

dr inż. Bartosz Zegardło

Wydział Przyrodniczy

Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

dr hab. inż. Jerzy Nitychoruk

mgr inż. Monika Jarosz-Hadam

mgr inż. Daniel Tokarski

Państwowa Szkoła Wyższa im Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej

st. kpt. dr inż. Paweł Ogrodnik

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Analiza wpływu zmienności podstawowych parametrów fizycznych materiałów izolacyjnych na przepływ ciepła przez przegrodę budowlaną

Abstrakt

Zagadnienia ochrony środowiska od lat koncentrują się na oszczędnościach energii użytkowanej w okresach jesienno-zimowych zużywanej na ogrzewanie budynków. Restrykcyjne wymogi przepisów prawnych wymagają od projektantów, aby przegrody obiektów posiadały odpowiednie parametry izolacyjności termicznej, a stosowane urządzenia grzewcze posiadały wysokie parametry wydajności. Celem tych działań jest z jednej strony zmniejszenie zużycia ilości paliw naturalnych, których zasoby są ograniczone z drugiej zaś zmniejszenie emisji powstałych odpadów spalania wydzielanych do atmosfery.

Stosunkowo nowym zagadnieniem, które związane jest ze zmieniającym się klimatem są poszukiwania oszczędności energii użytkowanej na ochronę przed gorącem w okresach letnich. Zmieniający się klimat, wzrost temperatur panujących latem oraz podniesienie standardów życia sprawiły, że stosowanie elektrycznych klimatyzatorów jest zjawiskiem codziennym. W skali globalnej zwiększenie zużycia energii elektrycznej, która jest wciąż produkowana w dużej mierze w elektrociepłowniach finalnie ma identyczny wpływ na środowisko jak efekty ogrzewania. Z powodów powyższych prowadzi się prace badawcze, których celem jest poprawa izolacyjności termicznej przegród przed wysokimi temperaturami w okresach letnich.

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule była ocena wpływu zmienności podstawowych parametrów fizycznych materiałów izolacyjnych takich jak gęstość oraz wilgotność na możliwość przepływu ciepła przez przegrodę budowlaną w warunkach symulujących nagrzewanie jej powierzchni w okresie letnim.

Do badań wykorzystano stanowisko badawcze zachowania się materiałów budowlanych w wysokich temperaturach. Badaniom poddano materiały budowlane takie jak styropian, wełna mineralna, beton komórkowy oraz ceramikę porowatą. Z wymienionych materiałów wykonano modele laboratoryjne przegród budowlanych. Symulację nagrzewania powierzchni przegrody prowadzono przy pomocy nagrzewnicy technicznej, która nagrzewała jej powierzchnie do temperatury 100°C. Na przeciwległej stronie przegrody obserwowano temperaturę przy pomocy termometru elektronicznego. Parametrem poddawanym ocenie była zmienność temperatury w czasie nagrzewania. Wyniki badań wskazały, jaki wpływ na przepływ ciepła przez przegrodę mają zawilgocenie i gęstość materiałów stosowanych do jej budowy.

Słowa kluczowe: przenikanie ciepła, izolacja termiczna, przegrody budowlane

Analysis of the Influence of the Variation of Basic Physical Parameters of Insulating Materials on Penetrating Heat Through the Building Baffle

Abstract

Environmental issues have been focused on energy savings during the autumn and winter months for heating buildings. Restrictive regulatory requirements require designers to ensure that the building's baffles have adequate thermal insulation and that the heating appliances used have high performance parameters. On the one hand, the aim of these measures is to reduce the consumption of the amount of natural fuels whose resources are limited and, on the other, to reduce the emission of combustion waste released into the atmosphere.

A relatively new issue that is related to changing climate is the search for energy savings for heat protection in summer. The changing climate, rising temperatures in the summer and raising standards of living have made the use of electric air conditioners a daily phenomenon. On a global scale, increased electricity consumption, which is still being produced on a large scale in combined heat and power plants, has the same environmental impact as heating. For these reasons, extensive research is underway to improve the thermal insulation of the partitions against high summer temperatures.

The purpose of the research presented in this article was to assess the influence of the variability of basic physical parameters of insulation materials on the possibility of penetrating heat through the building envelope under conditions simulating the heating of its surface in the summer. The research was carried out on the behavior of building materials at high temperatures. Construction materials such as polystyrene, mineral wool, cellular concrete and porous ceramics were tested. These materials were imitated laboratory of building partitions. Simulation of the heating of the partition surface was carried out with the aid of a technical dryer, which heated its surfaces to a temperature of 100°C. On the opposite side of the barrier, the temperature was measured with an electronic thermometer. The parameter being evaluated is the temperature variation during heating. The results of the tests indicated the physical parameters of the insulating materials, which influence the possibility of penetrating the heat through the septum.

Keywords: heat penetration, thermal insulation, building partition

Wstęp

Naciski proekologiczne wyrażane w rozmaity sposób w różnych dziedzinach gospodarki, nie omijają również zagadnień budowlanych [1]. Szczególną uwagę zwraca się tu na ochronę środowiska zanieczyszczonego paliwami spalnymi w celu ogrzewania pomieszczeń w okresach jesienno-zimowych. Zbyt duże zużycie paliw z jednej strony wyczerpuje nadmiernie ich naturalne zasoby, z drugiej zaś gazy powstające przy ich spalaniu powodują zanieczyszczenie atmosfery.

Jednym ze sposobów ograniczających to zjawisko jest wprowadzenie specjalnych wymogów dotyczących stosowania przegród budowlanych o odpowiedniej izolacyjności termicznej [2]. Przegrody budowlane spełniające te wymagania sprawiają, że stosunkowo niewielka ilość energii cieplnej jest potrzebna do uzyskania komfortu cieplnego wewnątrz obiektów budowlanych, co wiąże się z mniejszą ilością paliwa zużywanego na powyższe cele.

