

Wpływ wilgotności powietrza i temperatury na współczynnik przewodzenia ciepła tynków perlitowych

Maciej Trochonowicz

<https://orcid.org/0000-0001-7742-7916>
m.trochonowicz@pollub.pl

Bartosz Szostak

<https://orcid.org/0000-0002-2325-7103>
b.szostak@pollub.pl

Paulina Hendzel

pa.borek11@gmail.com

*Katedra Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Lubelska*

Streszczenie: Celem artykułu jest przedstawienie zagadnienia związanego z wpływem wilgotności powietrza oraz temperatury na wartość współczynnika przewodzenia ciepła tynków perlitowych. Badania laboratoryjne pozwoliły na wyznaczenie wartości współczynnika λ w zależności od temperatury badania oraz wilgotności powietrza (RH). Na podstawie pomiarów wyznaczono sorpcyjność i gęstość materiałów oraz wytrzymałość próbek na zginanie i ściskanie.

Słowa kluczowe: tynki perlitowe, współczynnik przewodzenia ciepła, izolacyjność cieplna

Wprowadzenie

Perlit jako materiał jest coraz częściej wykorzystywany w budownictwie [21]. Na świecie pierwsze informacje o wykorzystaniu perlitu w budownictwie pojawiły się w połowie lat 40. XX wieku [17]. Perlit jest kwaśną skałą wylewną pochodzenia wulkanicznego. Skała ta powstała w wyniku zetknięcia się rozgrzanej lawy z wodą, co doprowadziło do powstania porowatej struktury.

W składzie chemicznym perlitu przeważającą część zajmuje krzemionka, która stanowi prawie $\frac{3}{4}$ całej objętości. Inne związki chemiczne występujące w perlicie to tlenek glinu, tlenek potasu, tlenek sodu, tlenek żelaza, tlenek wapnia, tlenek magnezu, pozostałe substancje i woda związana chemicznie. Warto zauważyć, że różnice procentowe w składzie wynikają z pochodzenia minerału. [5] Perlit jest powszechnym określeniem naturalnie występującej krzemionkowej skały wulkanicznej. Cechą wyróżniającą, która odróżnia perlit od innych szkielek wulkanicznych, jest to, że po szybkim podgrzaniu do temperatury mięknięcia (która waha się od 900°C do 1200°C), rozszerza się w stosunku do swojej pierwotnej objętości. Po odparowaniu i ulegnięciu spiekaniu struktura materiału rozszerza się. W wyniku działania wysokiej temperatury cząsteczki skały gwałtownie pęcznią, a woda związana chemicznie zmienia stan skupienia na gazowy, na skutek czego zwiększa się objętość, ale maleje gęstość. [4][21]. Potocznie proces ten nazywany jest „popkornizacją”, ponieważ struktura materiału ulega nieodwracalnym zmianom.

W ostatnich latach obserwuje się również coraz większe zainteresowanie perlitoporytem (perlitem ekspandowanym [23]). Otrzymuje się go przez obróbkę termiczną niektórych szklitych skał wulkanicznych, takich jak

np. obsydian, smołowiec czy właśnie perlit [15]. Perlit ekspandowany ma dużo korzystnych cech i właściwości. Do najważniejszych należą:

- Ognioodporność [24],
- Niski współczynnik przenikania ciepła [24],
- Dźwiękochłonność [19][24],
- Odporność na środki chemiczne [12][14],
- Neutralność dla zdrowia i środowiska [21],
- Odporność biologiczna [20],
- Przepuszczalność pary wodnej (dyfuzyjność) [29],
- Odporność na działanie ekstremalnych temperatur (dodatnich i ujemnych) [9],
- Duża lekkość (mała gęstość) [6][28].

Perlit w budownictwie posiada bardzo wiele zastosowań. W publikacji skupiono się na wykorzystaniu perlitu, jako składnika jednego ze składników tynków. Tynki perlitowe są to tynki lekkie, w których piasek zastąpiono perlitem ekspandowanym. Niestety jednak, ze względu na taką zmianę, właściwości wytrzymałościowe takiego tynku ulegają pogorszeniu na rzecz obniżenia wartości współczynnika lambda.

Producenci tynków perlitowych zalecają ich stosowanie zarówno do budynków nowych, jak i również tych istniejących [11][27].

Tynki perlitowe są stosowane zamiast warstwy styropianu, a ich zaletą w przeciwieństwie do zwykłego styropianu jest zdolność wymiany pary wodnej, a także odporność ogniowa i chemiczna. Warstwa tynku perlitowego ma bardzo dobre właściwości akustyczne, co pozwoli na zachowanie odpowiedniego wyciszenie obiektu. Wysoka paroprzepuszczalność umożliwi stosowanie tynków ciepłochronnych również wewnątrz obiektu, co znajduje szerokie zastosowanie w przypadku obiektów zabytkowych.

Perlit jako dodatek do tynków jest powszechnie stosowany i był już niejednokrotnie badany [3][6][13][16][25][26]. Dobór składników tynków z dodatkiem ekspandowanego perlitu był już przedmiotem prac naukowych [7][18]. Prowadzono również liczne badania przewodności cieplnej tynków z dodatkiem perlitu [1] [2] [10][22].

