

dr hab. inż. Jerzy Paślawski, prof. PP¹⁾

ORCID: 0000-0002-5570-2363

mgr inż. Jakub Sasiadek^{2)*)}

ORCID: 0000-0002-4152-878X

mgr inż. Katarzyna Rzeczkowska¹⁾

Izolacyjność termiczna materiałów termoizolacyjnych w kontekście budownictwa dodatnio energetycznego

Thermal insulation of thermal insulation materials in the context of positive energy buildings

DOI: 10.15199/33.2023.01.08

Streszczenie. Artykuł zawiera przegląd uzyskanych wyników pomiarów przewodności cieplnej styropianu grafitowego, styropianu standardowego w kropki, piany PUR, wełny mineralnej oraz poliuretanowej maty aerożelowej. Badania zostały przeprowadzone w aparacie LaserComp FOX314 na próbkach wielkości ok. 30 x 30 x (10/2) cm i wykazały niewielkie odchylenia badanych wartości. Ponadto przedstawiono rozwiązanie umożliwiające zwiększenie izolacyjności ścian z pustką powietrzną, w istniejących budynkach, na bazie piany Cavipor.

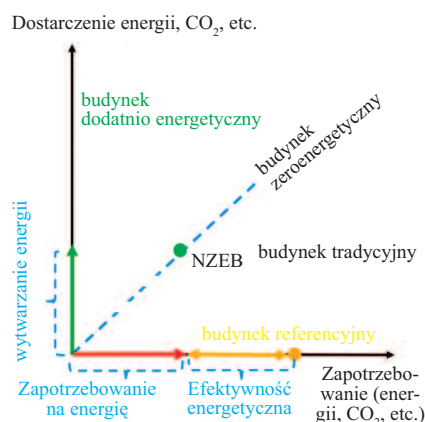
Słowa kluczowe: izolacyjność termiczna; współczynnik lambda; budynki dodatnio energetyczne; emisja CO₂; materiały izolacyjne.

Abstract. The article contains an overview of the obtained results of measurements of thermal conductivity of materials: graphite polystyrene, dotted standard polystyrene, PUR foam, mineral wool and polyurethane aerogel mat. The tests were carried out in the LaserComp FOX314 apparatus on samples of the size of approximately 30 x 30 x (10/2) cm. The research showed slight deviations from the tested values. Finally, a solution for increasing the insulation performance in existing buildings was presented – in the case of walls with an air cavity based on Cavipor foam.

Keywords: thermal insulation; lambda coefficient; positive energy buildings; CO₂ emission; thermal insulation materials.

Budynki generują 36% światowego zapotrzebowania na energię i są odpowiedzialne za emisję 39% CO₂ [1], dlatego też należy dążyć do zmniejszenia tych wskaźników. Po kampaniach na rzecz budownictwa energooszczędnego i o prawie zerowym zużyciu energii obecnie coraz większą popularność zyskuje idea domów plus energetycznych [1, 2]. Ich ideę przedstawiono na rysunku 1.

Typowa definicja budynku plus energetycznego podana przez Kumara i Cao [3] brzmi: **budynek jest plus energetyczny, gdy produkuje więcej energii z odnawialnych źródeł w ciągu roku, niż potrzebuje na ogrzewanie, chłodzenie, wentylację, ciepłą wodę użytkową i systemy pomocnicze.** Inne definicje obejmują analizę bilansu energetycznego z uwzględnieniem cyklu życia 50 – 60 lat [4]. Hawila i in. [5] wskazują na konieczność uwzględnienia wymiany odnawialnych źródeł energii



Rys. 1. Idea budownictwa plus energetycznego [3]

Fig. 1. Idea of plus-energy construction [3]

w przypadku analizy cyklu życia dłuższego niż 30 lat. Rozważając budynek plus energetyczny na etapie projektowania, można z kolei brać pod uwagę dwie zasadnicze strategie – (1) zmniejszenie strat energii przez zwiększenie izolacyjności budynku oraz (2) zwiększenie produkcji energii elektrycznej dzięki zastosowaniu instalacji odnawialnych źródeł energii oraz strategię uzupełniającą (3) bazującą na technologiach energooszczędnych [3]. Efektem wznoszenia budynków dodatnio ener-