Jednym z dokumentów prawnych, które narzucają na projektantów konieczność stosowania odpowiednich przegród, jest Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2014 r. (Dz.U. z 13 sierpnia 2014 r. poz. 926) [7]. Obliguje ono do prowadzenia kalkulacji dla obiektów, w których oblicza się roczne zużycie energii w odniesieniu do

jednego metra kwadratowego powierzchni obiektu. Parametr ten w sposób ogólny określa jak skuteczne zastosowane są przegrody decydujące o zużyciu paliw niezbędnych do jej ogrzania. Wpływ na ilość zużywanej energii mogą mieć również podstawowe parametry fizyczne, takie jak: gęstość, zawilgocenie, temperatura materiałów izolacyjnych. Mogą one różnicować współczynnik przenikania ciepła dla materiałów budowlanych [3, 4] i co z tym się wiąże wpływać na zmienność współczynnika obliczanej przegrody.

Stosunkowo nowym zagadnieniem, które związane jest ze zmieniającym się klimatem są poszukiwania oszczędności energii użytkowanej na ochronę przed gorącem w okresach letnich [5]. Zmieniający się klimat, wzrost temperatur panujących latem oraz podniesienie standardów życia sprawiły, że stosowanie elektrycznych klimatyzatorów jest zjawiskiem powszechnie obserwowanym [6]. W dużej skali zwiększenie zużycia energii elektrycznej, która jest wciąż produkowana przede wszystkim w elektrociepłowniach finalnie ma identyczny wpływ na środowisko jak efekty ogrzewania.

Biorąc pod uwagę powyższe, prowadzi się liczne prace badawcze, których przedmiotem są badania izolacyjności termicznej materiałów i przegród. Głównym ich celem jest zmniejszenie zużycia energii na zapewnienie komfortu cieplnego. Badania te objerają wiele kierunków. Z jednej strony bada się zmiany współczynników przenikania ciepła występujące na skutek zmian zachodzących w obrębie materiału [8, 9], jak np. na skutek starzenia [8]. Z drugiej zaś strony parametry te bada się pod kątem oceny izolacyjności materiałów nowych, które wprowadzone mają być dopiero na rynek [12, 13, 14, 15].

Oprócz prac nad samymi materiałami bada się również wpływ ich cech fizycznych oraz środowiska, w jakim pracują na współczynnik przenikania ciepła przez przegrody. W pracy [16] przedstawiono analizę wpływu wilgotności sorpcyjnej na przewodność cieplną betonów komórkowych. Wyniki badań dowiodły, że wzrost przewodności cieplnej betonów komórkowych w wyniku sorpcji w powietrzu o wilgotności względnej do 80% jest nieduży i nie przekracza 15%. Znaczny wzrost przewodności cieplnej, w przybliżeniu do 45%, następował natomiast wskutek kondensacji kapilarnej przy wilgotności względnej powietrza powyżej 80%. W pracy [17] podjęto badania wpływu wilgotności i temperatury powietrza na wartość współczynnika przewodności cieplnej λ materiałów termoizolacyjnych stosowanych wewnątrz pomieszczeń. Wyniki badań wykazały, że przy wzroście podczas badań średniej temperatury próbki z 10°C do 40°C zmierzono wzrost wartości λ

o około 5% dla materiałów silikatowych i o około 9% dla lekkich betonów komórkowych natomiast wraz ze wzrostem wilgotności próbek (sezonowanych w powietrzu o wilgotności od 0 do 90%) stwierdzono wyraźny wzrost wartości współczynnika λ wynoszący nawet 60%.

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule była ocena wpływu zmienności podstawowych parametrów fizycznych materiałów izolacyjnych, takich jak gęstość oraz wilgotność na możliwość przepływu ciepła przez przegrodę budowlaną w warunkach symulujących nagrzewanie jej powierzchni w okresie letnim. Badaniom poddano materiały budowlane, takie jak styropian, wełna mineralna, beton komórkowy oraz ceramika porowata. Z wymienionych materiałów wykonano modele laboratoryjne przegród budowlanych. Prowadzono symulację nagrzewania jednej powierzchni przegrody jednocześnie obserwując wzrost temperatury na ścianie przeciwległej. Wyniki badań umożliwiły przeprowadzenie analizy wpływu rodzaju przegród różniących się parametrami fizycznymi na możliwość przenikania przez nie strumienia ciepła.

2. Materiały i metodyka badań

2.1. Ogólna charakterystyka materiałów poddanych badaniu

Badaniom wpływu oceny zmienności podstawowych parametrów fizycznych na możliwość przenikania ciepła poddano materiały izolacyjne popularnie wykorzystywane do budowy przegród budowlanych. Pierwszą serię badań przeprowadzono w warunkach symulujących przegrody dachowe. Badanymi materiałami były styropian w dwóch wariantach: miękki i twardy oraz wełna mineralna również w wariacie miękkim oraz twardym.

Styropian wg danych producenta otrzymany został poprzez spienienie wstępnie spienionych granulek polistyrenu, zawierających porofor. Do badań użyto zarówno styropianu nazywanego dalej twardym o gęstości 40 kg/m^3 i deklarowanej przez producenta przewodności cieplnej $\lambda = 0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ oraz styropianu zwanego dalej miękkim o gęstości 15 kg/m^3 i deklarowanej przewodności cieplnej $\lambda = 0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Wartości współczynników przewodnictwa cieplnego były mierzone zgodnie z normą EN 12667.

Wełna mineralna użyta do badań wykonana była z kamienia bazaltowego. Gęstość w zależności od wyrobu wynosiła 40 kg/m^3 dla wełny mineralnej

w postaci maty (wełna zwana dalej miękką) i 100 kg/m^3 dla płyt (wełna twarda). Deklarowany współczynnik przewodności cieplnej wynosił $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ dla wełny miękkiej i $0,050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ dla wełny twardej.