Artykuł ma na celu analizę problemu przewodności cieplnej tynków perlitowych zależnej od wilgotności względnej powietrza (RH – Relative Humidity) oraz temperatury prowadzenia badania.

W pracy, badania wartości współczynnika lambda (λ) wykonano dla dwóch rodzajów gotowych mieszanek tynków perlitowych. Badane materiały różniły się przede wszystkim gęstością, wytrzymałością na ściskanie i deklarowaną wartością współczynnika przenikania ciepła λ (Tabela 1).

Tabela 1. Podstawowe właściwości dwóch grup badanych produktów – CS i TC

Wartości deklarowane przez producenta	Seria TC	Seria CS
Gęstość nasykowa	300–500 kg/m ³	300–320 kg/m ³
Wytrzymałość na ściskanie	> 3 MPa	1,7 MPa
Współczynnik przewodzenia ciepła – λ	0,12 W/mK	0,064 W/mK

Z każdego rodzaju materiału wykonano po 6 próbek. Do wykonania oznaczenia wartości współczynnika lambda użyto dwóch próbek z każdego materiału. Badania wpływu temperatury na wartość współczynnika przewodzenia w trzech zakresach temperatur (12,5°C; 22,5°C; 32,5°C). Wykonano oznaczenie wartości współczynnika λ przy różnej wilgotności powietrza (RH) przechowywanych próbek (0%; 25–30%; 70–75%; 80–85%; 90–95%).

Dodatkowo oznaczono gęstości próbek, zbadano ich sorpcyjność oraz wytrzymałość na ściskanie i na zgięcie. Na podstawie danych uzyskanych podczas pomiarów, wykonano tabele i wykresy zależności. Wartości uzyskane porównano z tymi deklarowanymi przez producentów w kartach technicznych oraz pomiędzy badanymi produktami.

Stanowisko badawcze

Badanie zostało wykonane za pomocą urządzenia LaserComp FOX314. W skład urządzenia wchodzi komora pomiarowa i wyświetlacz z klawiaturą pozwalającą na wprowadzenie danych do urządzenia. Górna płyta jest zamontowana na stałe, bez możliwości poruszania się. Płyta dolna ma zdolność ruchu, dzięki czterem silnikom krokowym. W momencie zetknięcia płyty i próbki wykonywany jest automatyczny pomiar grubości próbki z czterech czujników z dokładnością $\pm 0,025$ mm.

Do mierzenia temperatury płyt wykorzystano system termopar, pozwalający na wysoką czułość i jednolitość pomiaru na całej powierzchni płyty. Termoelektryczne elementy zainstalowane na płytach utrzymują wartość temperatury na każdej z płyt na wyznaczonym poziomie. Utrzymanie temperatury cieczy chłodzącej na poziomie około 18°C lub mniejszej, pozwala na działanie płyt w zakresie $-20\div 95^{\circ}\text{C}$ z dokładnością do $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$.

Przed wykonaniem badań próbek o nieznannej wartości współczynnika należy wykonać kalibrację urządzenia za pomocą próbki wzorcowej o znanej wartości współczynnika lambda. Próbkę referencyjną o wymiarach $30,1\times 30,1\times 3,42$ cm i gęstości $76,7$ kg/m^3 poddano badaniu w temperaturach $T_U = 10^{\circ}\text{C}$, $T_L = 30^{\circ}\text{C}$, zgodnie z wymaganiami podanymi w instrukcji urządzenia. [33]

Zgodnie z instrukcją instrumentu maksymalny błąd pomiaru powinien wynosić 2%. Błąd po przeprowadzeniu kalibracji wyniósł 0,24%. Uznano, że kalibracja została wykonana w sposób prawidłowy.

Badania próbek

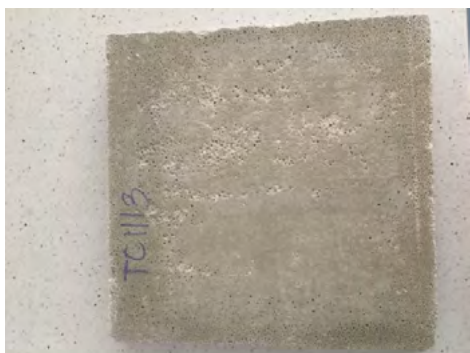
Próbki wykonano z gotowych suchych mieszanek tynków perlitowych z uwzględnieniem zaleceń podanych w kartach technicznych produktów. Wykonanie próbek rozpoczęto od przygotowania form z listewek z płyty OSB. Gotowe formy powleczono od wewnątrz środkiem antyadhezyjnym, zapobiegając tym samym przywierania tynku do form.

Kolejnym etapem wykonania próbek było wymieszanie suchych mieszanek z wodą. Ilość wody potrzebnej do zarobu określono na podstawie informacji producenta. Tynk wsypano do wyznaczonej ilości wody. Całość mieszano mieszadłem. Tynk nakładano i wyrównano kielnią. Z każdego rodzaju tynku przygotowano po sześć próbek.