getycznych powinno być zmniejszeniem emisji CO₂ w sektorze budownictwa. Aby to potwierdzić, należy zbadać wpływ stosowanych materiałów budowlanych, a przede wszystkim termoizolacji o bardzo małym współczynniku przewodzenia ciepła na obniżenie emisji CO₂ w budynkach podczas ich eksploatacji. Należy również wziąć pod uwagę ślad węglowy wyprodukowanych materiałów budowlanych. Ponadto niezbędne jest zastosowanie odnawialnych źródeł energii (np. fotowoltaiki, turbin wiatrowych lub źródeł geotermalnych). Trzeci sposób ograniczenia emisji CO₂ wynika z wykorzystania oprogramowania i technologii, które są w stanie zoptymalizować zarządzanie energią w budynku. Poprawia to jednocześnie komfort życia mieszkańców. Takim rozwiązaniem są systemy smart home pozwalające automatycznie i w czasie rzeczywistym kontrolować zarządzanie energią w danym obiekcie. Wymienione technologie dostarczają odpowiedzi na pytanie kiedy, gdzie i do jakiego stopnia należy wykorzystać energooszczędne usługi ogrzewania, chłodzenia, oświetlenia, by zapewnić komfort mieszkań-

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

²⁾ Szkoła Doktorska Politechniki Poznańskiej

*) Adres do korespondencji:

jakub.sasiadek@doctorate.put.poznan.pl

com budynku. Bazując one na odnawialnych źródłach energii (OZE), takich jak: energia słoneczna; energia uzyskiwana z wiatru; wytwarzanie biogazu czy stała dodatnia temperatura gruntu.

Projekt budynku plus energetycznie można opracować na bazie projektu np. domu energooszczędnego. Następnie w celu polepszenia jego właściwości rozpatruje się: **ograniczenie strat ciepła** (poprawa izolacyjności termicznej, likwidacja mostków termicznych itp.), **zwiększenie produkcji energii na bazie OZE** (ogniwa PV, turbiny wiatrowe itp.) oraz **zastosowanie odpowiedniego systemu smart home**.

Kryteriami wyboru przy poszukiwaniu rozwiązań obiektów plus energetycznych może być [5] minimalizacja: kosztów realizacji inwestycji; zapotrzebowania na energię/rok; zużycia energii w całym cyklu życia; emisji CO₂; okresu zwrotu inwestycji.

Badania materiałów termoizolacyjnych

Na Politechnice Poznańskiej przeprowadzono badania przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych dostępnych na rynku: fasadowego styropianu grafitowego; fasadowego styropianu w kropki (standardowego); piany otwartokomórkowej PUR; wełny mineralnej fasadowej oraz maty aerożelowej (aerożelu poliuretanowego) w kontekście ewentualnego zastosowania w budynkach dodatnio energetycznych. Badano próbki wielkości ok. 30 x 30 x (10/2) cm w aparacie LaserComp FOX314. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 1 ÷ 15 oraz na rysunkach 2 ÷ 6, a ich analizę przeprowadzono wg zaleceń zawartych w instrukcji urządzenia.

Styropian fasadowy grafitowy. Wyniki badań trzech różnych próbek styropianu grafitowego są do siebie bardzo podobne (rysunek 2). Zauważalne różnice występują dopiero na trzecim miejscu po przecinku. Średnia wartość λ wynosi 0,032 [W/(m·K)].

Styropian fasadowy w kropki (standardowy). W przypadku styropianu w kropki (rysunek 3) stwierdzono, że próbki 4 i 5 osiągnęły identyczne wyniki, a próbka nr 6 nieznacznie mniejsze (różnica na trzecim miejscu po przecin-

Tabela 1. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 1 (d = 9,939 cm) z grafitowego styropianu fasadowego [6]

Table 1. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 1 (d = 9,939 cm) from graphite facade polystyrene [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	35,24	25,66	30,45	0,0305
U2 = -10 L2 = 15	34,05	28,48	31,27	0,0313
U3 = 0 L3 = 25	33,57	30,53	32,05	0,0321
U4 = 10 L4 = 35	33,30	32,29	32,80	0,0328
U5 = 20 L5 = 45	33,20	34,24	33,72	0,0337
U6 = 30 L6 = 55	32,89	36,58	34,74	0,0347
Średnia				0,0325

Tabela 2. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 2 (d = 9,941 cm) z grafitowego styropianu fasadowego [6]

Table 2. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 2 (d = 9,941 cm) from graphite facade polystyrene [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	34,82	25,98	30,40	0,0304
U2 = -10 L2 = 15	34,06	28,47	31,27	0,0313
U3 = 0 L3 = 25	33,59	30,51	32,05	0,0321
U4 = 10 L4 = 35	33,15	32,47	32,81	0,0328
U5 = 20 L5 = 45	33,06	34,44	33,75	0,0338
U6 = 30 L6 = 55	33,11	36,54	34,83	0,0348
Średnia				0,0325

ku). Natomiast średnia wartość λ jest równa 0,041 [W/(m·K)].