Do imitacji przegród ściennych wykorzystano beton komórkowy (ABK). Gęstość użytego do badań betonu komórkowego wynosiła 600 kg/m^3 , a deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła oszacowano na $\lambda = 0,170 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Jako elementy porównawcze dla bloczków z betonu komórkowego wykorzystano ścienne pustaki ceramiczne. Gęstość objętościowa wyrobu wynosiła 740 kg/m^3 deklarowany współczynnik przenikania ciepła był równy: $\lambda = 0,183 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

2.2 *Metodyka badań*

2.2.1 **Przepływ ciepła przez przegrodę – zagadnienie teoretyczne**

Przepływ ciepła jest zjawiskiem występującym, gdy wewnątrz określonego układu lub między określonymi układami, które mogą na siebie oddziaływać istnieje różnica temperatury [3, 4]. Według drugiej zasady termodynamiki w układach takich dochodzi do wymiany energii, polegającej na oddaniu energii z układu o wyższej temperaturze układowi o temperaturze niższej. Pierwszej zasadzie termodynamiki podlegają związki ilościowe ustalające ilość wymienianej energii. W zależności od stanu skupienia ciał, możemy rozróżnić trzy formy przenoszenia ciepła: przewodzenie, konwekcję oraz promieniowanie. Podział ten spowodowany jest różnorodnością mechanizmu przenoszenia energii cieplnej. W rzeczywistości rzadko spotyka się występowanie wyżej wymienionych form w czystej postaci. Zazwyczaj są one ze sobą powiązane.

Przewodzenie ciepła jest jednym ze sposobów wymiany ciepła polegającym na bezpośrednim przekazywaniu energii wewnętrznej drobinom o niższej temperaturze przez stykające się z nimi drobiny takiego samego lub innego ciała posiadającego wyższą temperaturę. Przewodzenie ciepła zachodzi we wszystkich stanach skupienia materii. Konwekcja jest procesem przekazywania ciepła wynikającym z makroskopowego ruchu ogrzanych cząsteczek w dowolnej substancji. Przez konwekcję należy rozumieć ruch cząsteczek związanych z różnicami temperatur, prowadzący do przenoszenia ciepła.

Konwekcja, jako proces przekazywania energii jest silnie zależny od substancji i warunków, w jakich zachodzi, jednakże jest wydajnym sposobem przekazywania ciepła. Promieniowanie cieplne polega na wymianie energii pomiędzy dwoma ciałami, przenoszone jest przez kwanty promieniowania w formie fal elektromagnetycznych, które nie stykają się wzajemnie ze sobą. W przeciwieństwie do konwekcji czy przewodzenia, promieniowanie nie wymaga obecności żadnego ośrodka materialnego, w którym mógłby zachodzić transport energii. Promieniowanie może zachodzić także w próżni. Promieniowanie elektromagnetyczne wysyłają wszystkie ciała w mniejszym lub większym stopniu, a zależy to między innymi od rodzaju powierzchni ciała i jego temperatury. Energia promieniowania przemieszcza się z prędkością równą prędkości światła, wynika to z elektromagnetycznego pochodzenia tej energii.

Przenikanie ciepła jest, więc w ujęciu ogólnym transportem ciepła przez przegrodę. Dla oceny ilościowej tego zjawiska zakłada się, że odbywa się ono przez przejmowanie ciepła z ośrodka o temperaturze wyższej t_i , przewodzenia ciepła przez przegrodę i przejmowanie ciepła przez ośrodek o temperaturze niższej t_e . W wyniku przepływu strumienia cieplnego o gęstości q , na poszczególnych warstwach jednorodnych płaskiej przegrody np. wielowarstwowej powstają spadki temperatury, będące iloczynem gęstości strumienia cieplnego i wartości oporów cieplnych. Gęstość strumienia cieplnego q płynącego przez przegrodę o współczynniku przenikania ciepła U , oddzielającą strefę o temperaturze obliczeniowej t_i od strefy o temperaturze t_e określić można ze wzoru:

$$q = U \cdot (t_i - t_e) \quad (1)$$

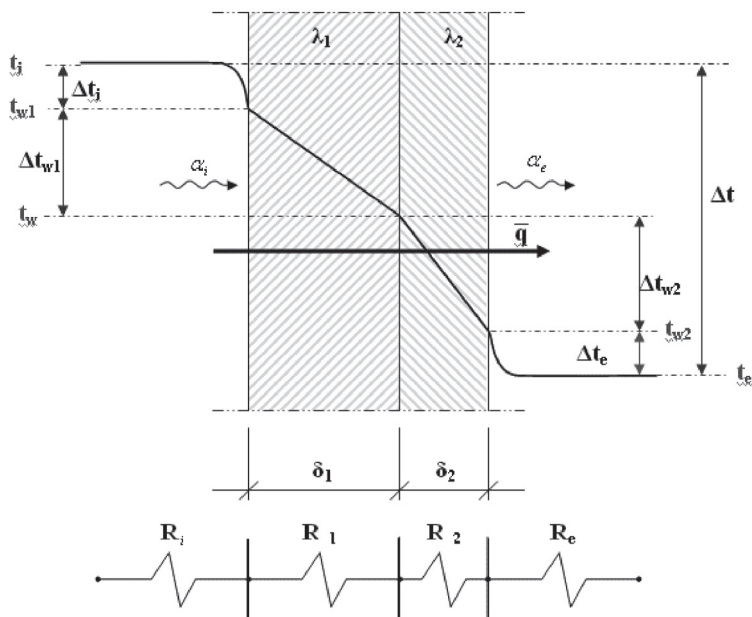
W wyniku przepływu strumienia cieplnego o gęstości q , na poszczególnych warstwach jednorodnych płaskiej przegrody wielowarstwowej powstają spadki temperatury, będące iloczynem gęstości strumienia cieplnego i wartości oporów cieplnych. Spadek temperatury na powierzchni wewnętrznej wynosi $q \cdot R_{si}$, stąd temperatura powierzchni wewnętrznej jest równa:

$$\vartheta_i = t_i - q \cdot R_{si} = t_i - U \cdot (t_i - t_e) \cdot R_{si} = t_i - [(t_i - t_e) \cdot R_{si}] / R_t \quad (2)$$

gdzie:

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3)$$

Opierając się na wymienionych wzorach można obliczyć temperaturę zarówno na granicy warstw w przegrodzie jak i temperaturę przy ich powierzchni. Schemat przepływu powietrza przez przegrodę przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1. Schemat przepływu ciepła przez przegrodę

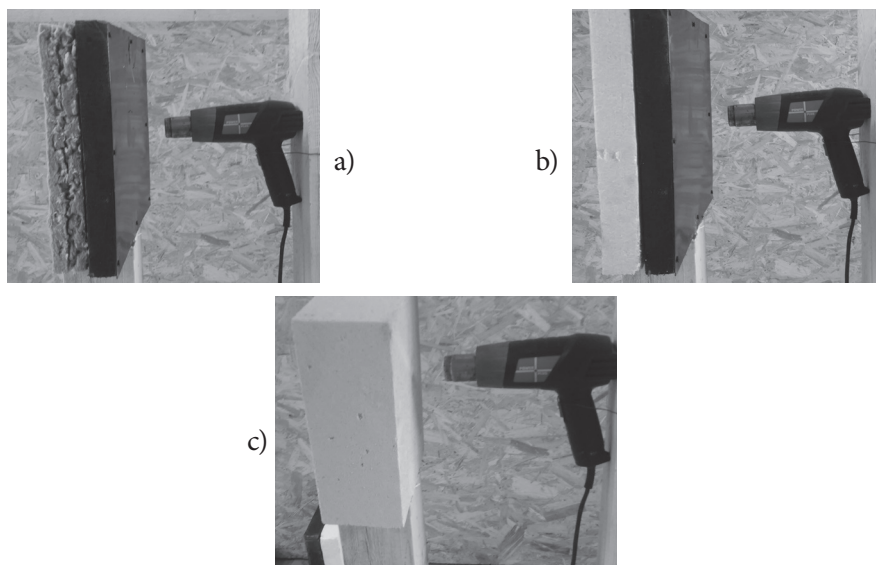
Źródło: [18]

2.2.2 Badanie przepływu ciepła przez przegrodę – autorska metoda badawcza

Z wyrobów izolacyjnych: płyty wełny mineralnej o wymiarach $35 \times 35 \times 5$ cm oraz płyt styropianowych o wymiarach $50 \times 100 \times 5$ cm przygotowano próbki badawcze – prostopadłościenne o wymiarach $35 \times 35 \times 5$ cm. Z bloczków z betonu komórkowego oraz pustaków ceramicznych o wymiarach $25 \times 59 \times 12$ cm – przygotowano próbki badawcze o wymiarach zbliżonych do tych jakie wykonano z materiałów izolacji dachowych, tj. $35 \times 25 \times 12$ cm. Wymiary próbek badawczych podyktowane były wymiarami użytych wyrobów. Założeniem było nie wykonywanie spoin w obrębie próbki badawczej, dlatego próbki materiałów ściennych były mniejsze.

Do badań wykorzystano stanowisko badawcze do obserwacji zachowania się materiałów w warunkach wysokich temperatur. Stanowisko składało się z nagrzewnicy technicznej o mocy 2500 W, statywów mocujących oraz termometru elektronicznego. Nagrzewnica została usytuowana w ten sposób, aby strumień ciepłego powietrza kierowany był bezpośrednio na model przygotowanej przegrody. Pomiarów temperatury dokonywano przy użyciu termometru elektronicznego. Czujnik termometru przykładano do środka powierzchni przegrody przeciwległej do tej, na którą kierowany był strumień ciepła.

Model przegrody dachowej wykonany został z blachy dachowej, którą przytwierdzono do ramy wykonanej z drewna sosnowego z listew o wymiarach 4×5 cm, stanowiących imitację łąt dachowych. Wymiary ramy odpowiadały wymiarom blachy i były one tożsame z wymiarami przygotowanych próbek materiałów izolacyjnych. Ramę z blachą pomalowano farbą żaroodporną, po czym przytwierdzano do niej kolejno materiały izolacyjne. Imitacja przegrody ściennej zrealizowana została z nieosłoniętych elementów wykonanych z betonu komórkowego lub pustaków ceramicznych. Widok stanowiska badawczego podczas prób laboratoryjnych z różnymi rodzajami przegród pokazano na rys. 2, natomiast widok termometru elektronicznego na rys. 3.



Rys. 2. Stanowisko badawcze podczas badania

a) wełny mineralnej, b) styropianu, c) bloczka z betonu komórkowego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Widok termometru elektronicznego zastosowanego do pomiaru temperatury
Źródło: opracowanie własne

Próby prowadzono w pomieszczeniu laboratoryjnym o temperaturze około 14°C strumień ogrzanego powietrza posiadał temperaturę od 20°C do 100°C , co modelowało temperaturę, do której nagrzewają się nasłonecznione powierzchnie przegród budowlanych w gorące dni.

Dla oceny wpływu zawilgocenia materiałów na przepływ przez nie ciepła wszystkie badane materiały badano zarówno w środowisku suchym jak i poddawano je zawilgoceniu przez zamgławianie ich powierzchni wodą. Zamgławianie wykonywane było w dwóch wariantach – przy jednokrotnym użyciu 100 ml wody (zwane dalej średnim zwilżaniem) oraz zużyciu wody 500 ml (zwanym dalej silnym zawilgoceniem – nasączaniem).

Podczas badania mierzono temperaturę po przeciwległej od nagrzewanej stronie przegrody bezpośrednio przy jej powierzchni. Temperatura badana była w odstępach czasu co 5 min do 30. min podgrzewania. Odstępy pomiaru czasu oraz ostateczny czas nagrzewu podyktowane były zmianami, jakie obserwowano podczas nagrzewów próbnych. W krótszych odstępach czasu zmiany były znikome. Po upływie 30 min nagrzewania materiały powierzchniowo wilgotne stawały się suche i prowadzenie dłuższych prób nie było uzasadnione.