Po stwardnieniu tynku próbki rozformowano. Próbki pozostawiono do dojrzewania w warunkach laboratoryjnych (temp.: $21,1\div 23,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$; RH $45,3\div 48,2 \pm 3,0\%$). Czas dojrzewania został określony w kartach technicznych produktów.

Następnym etapem badania było wysuszenie próbek do stałej masy w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 75°C . Temperatura została tak dobrana, aby w próbkach nie nastąpiło zjawisko nadmiernego skurczu.

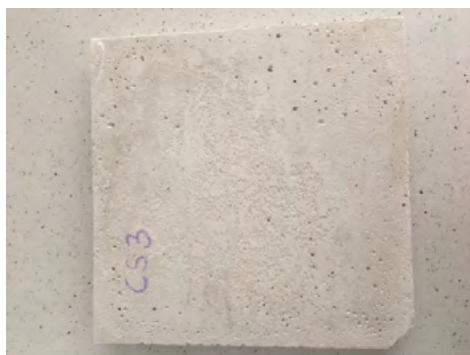
Po wysuszeniu próbek do stałej masy wyrównano powierzchnie próbek za pomocą papieru ściernego. Żeby zapobiec wnikaniu pyłu w strukturę materiału podczas polerowania używano odkurzacza. Wyrównanie powierzchni było konieczne do prawidłowego przebiegu badania przewodności cieplnej w aparacie płytowym Laser Comp FOX 314. Zdjęcia próbek przygotowanych do badania przedstawiono na grafikach poniżej (Ryc. 1, Ryc. 2, Ryc. 3, Ryc. 4.)



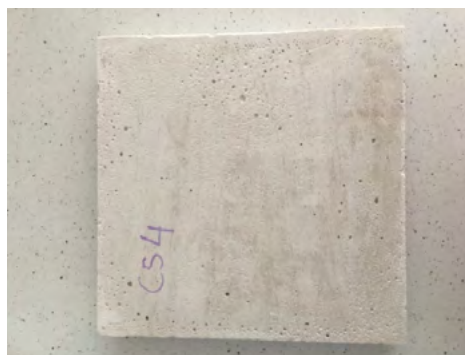
Ryc. 1. Próbka TC3. Tynk perlitowy 351 kg/m^3



Ryc. 2. Próbka TC4. Tynk perlitowy 341 kg/m^3



Ryc. 3. Próbką CS3. Tynk perlitowy 401 kg/m³



Ryc. 4. Próbką CS4. Tynk perlitowy 411 kg/m³

Cztery próbki (TC serii nr 3 i 4 oraz CS serii nr 3 i 4) z dwóch rodzajów materiału zostały zbadane w stanie suchym w trzech zakresach średnich temperatur (T_{av}) 12,5°C, 22,5°C i 32,5°C. Średnie temperatury badania wyznaczono na podstawie średniej arytmetycznej temperatury płyty górnej T_L i płyty dolnej T_u .

Po każdym badaniu próbka ponownie była suszona tak, aby wilgoć pojawiająca się podczas badania nie miała wpływu na pomiar współczynnika. Określono zależność pomiędzy wpływem temperatury badania, a wartością współczynnika lambda. Zestawienie wyników badań dwóch materiałów przedstawiono w tabelach (Tabela 2 i Tabela 3).

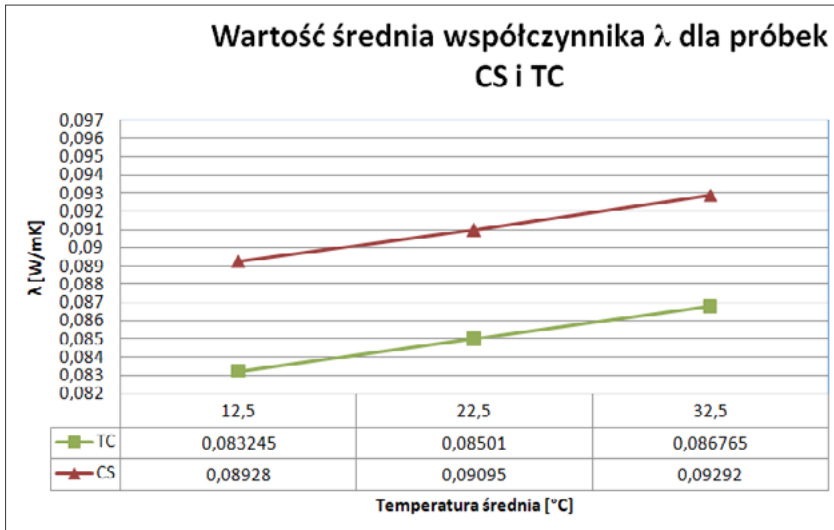
Tabela 2. Tabela wyników dla próbek TC w stanie suchym w trzech zakresach temperatur

Nr próbki	T_u [°C]	T_L [°C]	T_{av} [°C]	λ [W/mK]	λ_{sr} [W/mK]
1	0	25	12,5	0,08223	0,08325
2	0	25	12,5	0,08426	
3	10	35	22,5	0,08398	0,08501
4	10	35	22,5	0,08604	
5	20	45	32,5	0,08578	0,08677
6	20	45	32,5	0,08775	

Tabela 3. Tabela wyników dla próbek CS w stanie suchym w trzech zakresach temperatur