Piana PUR otwartokomórkowa. Z rysunku 4 wynika, że uzyskane wartości λ poszczególnych próbek są do siebie bardzo zbliżone, a różnica, podobnie jak w poprzednich pomiarach, jest dopiero na trzecim miejscu po przecinku. Obliczona średnia wartość λ wynosi 0,035 [W/(m·K)].

Tabela 3. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 3 (d = 9,941 cm) z grafitowego styropianu fasadowego [6]

Table 3. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 3 (d = 9,941 cm) from graphite facade polystyrene [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	34,72	25,73	30,23	0,0302
U2 = -10 L2 = 15	33,83	28,29	31,06	0,0311
U3 = 0 L3 = 25	33,34	30,39	31,87	0,0319
U4 = 10 L4 = 35	33,15	32,26	32,71	0,0327
U5 = 20 L5 = 45	33,02	34,24	33,63	0,0336
U6 = 30 L6 = 55	33,13	36,52	34,83	0,0348
Średnia				0,0324

Tabela 4. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 4 (d = 9,967 cm) ze standardowego styropianu w kropki [6]

Table 4. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 4 (d = 9,967 cm) from dotted facade polystyrene [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	43,43	33,00	38,22	0,0382
U2 = -10 L2 = 15	42,66	36,48	39,57	0,0396
U3 = 0 L3 = 25	42,40	39,32	40,86	0,0409
U4 = 10 L4 = 35	42,49	41,83	42,16	0,0422
U5 = 20 L5 = 45	42,72	44,42	43,57	0,0436
U6 = 30 L6 = 55	43,25	47,01	45,13	0,0451
Średnia				0,0416

Fasadowa wełna mineralna. Jak przedstawiono na rysunku 5, uzyskane wartości λ próbek nr 10, 11 i 12 w poszczególnych przedziałach temperatury są do siebie zbliżone. Jednocześnie, tak jak było w przypadku trzech poprzednich pomiarów, różnice w otrzymanych wynikach pojawiają się dopiero na trzecim miejscu po przecinku. Średnia war-

Tabela 5. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 5 ($d = 9,969$ cm) ze standardowego styropianu w kropki [6]

Table 5. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 5 ($d = 9,969$ cm) from dotted facade polystyrene [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	43,14	33,32	38,23	0,0382
U2 = -10 L2 = 15	42,51	36,63	39,57	0,0396
U3 = 0 L3 = 25	42,48	39,30	40,89	0,0409
U4 = 10 L4 = 35	42,31	42,00	42,16	0,0422
U5 = 20 L5 = 45	42,51	44,63	43,57	0,0436
U6 = 30 L6 = 55	42,97	47,18	45,08	0,0451
Średnia				0,0416

Tabela 6. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 6 ($d = 9,967$ cm) ze standardowego styropianu w kropki [6]

Table 6. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 6 ($d = 9,967$ cm) from dotted facade polystyrene [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	42,89	32,87	37,88	0,0379
U2 = -10 L2 = 15	42,30	36,18	39,24	0,0392
U3 = 0 L3 = 25	42,05	38,86	40,46	0,0405
U4 = 10 L4 = 35	42,28	42,02	42,15	0,0422
U5 = 20 L5 = 45	42,38	43,82	43,10	0,0431
U6 = 30 L6 = 55	42,59	46,51	44,55	0,0446
Średnia				0,0412

tość λ omawianych próbek wynosi 0,036 [W/(m·K)].