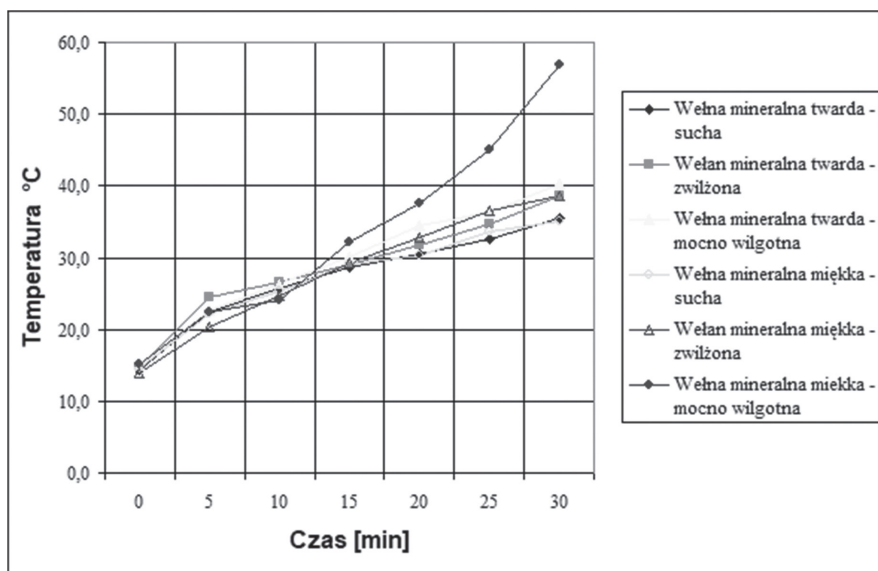
3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań dla kolejnych przegród oraz w warunkach różnego zawilgocenia przedstawiono w tabelach 1, 2, 3 i 4 oraz na odpowiadającym im wykresach pokazanych na rys. 4, 5, 6 i 7.

Tabela 1. Zarejestrowane temperatury w °C dla modelu przegrody dachowej z wełną mineralną

Czas [min]	Wełna mineralna twarda sucha	Wełna mineralna twarda zwilżona	Wełna mineralna twarda mocno wilgotna	Wełna mineralna miękka sucha	Wełna mineralna miękka zwilżona	Wełna mineralna miękka mocno wilgotna
0	14,3	14,8	15,0	14,5	14,0	15,2
5	22,5	24,6	22,7	22,3	20,4	22,4
10	25,8	26,6	26,4	25,4	24,8	24,0
15	28,6	29,0	30,1	29,0	29,3	32,1
20	30,5	31,7	34,5	30,4	32,8	37,6
25	32,6	34,7	36,4	33,7	36,5	45,1
30	35,6	38,6	40,2	35,0	38,6	56,8

Źródło: opracowanie własne



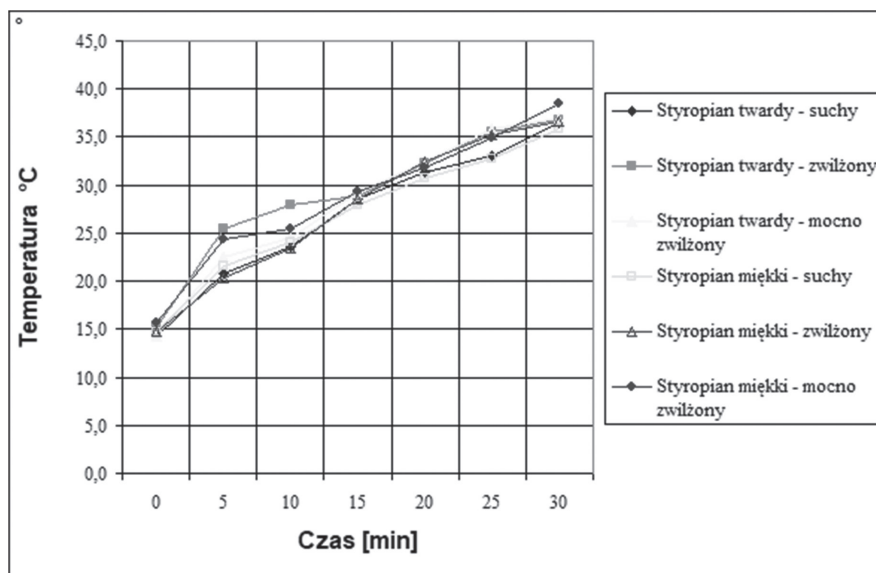
Rys. 4. Przebieg temperatury dla przegrody dachowej z wełną mineralną

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2. Zarejestrowane temperatury w °C dla modelu przegrody dachowej ze styropianem

Czas [min]	Styropian twardy suchy	Styropian twardy zwilżony	Styropian twardy mocno zwilżony	Styropian miękki suchy	Styropian miękki zwilżony	Styropian miękki mocno zwilżony
0	14,3	15,2	14,3	14,8	14,8	15,6
5	20,8	25,5	22,5	21,5	20,4	24,4
10	23,6	27,9	24,5	24,0	23,4	25,4
15	28,6	28,9	29,1	27,9	28,5	29,4
20	31,4	32,2	32,4	30,8	32,4	31,8
25	33,0	35,5	35,8	32,8	35,2	34,9
30	36,5	36,8	37,0	35,9	36,6	38,5