Nr próbki	T_u [°C]	T_L [°C]	T_{av} [°C]	λ [W/mK]	λ_{sr} [W/mK]
1	0	25	12,5	0,08546	0,08928
2	0	25	12,5	0,09310	
3	10	35	22,5	0,08748	0,09095
4	10	35	22,5	0,09442	
5	20	45	32,5	0,08968	0,09292
6	20	45	32,5	0,09615	

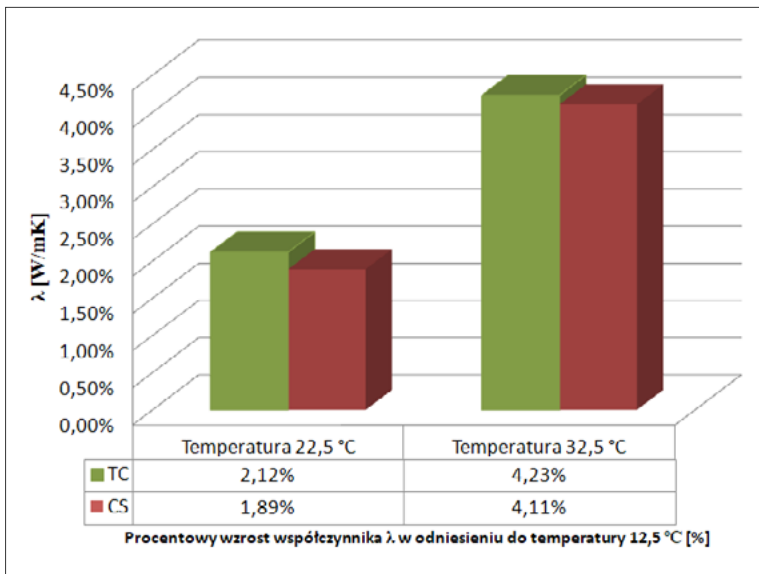
Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono wykres wspólny dla dwóch przebadanych serii (Ryc. 5).



Ryc. 5. Wykres wartości średnich współczynnika lambda uzyskanych podczas badania wpływu temperatury na wartości współczynnika λ

Analizując wyniki badań stwierdzono, że zmiana wartości współczynnika λ ma charakter liniowy. Zależnie od temperatury badania stwierdzono bardzo zbliżony wzrost współczynnika przewodzenia ciepła dla serii TC i CS. Przy średniej temperaturze badania 22,5°C wzrost wyniósł 2%, natomiast przy temperaturze 32,5°C było to aż ponad 4%.

W celu porównania procentowego wzrostu współczynnika lambda wykonano wykres słupkowy (Ryc. 6) w odniesieniu do wyników uzyskanych w temperaturze $T_{av} = 12,5^\circ\text{C}$.



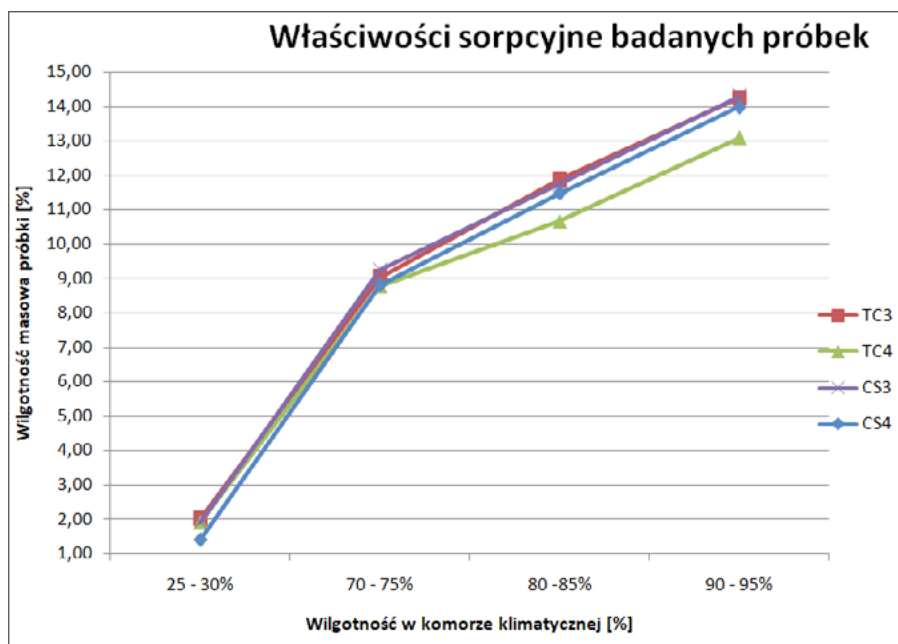
Ryc. 6. Procentowy wzrost wartości współczynnika λ w odniesieniu do wartości współczynnika λ zbadanej w średniej temperaturze badania wynoszącej 12,5°C

Badanie właściwości sorpcyjnych

Celem analizy było zbadanie zdolności materiałów do pochłaniania wilgoci z powietrza. Próbki wysuszone do stałej masy umieszczono w komorze klimatycznej, w której następował wzrost wilgotności. Koniec przechowywania próbki w określonej wilgotności regulowało ustabilizowanie się próbek do stałej masy. Wszystkie badania zostały wykonane w temperaturze laboratoryjnej. Na podstawie uzyskanych danych określono współzależność wilgotności powietrza i wilgotności sorpcyjnej próbek.