Maty aerożelowa (aerożel poliuretanowy). Dane przedstawione na rysunku 6 wyróżniają się na tle innych zbadanych materiałów. W przeciwieństwie do próbek styropianu grafitowego, styropianu w kropki, piany PUR oraz wełny mineralnej każda ze zbadanych próbek maty aerożelowej charakteryzowa-

Tabela 7. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 7 ($d = 9,868$ cm) z otwartokomórkowej piany PUR [6]

Table 7. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 7 ($d = 9,868$ cm) from open-cellular PUR foam [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	36,80	27,56	32,18	0,0322
U2 = -10 L2 = 15	35,78	30,49	33,14	0,0331
U3 = 0 L3 = 25	35,58	32,67	34,13	0,0341
U4 = 10 L4 = 35	35,53	34,67	35,10	0,0351
U5 = 20 L5 = 45	35,50	36,65	36,08	0,0361
U6 = 30 L6 = 55	34,96	38,92	36,94	0,0369
Średnia				0,0346

Tabela 8. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 8 ($d = 9,944$ cm) z otwartokomórkowej piany PUR [6]

Table 8. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 8 ($d = 9,944$ cm) from open-cellular PUR foam [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	36,62	27,77	32,20	0,0322
U2 = -10 L2 = 15	35,97	30,44	33,21	0,0332
U3 = 0 L3 = 25	35,78	32,64	34,21	0,0342
U4 = 10 L4 = 35	35,87	34,42	35,15	0,0351
U5 = 20 L5 = 45	35,62	36,59	36,11	0,0361
U6 = 30 L6 = 55	34,82	39,09	36,96	0,0370
Średnia				0,0346

ła się odmiennymi wartościami λ . W zależności od wybranej próbki średnie wahały się od 0,020 do 0,0187 W/(m·K), dając deltę na poziomie 0,0013 (w przypadku pozostałych materiałów średnie różnice nie przekraczały 0,0002). Tak duże wahania mogą wynikać z faktu, że jest to materiał, którego objętość porów dochodzi nawet do 99,8%. Wartość średnia λ wszystkich omawianych wy-

Tabela 9. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 9 ($d = 10,000$ cm) z otwartokomórkowej piany PUR [6]

Table 9. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 9 ($d = 10,000$ cm) from open-cellular PUR foam [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	36,19	27,79	31,99	0,0320
U2 = -10 L2 = 15	35,42	30,85	33,14	0,0331
U3 = 0 L3 = 25	35,65	32,46	34,06	0,0341
U4 = 10 L4 = 35	35,53	34,51	35,02	0,0350
U5 = 20 L5 = 45	35,12	36,98	36,05	0,0361
U6 = 30 L6 = 55	34,68	39,22	36,95	0,0370
Średnia				0,0345

Tabela 10. Wartości λ_U i λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 10 ($d = 9,926$ cm) z fasadowej wełny mineralnej [6]

Table 10. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 10 ($d = 9,926$ cm) from facade mineral wool [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	39,65	28,01	33,83	0,0338
U2 = -10 L2 = 15	37,72	32,27	35,00	0,0350
U3 = 0 L3 = 25	37,11	34,69	35,90	0,0359
U4 = 10 L4 = 35	35,91	37,37	36,64	0,0366
U5 = 20 L5 = 45	35,93	39,68	37,81	0,0378
U6 = 30 L6 = 55	35,79	42,06	38,93	0,0389
Średnia				0,0363

ników wynosi 0,02 (0,0193 zaokrąglone w górę) [W/(m·K)].

Wnioski

Na rysunku 7 przedstawiono zmianę średniej wartości λ wszystkich zbadanych materiałów w rozbiciu na poszczególne zakresy temperatury. Najlepsze wyniki, niezależnie od wybranego przedziału temperatury, otrzymano w przy-

Tabela 11. Wartości λ_U , λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 11 (d = 9,891 cm) z fasadowej wełny mineralnej [6]

Table 11. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 11 (d = 9,891 cm) from facade mineral wool [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	39,49	27,79	33,64	0,0336
U2 = -10 L2 = 15	37,80	31,71	34,76	0,0348
U3 = 0 L3 = 25	37,60	34,32	35,96	0,0360
U4 = 10 L4 = 35	37,21	36,37	36,79	0,0368
U5 = 20 L5 = 45	35,58	40,02	37,80	0,0378
U6 = 30 L6 = 55	35,85	41,91	38,88	0,0389
Średnia				0,0363

Tabela 12. Wartości λ_U , λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 12 (d = 9,906 cm) z fasadowej wełny mineralnej [6]