Źródło: opracowanie własne



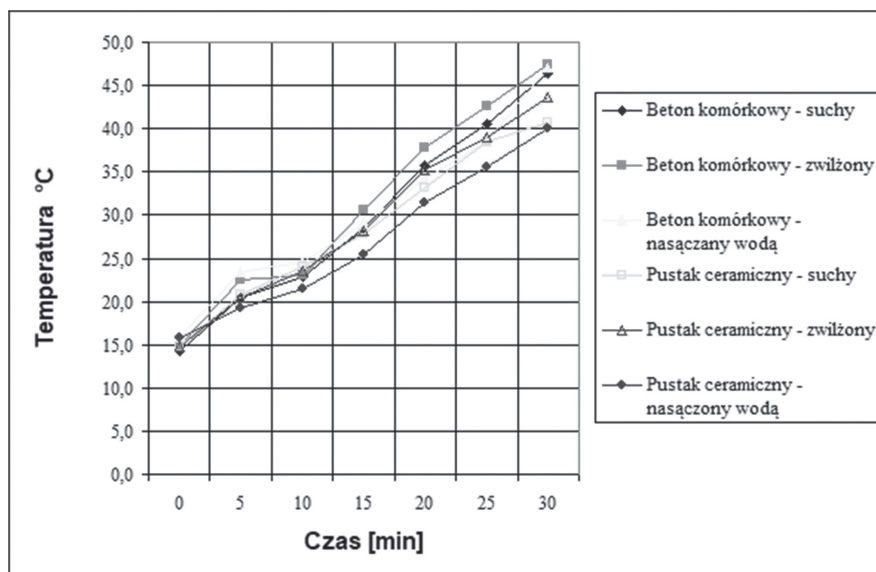
Rys. 5. Przebiegi temperatury dla przegrody dachowej ze styropianem

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3. Zarejestrowane temperatury w °C dla modeli przegród z betonu komórkowego i pustaków ceramicznych

Czas [min]	Beton komórkowy suchy	Beton komórkowy zwilżony	Beton komórkowy nasączony wodą	Pustak ceramiczny suchy	Pustak ceramiczny zwilżony	Pustak ceramiczny nasączony wodą
0	14,3	14,9	15,9	14,8	14,8	15,8
5	20,5	22,5	23,4	20,8	20,4	19,2
10	22,8	23,1	24,5	24,0	23,5	21,4
15	28,6	30,5	29,1	27,9	28,1	25,4
20	35,8	37,8	34,2	33,1	35,3	31,4
25	40,5	42,6	38,5	38,5	39,0	35,6
30	46,4	47,5	47,1	40,7	43,6	40,0

Źródło: opracowanie własne



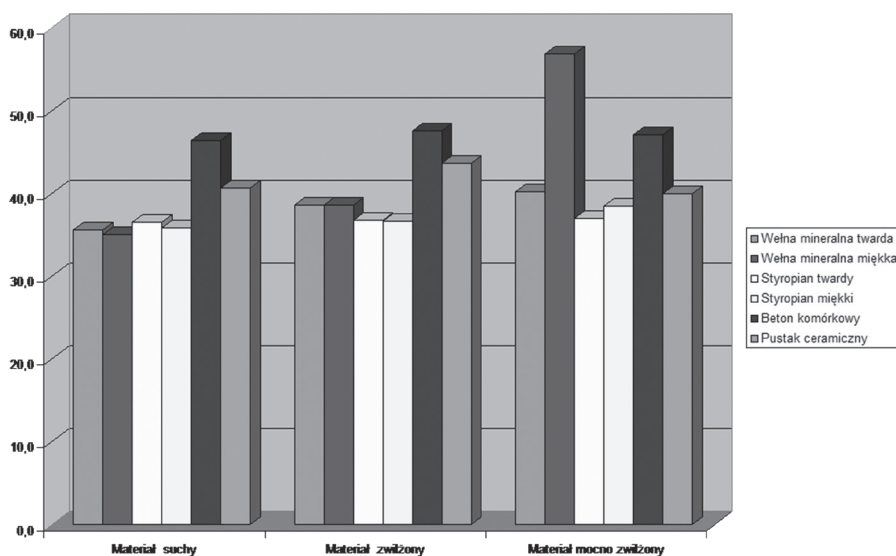
Rys. 6. Wykres wzrostów temperatury dla przegród ściennych wykonanych z betonu komórkowego i pustaka ceramicznego

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4. Zestawienie temperatur po 30-minutowym nagrzewie dla różnych materiałów o różnym stopniu zawilgocenia

Temperatura po 30 min nagrzewu	Materiał suchy	Materiał zwilżony	Materiał mocno zwilżony
Wełna mineralna twarda	35,6	38,6	40,2
Wełna mineralna miękka	35,0	38,6	56,8
Styropian twardy	36,5	36,8	37,0
Styropian miękki	35,9	36,6	38,5
Beton komórkowy	46,4	47,5	47,1
Pustak ceramiczny	40,7	43,6	40,0

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Zestawienie temperatur po 30-minutowym nagrzewie dla różnych materiałów o różnym stopniu zawilgocenia

Źródło: opracowanie własne

Analiza wyników badań dowiodła, że w przypadku materiału nasiąkliwe-
wego, takiego jak wełna mineralna zarówno gęstość materiału, jak i jego
wilgotność mają wpływ na przepływ ciepłego powietrza przez przegrodę.
W przypadku wełny mineralnej, zarówno twardej, jak i miękkiej wraz ze
wzrostem wilgotności temperatura zbadana po 30 min nagrzewu była wyż-
sza. Porównanie dowodziło, że dla materiału mocno nawilżonego odczytane
wartości temperatury były odpowiednio dla wełny o wyższej gęstości – 12%
i dla wełny o niższej gęstości – 62% wyższe niż te, które odczytano dla tych
materiałów w stanie suchym. Niższą temperaturę powierzchni przegrody
odczytano dla wełny zawilgoconej w pierwszych minutach nagrzewu. Zja-
wisko to prawdopodobnie spowodowane było pochłanianiem ciepła przez
wodę służącą do zwilżania materiału.

Opisane różnice odczytów temperatury analogicznie obliczone dla styro-
pianów o różnej gęstości były niewielkie. Temperatura po 30 min nagrzewu dla
styropianu o wyższej gęstości była o 1% wyższa niż dla styropianu suchego i dla
styropianu o niższej gęstości 7% wyższa niż dla styropianu suchego. Podobnie
niewielkie różnice wartości po 30 min nagrzewu wynoszące do 2% obserwowano
dla porównania temperatury dla materiałów ściennych o różnej wilgotności.