Tabela 4. Wartości wilgotności sorpcyjnej badanych materiałów w różnej wilgotności powietrza

Nazwa próbki	Wilgotność powietrza				
	0%	25–30%	70–75%	80–85%	90–95%
	Sorpcja [%]				
TC3	0	2,01	9,03	11,87	14,24
TC4	0	1,91	8,78	10,67	13,09
CS3	0	1,91	9,23	11,74	14,29
CS4	0	1,4	8,8	11,47	13,99

**Ryc. 7.** Krzywe sorpcji wszystkich badanych próbek

Na podstawie wykresów stwierdzono, że badane materiały mają bardzo podobną wartość sorpcyjności. Ustalono, że wykresy mają nieliniowy przebieg. Zauważono, że wraz ze wzrostem wilgotności powietrza w komorze klimatycznej wilgotność masowa badanych próbek wzrasta.

Wpływ wilgotności powietrza

Badanie miało na celu wykazanie zależności pomiędzy wartością współczynnika λ , a wilgotnością próbki. Oznaczenie wartości współczynnika λ wykonano na dokładnie tych samych próbkach, które zostały użyte do wykonania badania wpływu temperatury na wartość współczynnika λ . Próbkę wysuszoną do stałej masy sezonowano w wilgotnościach 25–30%, 70–75%, 80–85% oraz 90–95%. Wartość wilgotności w komorze klimatycznej kontrolowano za pomocą termohigrometru.

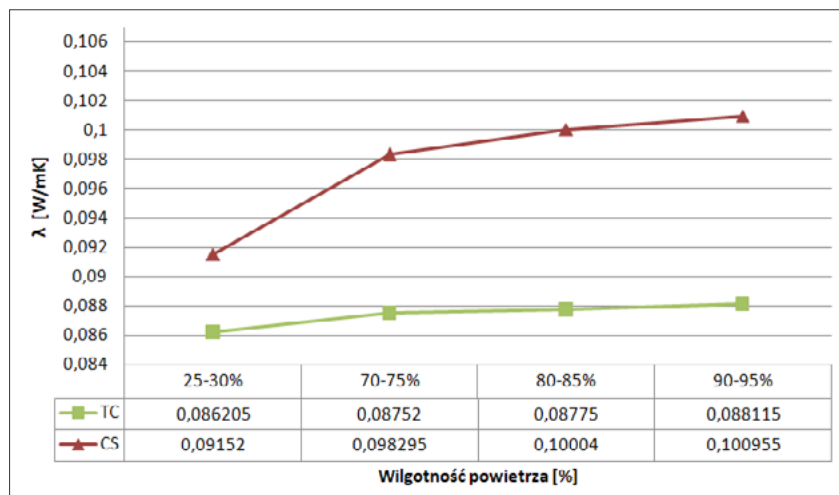
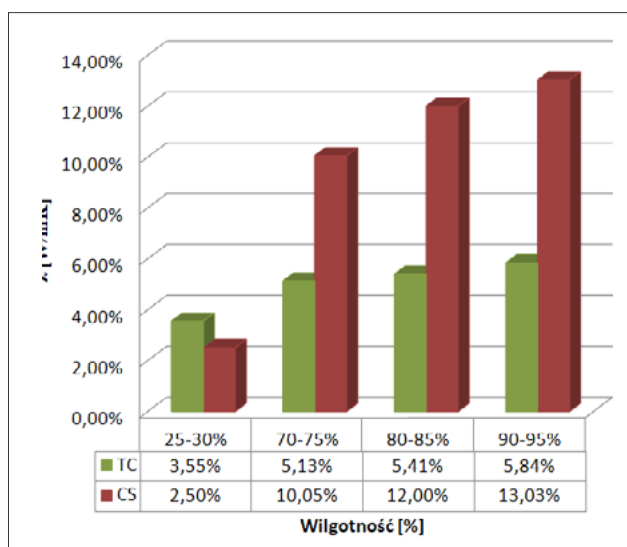
Wszystkie pomiary wykonane na badanych materiałach zostały wykonane w jednej temperaturze wynoszącej $T_{avi} = 12,5^{\circ}\text{C}$. Próbkę zważono w stanie suchym oraz w kolejnych wilgotnościach sezonowania. Uzyskane dane przedstawiono w tabelach (Tabela 5, Tabela 6), a na ich podstawie wykonano wykresy zależności wartości współczynnika λ od wilgotności powietrza podczas badania (Ryc. 8).