Table 12. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 12 (d = 9,906 cm) from facade mineral wool [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	39,19	28,64	33,92	0,0339
U2 = -10 L2 = 15	37,61	32,34	34,98	0,0350
U3 = 0 L3 = 25	37,22	34,72	35,97	0,0360
U4 = 10 L4 = 35	36,69	36,88	36,79	0,0368
U5 = 20 L5 = 45	36,30	39,44	37,87	0,0379
U6 = 30 L6 = 55	35,68	42,32	39,00	0,0390
Średnia				0,0364

padku maty aerożelowej. Współczynnik przewodzenia ciepła tego materiału termoizolacyjnego jest o prawie 37% mniejszy od kolejnego najlepiej ocenianego rozwiązania, czyli styropianu grafitowego. Ponadto stwierdzono, że wartość λ zwiększa się w przypadku wszystkich materiałów wraz z temperaturą, ale mata aerożelowa charakteryzuje się naj-

Tabela 13. Wartości λ_U , λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 13 (d = 2,136 cm) z maty aerożelowej [6]

Table 13. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 13 (d = 2,136 cm) from aerogel mat [6]

Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	19,65	19,27	19,46	0,0195
U2 = -10 L2 = 15	19,59	19,58	19,59	0,0196
U3 = 0 L3 = 25	19,80	19,95	19,88	0,0199
U4 = 10 L4 = 35	20,17	20,24	20,21	0,0202
U5 = 20 L5 = 45	20,65	20,50	20,58	0,0206
U6 = 30 L6 = 55	21,09	20,74	20,92	0,0209
Średnia				0,0201

Tabela 14. Wartości λ_U , λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 14 (d = 2,092 cm) z maty aerożelowej [6]

Table 14. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 14 (d = 2,092 cm) from aerogel mat [6]

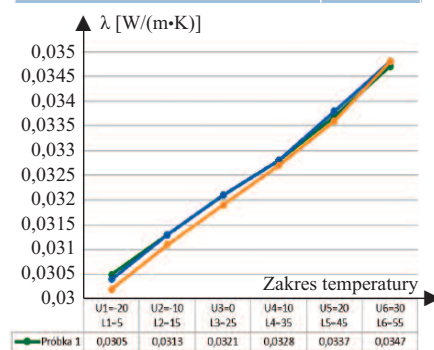
Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	18,47	18,57	18,52	0,0185
U2 = -10 L2 = 15	18,61	18,92	18,77	0,0188
U3 = 0 L3 = 25	18,73	19,15	18,94	0,0189
U4 = 10 L4 = 35	18,98	19,41	19,20	0,0192
U5 = 20 L5 = 45	19,36	19,64	19,50	0,0195
U6 = 30 L6 = 55	19,75	19,93	19,84	0,0198
Średnia				0,0191

mniejszą różnicą pomiędzy badanymi przedziałami temperatury. Z punktu widzenia średniej wartości λ najgorszym rozwiązaniem okazał się styropian w kropki (λ większa od 0,038 W/(m·K)). Z analizowanych dodatkowo kart produktów wynika, że deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła λ_{dekl} podawany jest w przypadku temperatury

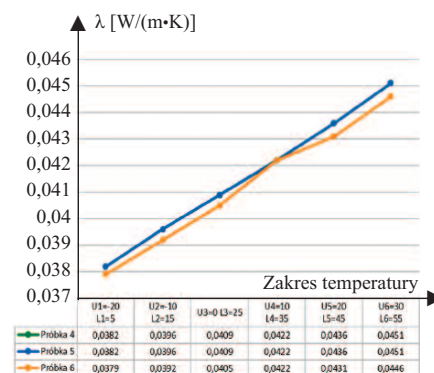
Tabela 15. Wartości λ_U , λ_L , ich średnia oraz ostateczna wartość λ w poszczególnych przedziałach temperatury w przypadku próbki nr 15 (d = 2,146 cm) z maty aerożelowej [6]

Table 15. Values of λ_U and λ_L , their mean and final value of λ in each temperature ranges for sample no. 15 (d = 2,146 cm) from aerogel mat [6]