Różnice w odczytanej temperaturze po 30 min nagrzewu dla materiałów
suchych, które wynikały z ich zróżnicowanej gęstości były również niewiel-
kie. Zarówno dla styropianu jak i wełny mineralnej temperatura zbadana po
30 min była niższa dla materiałów o gęstości mniejszej. Świadczyło to o tym,
że materiał o niższej gęstości jest bardziej izolacyjny – różnice te jednak w od-
niesieniu do porównania temperatury były niższe niż 2%.

Przyczynę powyżej opisanych wyników badań doszukuje się w procesach
fizycznych zachodzących w materiałach izolacyjnych podczas nagrzewu.
Podczas procesu zwilżania elementu przez zamgławianie zaobserwowano,
że elementy nie nasiąkliwe tj. styropian i ceramika nie chłonęły wilgoci,
a krople wody jedynie po nich spływały. Elementy nasączone wodą – wełna
mineralna oraz beton komórkowy, w których strukturę woda wnikała – pod-
czas nagrzewania wysychały. W przypadku wełny mineralnej zawilgoconie
powodowało jednak zmianę struktury samego materiału – jej ściśnięcie –
co nie było procesem samoistnie odwracalnym podczas suszenia i prawdo-
podobnie miało wpływ na zbadane temperatury.

Opisane wyniki prac badawczych porównano z wynikami symulacji ob-
liczeniowej. W programie Excel stworzono aplikację obliczającą temperaturę

w miejscu jej badania. Założono oddziaływanie na przegrodę stałej temperatury 100°C. Korzystano z ogólnych metod obliczania temperatury w warstwach i na powierzchni przegrody przedstawionych w pkt. 2.2.1. Wyniki tych obliczeń zaprezentowano w tabelach 5, 6, 7, 8, 9 i 10. Temperatura przy powierzchni przegrody, która porównywana była z temperaturą zbadaną, wyróżniona została każdorazowo w tabeli szarym tłem.

Tabela 5. Temperatury w kolejnych warstwach przegrody z wełny mineralnej miękkiej

Warstwa/ ośrodek	q [kg/m ³]	d [m]	λ [W/(m·K)]	Ri [(m ² ·K)/W]	ΔRi [(m ² ·K)/W]	ti [°C]	te [°C]	ti - te [°C]	θi-j [°C]
Rsi	-	-	-	0,1300	0,1300	100	14	86	93,01
Błacha	7500	0,006	58	0,0001	0,1301	100	14	86	93,00
Pustka powietrzna	-	0,05	-	0,0000	0,1301	100	14	86	93,00
Wełna mineralna miękka	40	0,05	0,035	1,4286	1,5587	100	14	86	16,15
Rse	-	-	-	0,0400	1,5987	100	14	86	14,00
			Rt [(m ² ·K)/W]	1,5987					

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6. Temperatury w kolejnych warstwach przegrody z wełny mineralnej twardej

Warstwa/ ośrodek	q [kg/m ³]	d [m]	λ [W/(m·K)]	Ri [(m ² ·K)/W]	ΔRi [(m ² ·K)/W]	ti [°C]	te [°C]	ti - te [°C]	θi-j [°C]
Rsi	-	-	-	0,1300	0,1300	100	14	86	90,45
Błacha	7500	0,006	58	0,0001	0,1301	100	14	86	90,44
Pustka powietrzna	-	0,05	-	0,0000	0,1301	100	14	86	90,44
Wełna mineralna twarda	100	0,05	0,05	1,0000	1,1301	100	14	86	16,94
Rse	-	-	-	0,0400	1,1701	100	14	86	14,00
			Rt [(m ² ·K)/W]	1,1701					

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7. Temperatury w kolejnych warstwach przegrody ze styropianu miękkiego

Warstwa/ ośrodek	ρ [kg/m ³]	d [m]	λ [W/(m·K)]	R_i [(m ² ·K)/W]	ΔR_i [(m ² ·K)/W]	t_i [°C]	t_e [°C]	$t_i - t_e$ [°C]	θ_{i-j} [°C]
Rsi	-	-	-	0,1300	0,1300	100	14	86	92,48
Blacha	7500	0,006	58	0,0001	0,1301	100	14	86	92,47
Pustka powietrzna	-	0,05	-	0,0000	0,1301	100	14	86	92,47
Styropian miękki	15	0,05	0,038	1,3158	1,4459	100	14	86	16,32
Rse	-	-	-	0,0400	1,4859	100	14	86	14,00
			R_t [(m ² ·K)/W]	1,4859					

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8. Temperatury w kolejnych warstwach przegrody ze styropianu twardego

Warstwa/ ośrodek	ρ [kg/m ³]	d [m]	λ [W/(m·K)]	R_i [(m ² ·K)/W]	ΔR_i [(m ² ·K)/W]	t_i [°C]	t_e [°C]	$t_i - t_e$ [°C]	θ_{i-j} [°C]
Rsi	-	-	-	0,1300	0,1300	100	14	86	93,55
Blacha	7500	0,006	58	0,0001	0,1301	100	14	86	93,54
Pustka powietrzna	-	0,05	-	0,0000	0,1301	100	14	86	93,54
Styropian twardy	40	0,05	0,032	1,5625	1,6926	100	14	86	15,99
Rse	-	-	-	0,0400	1,7326	100	14	86	14,00
			R_t [(m ² ·K)/W]	1,7326					

Źródło: opracowanie własne

Tabela 9. Temperatura w kolejnych punktach przegrody z betonu komórkowego

Warstwa/ ośrodek	q [kg/m ³]	d [m]	λ [W/(m·K)]	R_i [(m ² ·K)/W]	ΔR_i [(m ² ·K)/W]	t_i [°C]	t_e [°C]	$t_i - t_e$ [°C]	ϑ_{i-j} [°C]
R _{si}	-	-	-	0,1300	0,1300	100	14	86	92,93
Beton komórkowy	600	0,24	0,17	1,4118	1,5418	100	14	86	16,17
R _{se}	-	-	-	0,0400	1,5818	100	14	86	14,00
			R_t [(m ² ·K)/W]	1,5818					