Tabela 5. Wartość średnia współczynnika lambda w badanych wilgotnościach dla próbki TC

Nazwa	λ [W/mK]			
	25–30%	70–75%	80–85%	90–95%
TC3	0,08497	0,08623	0,08624	0,08660
TC4	0,08744	0,08881	0,08926	0,08963
TC	0,08621	0,08752	0,08775	0,08812

Tabela 6. Wartość średnia współczynnika lambda w badanych wilgotnościach dla próbki CS

Nazwa	λ [W/mK]			
	25–30%	70–75%	80–85%	90–95%
CS3	0,08746	0,09319	0,09478	0,09571
CS4	0,09558	0,10340	0,10530	0,10620
CS	0,09152	0,09830	0,10004	0,10096

**Ryc. 8.** Zestawienie wartości średnich współczynnika lambda dla dwóch rodzajów materiału**Ryc. 9.** Procentowy wzrost wartości współczynnika λ w odniesieniu do wilgotności badania wynoszącej 0%

Stwierdzono, że przebieg wykresów niezależnie od materiału nie jest liniowy. Zarówno pierwszy (TC), jaki i drugi materiał (CS) wykazywał wzrost współczynnika przewodzenia ciepła λ wraz ze wzrostem wilgotności badania.

W celu porównania wpływu wilgotności powietrza na wartość współczynnika przewodzenia ciepła, wykonano wykres procentowy określający wzrost współczynnika w odniesieniu do wartości zmierzonej w wilgotności RH = 0%, będącej wartością bazową.

Stwierdzono istotne różnice wartości współczynnika λ zależnie zarówno od wilgotności badania jak i badanego materiału. W przypadku materiału oznaczonego, jako TC, który jest materiałem o znacznie większej gęstości, wpływ wilgotności powietrza jest mniejszy. Wpływ ten waha się od 3,55% do 5,84%.

W przypadku materiału oznaczonego, jako CS, wpływ ten jest już znaczny i istotny. W przypadku wilgotności powietrza RH > 90% wartość współczynnika przewodzenia ciepła zwiększa się o ponad 13%.

Badanie wytrzymałości na zginanie

Wszystkie badania wytrzymałościowe przeprowadzono zgodnie z normą [30]. Wytrzymałość na zginanie wykonano na maszynie MTS 809 Axial/Torsional Test System stosując głowicę do badania składającą się z trzech walców do centrycznego obciążenia pionowego. Badane próbki obciążano ze stałym przyrostem siły. W tabeli (Tabela 7.) zestawiono wyniki badań.

Tabela 7. Wytrzymałość na zginanie dla badanych próbek

Nr próbki	Szerokość próbki – b [mm]	Wysokość próbki – d [mm]	Siła obciążająca – F [N]	Odległość pomiędzy osiami walców – l [mm]	Wytrzymałość na zginanie – f [N/mm ²]	Zaokrąglenie z dokładnością do 0,05 N/mm ²	Wytrzymałość średnia na zginanie – f [N/mm ²]
TC1z	41,18	38,40	152	120	0,451	0,45	
TC2z	41,56	37,39	175	120	0,542	0,55	0,50
TC3z	41,76	38,23	158	120	0,466	0,50	
CS1z	41,46	33,80	258	120	0,980	1,00	
CS2z	41,48	32,85	248	120	0,997	1,00	0,93
CS3z	41,78	35,53	238	120	0,812	0,80	

Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że wytrzymałość na zginanie próbki CS jest większa niż wytrzymałość próbek TC. W porównaniu z wartością podaną w karcie technicznej tynku CS wartość zbadana jest większa o 0,23 MPa od tej deklarowanej.

Ze względu na brak informacji w kartach nie sprawdzono wartości deklarowanej z wartością zbadaną dla próbki TC.

Wytrzymałość na zginanie próbek z serii CS jest prawie 2 razy większa od próbek serii TC).

Do badania wytrzymałości na ściskanie użyto głowicy wykonanej z dwóch równoległych płyt przenoszących obciążenie. Badanie wykonano urządzeniem MTS 809 Axial/Torsional Test System. Wytrzymałość na ściskanie, obliczono, jako stosunek maksymalnego obciążenia niszczącego próbkę do powierzchni jej przekroju. W tabeli (Tabela 8) przedstawiono wyniki.

Tabela 8. Wytrzymałość na ściskanie badanych próbek

Nr próbki	Szerokość próbki – b [mm]	Wysokość próbki – d [mm]	Wartość max. obciążenia [N]	Wytrzymałość na ściskanie [N/mm ²]	Wytrzymałość przybliżona do 0,05 [N/mm ²]	Wytrzymałość średnia na ściskanie [N/mm ²]
TC 1.1s	41,18	38,40	1369	0,866	0,90	0,86
TC 1.2s			1425	0,901	0,90	
TC 2.1s	41,56	37,39	1316	0,847	0,85	
TC 2.2s			1582	1,018	1,00	
TC 3.1s	41,76	38,23	1125	0,705	0,70	
TC 3.2s			1290	0,808	0,80	
CS 1.1s	41,46	33,80	2478	1,768	1,80	1,68
CS 1.2s			2087	1,489	1,50	
CS 2.1s	41,48	32,85	2362	1,733	1,75	
CS 2.2s			2339	1,717	1,70	
CS 3.1s	41,78	35,53	2524	1,700	1,70	
CS 3.2s			2342	1,578	1,60	

Podobnie jak przy badaniu wytrzymałości na zginanie na wykresach zaobserwowano znaczne różnice w wynikach badań poszczególnych próbek. Próbki serii CS mają wytrzymałość niemal 2 krotnie większą od próbek serii TC. W porównaniu z kartą techniczną, tynk CS ma wytrzymałość zbliżoną do deklarowanej.