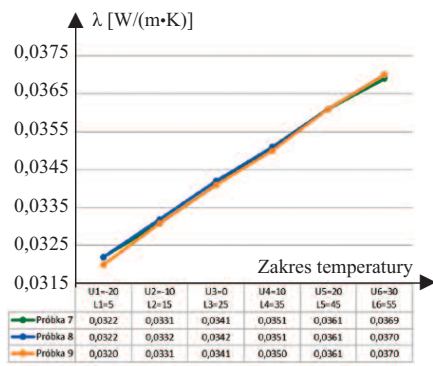
Zakres temperatury	λ_U	λ_L	Średnia λ_U i λ_L [mW/(m·K)]	λ [W/(m·K)]
U1 = -20 L1 = 5	18,39	18,00	18,20	0,0182
U2 = -10 L2 = 15	18,33	18,33	18,33	0,0183
U3 = 0 L3 = 25	18,41	18,55	18,48	0,0185
U4 = 10 L4 = 35	18,69	18,71	18,70	0,0187
U5 = 20 L5 = 45	19,05	18,99	19,02	0,0190
U6 = 30 L6 = 55	19,38	19,22	19,30	0,0193
Średnia				0,0187



Rys. 2. Wartości λ zbadanych próbek w poszczególnych zakresach temperatury – fasadowy styropian grafitowy [6]
Fig. 2. The λ values of the tested samples in specific temperature ranges – graphite facade polystyrene [6]

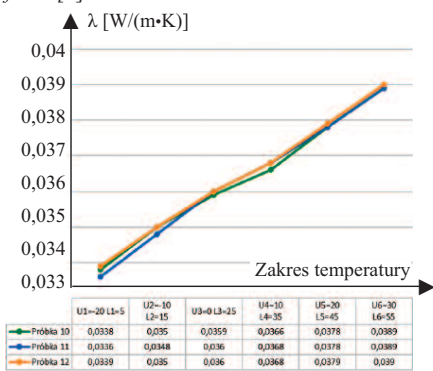


Rys. 3. Wartości λ zbadanych próbek w poszczególnych zakresach temperatury – fasadowy styropian w kropki [6]
Fig. 3. The λ values of the tested samples in specific temperature ranges – dotted facade polystyrene [6]



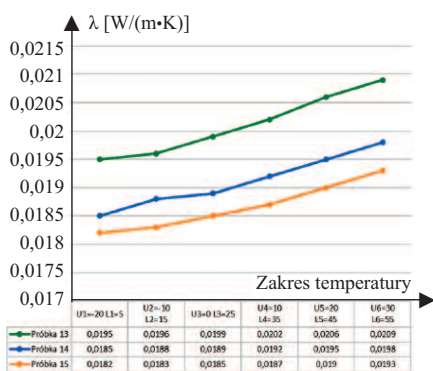
Rys. 4. Wartości λ zbadanych próbek w poszczególnych zakresach temperatury – otwartokomórkowa piana PUR [6]

Fig. 4. The λ values of the tested samples in specific temperature ranges – open-cell PUR foam [6]



Rys. 5. Wartości λ zbadanych próbek w poszczególnych zakresach temperatury – fasadowa wełna mineralna [6]

Fig. 5. The λ values of the tested samples in specific temperature ranges – facade mineral wool [6]

