the aim of finding ways to prevent critically damaging dampness of surfaces and the development of moulds.

The analysis undertaken found that all insulation options under study were properly designed with respect to preventing the development of moulds, as well as with respect to dew point temperature. Yet only two of the five proposed solutions met the requirements related to thermal conductivity of walls when an identical thickness of insulation was applied. In four walls subjected to testing, the possibility of interstitial condensation occurring was determined. But it was found that where there is appropriate ventilation of rooms, the accumulated water condensation evaporates completely in summer months. Application of polyurethane panels in conjunction with plasterboard and vapour barrier film reduces the maximum condensation on surface contact points by nearly seven times compared to autoclaved aerated concrete (AAC) and by four times compared to calcium-silicate panels.

The analysis confirmed that option 1 ('dry' implementation) was the most appropriate of all the technological solutions analysed (1-5), as this was the only one to meet all the requirements deemed essential for the appropriate design of thermal insulation of building walls. On the basis of the analysis, it was concluded that this option should be recommended for use in heritage buildings as it resulted in the best improvement in physical and chemical properties and thermal insulation effectiveness. The outcomes also confirmed environmental benefits resulting from effective energy saving and improvement in thermal comfort.