W przypadku tynku TC producent deklaruje wartość > 3 MPa, wynik otrzymanego badania jest znacznie mniejszy od wartości podanej w karcie technicznej.

Wnioski

- Wartości współczynnika przewodzenia ciepła lambda podane w kartach technicznych znacznie odbiegają od wartości zbadanych. Producent nie podaje szczegółowych informacji dotyczących temperatury i wilgotności badania. Podane wartości mogą być mylące dla projektantów przy obliczeniach cieplnych budynków. **Wartość deklarowana współczynnika λ dla próbek CS w temperaturze średniej wynoszącej 12,5°C jest o 40% mniejsza od wartości zbadanej, a dla próbek TC jest o 31% większa niż wartość deklarowana.**
- Dla wszystkich badanych próbek wartość współczynnika λ rośnie wraz ze wzrostem temperatury badania. W odniesieniu do temperatury średniej wynoszącej 12,5°C, procentowy wzrost współczynnika λ przy temperaturze badania 22,5°C wyniósł średnio dla próbek TC 2,12%, a dla próbek CS 1,89%. Przy temperaturze 32,5°C wzrost wyniósł dla próbek TC 4,23%, a dla próbek CS 4,11%.
- Dla wszystkich badanych materiałów zauważono, że wzrost wilgotności powietrza wpływa negatywnie na wartość współczynnika lambda, powodując jego wzrost. W odniesieniu do wartości bazowej współczynnika λ , zadanego w wilgotności powietrza 0%, wzrost współczynnika λ w wilgotności 90–95% wyniósł dla próbek TC średnio 5,84%, a dla próbek CS 13,03%.

- Wykresy przebiegu zależności wzrostu współczynnika λ od wilgotności powietrza ma charakter nieliniowy.
- Zarówno wilgotność powietrza jak i temperatura badania mają istotny wpływ na wartość współczynnika λ , niezależnie od zastosowanego materiału. Pomimo przebadania materiałów od różnych producentów, o różnych właściwościach, tendencje dotycząca zmiany współczynnika λ były bardzo zbliżone.

Literatura

- [1] Abidi S., Nait-Ali B., Joliff Y. i Favotto C., *Impact of Perlite, Vermiculite and Cement on the Thermal Conductivity of a Plaster Composite Material: Experimental and Numerical Approaches*, Composites Part B: Engineering, 68 (1 styczeń 2015): 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.030>.
- [2] Ağbulut Ü., *Mathematical calculation and experimental investigation of expanded perlite based heat insulation materials' thermal conductivity values*, Journal of Thermal Engineering 4, nr 5 (25 czerwiec 2018): 2274–86. <https://doi.org/10.18186/thermal.438482>.
- [3] Akalin O., i Elbeyli I.Y., *Hydrofobizacja rozdrobnionego perlitu ekspandowanego i jego zastosowanie w zaprawach z cementu portlandzkiego*, Cement Wapno Beton R. 20/82, nr 3 (2015).
- [4] Berge: The Ecology of Building Materials – Google Scholar. Dostęp 22 grudzień 2022.
- [5] Burriesci Nicola, Carmelo Arcoraci, PierLuigi Antonucci, i Giuseppe Polizzotti, *Physico-Chemical Characterization of Perlite of Various Origins*, Materials Letters, 3, nr 3 (1 styczeń 1985): 103–10. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(85\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0167-577X(85)90008-4).
- [6] Chandra Satish i Leif Berntsson. *Lightweight Aggregate Concrete*. Elsevier, 2002.
- [7] Demir Abdullah, *An Integrated Approach in Selecting the Optimal Insulation Plaster Mortar Series*, Cement Wapno Beton 27, nr 1 (2022): 32–44. <https://doi.org/10.32047/CWB.2022.27.1.3>.
- [8] Demirboğa Ramazan i Rüstem Gül, *The Effects of Expanded Perlite Aggregate, Silica Fume and Fly Ash on the Thermal Conductivity of Lightweight Concrete*, Cement and Concrete Research 33, nr 5 (1 maj 2003): 723–27. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01032-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01032-3).
- [9] Doleželová Magdaléna, Lenka Scheinherrová, Jitka Krejsová i Alena Vimrová, *Effect of High Temperatures on Gypsum-Based Composites*, Construction and Building Materials 168 (20 kwiecień 2018): 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.101>.
- [10] Gandage Abhijeet S., Vinayaka Rao V.R., Sivakumar M.V.N., Vasan A., Venu M. i Yaswanth A.B., *Effect of Perlite on Thermal Conductivity of Self Compacting Concrete*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG), 104 (2 grudzień 2013): 188–97. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.111>.
- [11] Govaerts Yves, Roald Hayen, Michael de Bouw, Ann Verdonck, Wendy Meulebroeck, Stijn Mertens i Yves Grégoire. *Performance of a Lime-Based Insulating Render for Heritage Buildings*, Construction and Building Materials 159 (20 styczeń 2018): 376–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.115>.
- [12] van Hees Rob P.J., Silvia Naldini i Jose Delgado Rodrigues, *Plasters and Renders for Salt Laden Substrates*, Construction and Building Materials, Compatibility of Plasters and Renders on Salt Loaded Substrates, 23, nr 5 (1 maj 2009): 1714–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.009>.
- [13] Jakubowska Patrycja, *Wpływ kruszyw lekkich – perlitu i granulatu styropianowego na właściwości zapraw budowlanych*, Builder R. 24, nr 12 (2020). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5276>.
- [14] Kapelusznia Ewa, Łukasz Kotwica, Waldemar Pichór i Wiesława Nocuń-Wczelik, *Cement-Based Composites with Waste Expanded Perlite – Structure, Mechanical Properties and Durability in Chloride and Sulphate Environments*, Sustainable Materials and Technologies 24 (1 lipiec 2020): e00160. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00160>.
- [15] Kozioł W., Baic I. i Machniak Ł., *Produkcja i zastosowanie kruszyw z wtórnych surowców odpadowych*, Rocznik Ochrona Środowiska Tom 18, cz. 1 (2016). <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-25a63d8c-0359-49a0-95a5-bbefeb529a89>.
- [16] Maxineasa S.G., Isopescu D.N., Lupu M.L., Baciu I.-R., Pruna L. i Somacescu C., *The Use of Perlite in Civil Engineering Applications*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1242, nr 1 (kwiecień 2022): 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012022>.
- [17] Meisinger Arthur C., *Perlite*, Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, 1979.
- [18] Morsy M.S. i Aglan H.A., *Development and Characterization of Nanostructured-Perlite-Cementitious Surface Composites*, Journal of Materials Science 42, nr 24 (1 grudzień 2007): 10188–95. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1981-3>.