Źródło: opracowanie własne

Tabela 10. Temperatura w kolejnych punktach przegrody z pustaka ceramicznego

Warstwa/ ośrodek	q [kg/m ³]	d [m]	λ [W/(m·K)]	R_i [(m ² ·K)/W]	ΔR_i [(m ² ·K)/W]	t_i [°C]	t_e [°C]	$t_i - t_e$ [°C]	ϑ_{i-j} [°C]
R _{si}	-	-	-	0,1300	0,1300	100	14	86	92,45
Ścienny pustak ceramiczny	740	0,24	0,183	1,3115	1,4415	100	14	86	16,32
R _{se}	-	-	-	0,0400	1,4815	100	14	86	14,00
			R_t [(m ² ·K)/W]	1,4815					

Źródło: opracowanie własne

Wartości temperatury obliczone przy pomocy standardowych metod były rozbieżne z wynikami odczytanymi w warunkach laboratoryjnych dla wszystkich modeli przegród. Temperatury obliczone teoretycznie były niższe od tych jakie zbadano, a różnice między nimi wynosiły około 60%. Prawdopodobnie ciepłe powietrze na skutek wymuszonego ruchu przez nagrzewnicę mogło otaczać cały model przegrody. Ten czynnik mógł wpływać na różnice pomiędzy wartościami zbadanymi i obliczonymi.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz, można wysunąć następujące wnioski:

1. Ważnym aspektem ochrony środowiska jest podejmowanie działań zmniejszających zużycie energii wykorzystywanej do ochrony obiektów przed wysokimi temperaturami.
2. Wpływ gęstości materiału na przepływ ciepła przez przygotowaną przegrodę otwartą o niewielkich rozmiarach jest niewielki.
3. Materiały o mniejszych gęstościach badane w stanie suchym wykazały lepszą izolacyjność termiczną niż materiały o gęstościach wyższych jednak różnice zbadanej temperatury po 30 min nagrzewu nie były większe niż 2%.
4. Zawilgocenie materiału nagrzewanego ma wpływ na przepływ ciepła przez przegrodę jedynie w przypadkach, w których proces zawilgocenia zmienia strukturę fizyczną samego materiału.
5. Dla wełny mineralnej miękkiej – mokrej temperatura zbadana po 30 min nagrzewu była o 60% wyższa niż dla wełny mineralnej miękkiej suchej.
6. Powierzchnowe zawilgocenie materiałów nienasiąkliwych nie wpływa na różnice w obserwowanej temperaturze nagrzewanej przegrody, ponieważ podczas nagrzewania woda z powierzchni materiału odparowuje.

Przedstawione badania należy przyjąć jako badania pilotażowe w wymienionym zagadnieniu. Wykonane one zostały w oparciu o technikę badawczą – autorską umożliwiającą opracowanie wyników jedynie metodą porównawczą. Należy kontynuować opisane badania w szerszym zakresie przy użyciu bardziej zaawansowanego sprzętu. Wyniki tych prac mogą wpłynąć na poprawienie jakości projektowanych materiałów izolacyjnych co będzie miało odzwierciedlenie w oszczędności energii zużywanej na ochronę przed wysokimi temperaturami.

Literatura

- [1] P. Klemma, Budownictwo ogólne, tom 2, Fizyka budowli. Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa 2010.
- [2] L. Lichołai, Budownictwo ogólne, tom 3, Elementy budynków – podstawy projektowania, Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa 2009.

- [3] B. Staniszewski, Wymiana ciepła podstawy teoretyczne. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
- [4] J. Lewiński, Wymiana ciepła. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Staszica w Pile, Piła 2012.
- [5] A. Ujma, Fizyka budowli, Podstawy ochrony cieplno-wilgotnościowej. Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2010.
- [6] M. Kowalik, Nowoczesne technologie robót budowlanych w budownictwie jednorodinnym, Tarnów 2008.
- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. (Dz.U. z 13 sierpnia 2013r., poz. 92).
- [8] P. Ferkl, A. Nistor, M. Padvinska, M Vonka, J. Kosek, PU foams: Modelling of heat insulation properties and their degradation in time, *Computer Aided Chemical Engineering* Vol. 40, 2017, s. 475–480.
- [9] F. Collet, S.Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, 65 (2014), pp. 612–619.
- [10] I. Muizniece, D. Blumberga, A. Ansona, The Use of Coniferous Greenery for Heat Insulation Material Production, *Energy Procedia*, Vol. 72, 2015, s. 209–21.
- [11] F. Collet, S.Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, *Construction and Building Materials*, 65 (2014), pp. 612–619.
- [12] X. Li, G. Lope, N. Ikechukwuka, O. Satyanarayan, Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber–HDPE biocomposites at processing temperature, *Composites Science and Technology*, 68 (7–8) (2008), pp. 1753–1758.
- [13] S. Panyakaew, S. Fotios New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings*, 43 (7) (2011), pp. 1732–1739.
- [14] H. Binici, R. Gemci, H. A. Kucukonder, Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and bariet. *Construction and Building Materials*, 30 (2012), pp. 826–832.
- [15] H. Kymäläinen, A. Maija, Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43 (7) (2008), pp. 1261–1269.

- [16] A. Sobociński, Wpływ wilgotności sorpcyjnej na przewodność cieplną betonów komórkowych, *Prace instytutu techniki budowlanej – kwartalnik*, nr 4 (128), 2003, s. 35–47.
- [17] M. Trochonowicz, B. Witek, M. Chwiej; Analiza wpływu wilgotności i temperatury powietrza na wartość współczynnika przewodności cieplnej λ materiałów termoizolacyjnych stosowanych wewnątrz pomieszczeń, *Budownictwo i Architektura*, 12(4), (2013), s. 165–176.
- [18] www.pg.gda.pl/audyt_energetyczny/pliki/Ocena_co.../8_Przenikanie_ciepla.doc.