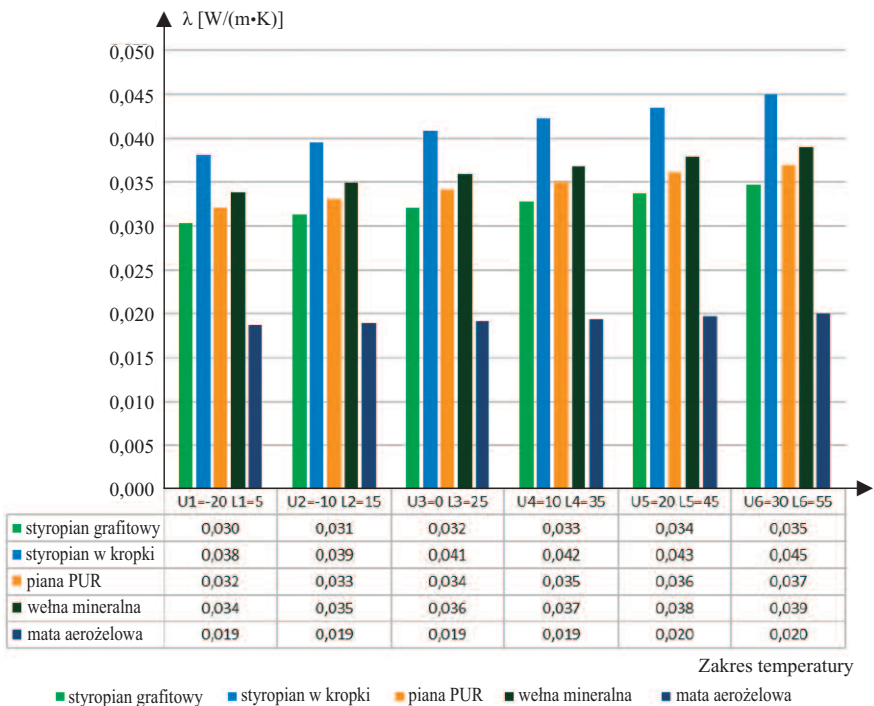


Rys. 6. Wartości λ zbadanych próbek w poszczególnych zakresach temperatury – mata aerożelowa [6]

Fig. 6. The λ values of the tested samples in specific temperature ranges – aerogel mat [6]

10°C. Zdecydowano się więc porównać wyniki po zastosowaniu interpolacji liniowej przy zakresie temperatury płyt U2 = -10°C i L2 = 15°C (średnia temperatura 2,5°C) oraz U3 = 0°C i L3 = 25°C (średnia temperatura 12,5°C).

Efekty analizy przedstawiono w tabeli 16. Stwierdzono, że zarówno w przy-



Rys. 7. Średnia wartość λ zbadanych materiałów w poszczególnych zakresach temperatury [6]

Fig. 7. The average value of λ of the tested materials in particular temperature ranges [6]

padku płyt styropianowych w kropki, jak i mat aerożelowych współczynnik uzyskany w badaniu jest mniejszy niż deklarowany przez producenta, a wełna mineralna uzyskała wartość równą deklarowanej w karcie produktu. Zarówno w przypadku grafitowych płyt styropianowych, jak i piany otwartokomórkowej PUR osiągnięte wartości są

o 0,001 większe niż odpowiadające im wartości λ_{dek1}. Oznacza to, że mimo przyjętego błędu urządzenia na poziomie 1% otrzymane wartości są gorsze, niż przyjęto do obliczeń na podstawie karty produktu.

W przypadku termomodernizacji elewacji budynku wymienione materiały termoizolacyjne można stosować wyłącznie z naruszeniem jego architektury. Należy również zastanowić się, co z budynkami istniejącymi, np. o elewacjach z okładzin ceglanych. Wyzwaniem mogą być obiekty o murach trzywarstwowych, w przypadku których należy poszukiwać nowych rozwiązań nienaruszających np. elewacji z cegieł klinkierowych. Jedno z nich wprowadza obecnie na rynek firma BASF. Jest to trzykomponentowy system pianowy Cavior, aplikowany metodą iniekcji przez małe otwory w spoinie cegły (fotografia; rysunek 8), bez naruszenia okładziny budynku. Deklarowany przez producenta współczynnik λ tego innowacyjnego systemu wynosi 0,032 W/(m·K), co przy odpowiednich działaniach termomodernizacyjnych daje możliwość, aby takie obiekty również mogły zostać zakwalifikowane jako budynki plus energetyczne. Jak

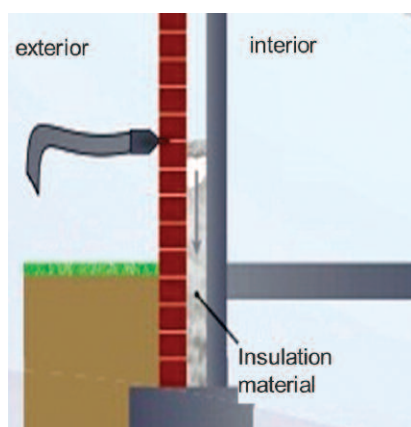
Tabela 16. Wartości λ wraz z λ_{dek1} producenta [6]

Table 16. Values of λ together and λ_{dec1} by manufacturer [6]

Materiał	λ próbki [W/(m·K)]			λ średnie [W/(m·K)]	λ _{dek1} producenta [W/(m·K)]
	I	II	III		
Styropian grafitowy	0,0319	0,0319	0,0317	0,032	0,031
Styropian w kropki	0,0406	0,0406	0,0402	0,041	0,044
Piana PUR	0,0339	0,0340	0,0339	0,034	0,033
Wełna mineralna	0,0357	0,0357	0,0358	0,036	0,036
Mata aerożelowa	0,0198	0,0189	0,0184	0,019	0,02



Przykładowe otwory w spoinie cegły służące do aplikacji trzykomponentowego systemu pianowego BASF Cavior®
Examples of holes in a brick joint for three-component application BASF Cavior foam system



Rys. 8. Iniekcja za pomocą specjalnej maszyny do aplikacji systemów pianowych
Fig. 8. Injection using a special machine for the application of foam systems

widać z porównania tego rozwiązania z typowymi rozwiązaniami termomodernizacji ścian zewnętrznych (styropian, wełna mineralna, piana PU), wykazuje ono korzystne właściwości (tabela 17).