- [19] Nastac Silviu, Petronela Nechita, Carmen Debeleac, Cristian Simionescu i Mihai Seciureanu, *The Acoustic Performance of Expanded Perlite Composites Reinforced with Rapeseed Waste and Natural Polymers*, Sustainability 14, nr 1 (styczeń 2022): 103. <https://doi.org/10.3390/su14010103>.
- [20] Rakhimbayev Sh. M., Tolypina N.M. i Khakhaleva E.N., *Influence of Reactive Fillers on Concrete Corrosion Resistance*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 327, nr 3 (marzec 2018): 032046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032046>.
- [21] Rashad Alaa M., *A Synopsis about Perlite as Building Material – A Best Practice Guide for Civil Engineer*, Construction and Building Materials 121 (15 wrzesień 2016): 338–53. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001>.
- [22] Sengul Ozkan, Senem Azizi, Filiz Karaosmanoglu i Mehmet Ali Tasdemir, *Effect of Expanded Perlite on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete*, Energy and Buildings 43, nr 2 (1 luty 2011): 671–76. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>.
- [23] Shastri Dipendra i Ho Sung Kim, *A New Consolidation Process for Expanded Perlite Particles*, Construction and Building Materials 60 (16 czerwiec 2014): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.041>.
- [24] Topçu İlker Bekir i Burak Işıkdağ, *Manufacture of High Heat Conductivity Resistant Clay Bricks Containing Perlite*, Building and Environment 42, nr 10 (1 październik 2007): 3540–46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.016>.
- [25] Trochonowicz M., Witek B., Chwiej M., *Analiza wpływu wilgotności i temperatury powietrza na wartość współczynnika przewodności cieplnej λ materiałów termoizolacyjnych stosowanych wewnątrz pomieszczeń*, Budownictwo i Architektura 12(4) 2013, s. 164–176.
- [26] Yi Wu, Zhou Xiling, Yang Jinglin, Wang Wenxuan i Tian Tian, *A Comprehensive Performance Evaluation of the Cement-Based Expanded Perlite Plastering Mortar*, Science of The Total Environment 858 (1 luty 2023): 159705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159705>.
- [27] Záleská Martina, Milena Pavlíková, Adam Pivák, Anna-Marie Lauermannová, Ondřej Jankovský i Zbyšek Pavlík, *Lightweight Vapor-Permeable Plasters for Building Repair Detailed Experimental Analysis of the Functional Properties*, Materials 14, nr 10 (styczeń 2021): 2613. <https://doi.org/10.3390/ma14102613>.
- [28] Żelazowska E., Pichniarczyk P. i Najduchowska M., *Lekkie kruszywa szklano-krystaliczne z surowców odpadowych dla przemysłu materiałów budowlanych*, Materiały Ceramiczne, nr T. 66, nr 3 (2014): 321–30.
- [29] Zemanová Lucie, Jaroslav Pokorný, Milena Pavlíková i Zbyšek Pavlík, *Moisture diffusivity of natural hydraulic lime-based plasters with incorporated perlite aggregate*, AIP Conference Proceedings 2293, nr 1 (24 listopad 2020): 070006. <https://doi.org/10.1063/5.0027092>.
- [30] PN-EN 1015-11:2020-04, Metody badań zapraw do murów – Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.
- [31] PN-EN 12524:2000, Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaaryczne wartości obliczeniowe.
- [32] PN-EN ISO 10456:2009, Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabelaaryczne wartości obliczeniowe.
- [33] Instrukcja obsługi instrumentu Laser Comp FOX 314.