Podsumowanie

Izolacje termiczne, materiały ściennie, okna o odpowiednim współczynniku lambda są nieodzownym elementem budynku dodatnio (plus) energetycznego. Podejście do jego projektowania powinno być globalne, tzn. należy proponować materiały budowlane o najniższym możliwym współczynniku przewodzenia ciepła oraz odnawialne źródła energii, takie jak np. panele fotowoltaiczne lub/i małe, dachowe turbiny wiatrowe, a także zapewnić sterowanie

Tabela 17. Porównanie 3-komponentowego systemu pianowego na tle wybranych rozwiązań termoizolacyjnych (kolor zielony – bardzo dobry, kolor pomarańczowy – dobry, kolor czerwony – dostateczny)

Table 17. Comparison of the three-component foam system against selected thermal insulation materials (green color – very good, orange color – good, red color – sufficient)

Właściwości	Rodzaj materiału termoizolacyjnego			
	EPS*	MW*	PU	Cavior®
Aplikacja				
Koszt surowca	Orange	Green	Red	Red
Czas aplikacji	Orange	Red	Red	Green
Sprzęt	Orange	Orange	Orange	Orange
Magazynowanie i transport	Red	Orange	Orange	Green
Całkowity koszt łańcucha wartości	Orange	Orange	Red	Orange
Material				
Izolacja cieplna	Orange	Orange	Green	Orange
Palność	Red	Green	Orange	Green
Integralność	Red	Red	Green	Orange
Możliwość recyklingu	Red	Red	Red	Green

Oznaczenia: EPS – styropian; MW – wełna mineralna; PU – poliuretan; Cavior®

wanie najnowocześniejszymi systemami smart home – obejmującymi sterowanie roletami okiennymi czy np. odcinanie prądu w gniazdkach elektrycznych budynku po jego opuszczeniu przez domowników, aby ograniczyć konsumpcję energii w urządzeniach, które posiadają tryb stand-by. Poza tym należy pamiętać, że projektowany budynek ma produkować więcej energii, niż wykorzystuje, aby jej nadwyżkę wykorzystać do ładowania urządzeń elektrycznych, np. samochodów elektrycznych, co pozwala na znaczne ograniczenie emisji CO₂ nie tylko projektowanego obiektu, ale również urządzeń codziennego użytku (rezygnacja z samochodów spalinowych na rzecz samochodów elektrycznych, szczególnie w czasie rekordowego wzrostu cen paliw). Przedstawione badania materiałów termoizolacyjnych są jednym z początkowych zagadnień, jakie zostały podjęte w ramach doktoratu wdrożeniowego dotyczącego budynków dodat-

nich energetycznie oraz wpływu zastosowanych materiałów na obniżenie emisji CO₂ w budynkach.

Literatura

- [1] Ala-Juusela M, Rehman HU, Hukkalainen M, Reda F. Positive energy building definition with the framework, elements and challenges of the concept, *Energies*. 2021; 14 (19): 6260.
- [2] Radomski B, Mróz T. The Methodology for Designing Residential Buildings with a Positive Energy Balance – Case Study, *Energies*. 2021; 14: 5162.
- [3] Kumar GMS, Cao S. State-of-the-Art Review of Positive Energy Building and Community Systems. *Energies*. 2021; 14 (16): 1 – 54.
- [4] Barrutieta X, Kolbasnikova A, Irulegi O, Hernández R. Energy balance and photovoltaic integration in positive energy buildings. Design and performance in built office case studies, *Architectural Science Review*. 2022.
- [5] Hawila AAW, Permetti R, Pozza C, Belleri A. Plus energy building: operational definition and assessment. *Energy & Buildings*. 2022; 265: 11069.
- [6] Rzeczkowska K. Rozwiązania materiałowe i SMART w budownictwie energoefektywnym, Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Poznańska, Poznań. 2021.

Przyjęto do druku: 28.11.2022 r.