

Izolacyjność termiczna ścian zewnętrznych domu jednorodzinnego z lat 90. XX wieku wykonanych systemem gospodarczym w technologii styrobetonu

Thermal insulation of external walls of a single-family house 1990s made using the economic system with styroconcrete technology

inż. Jacek Ślódczyk, prof. dr hab. inż. Henryk Nowak (ORCID: 0000-0002-3413-2699), dr inż. Łukasz Nowak (ORCID: 0000-0002-7732-640X), dr inż. Paweł Noszczyk (ORCID: 0000-0003-2810-5165), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3648

Streszczenie: Określenie budowa domu „systemem gospodarczym”, na początku lat 90. XX wieku, dotyczyło nie tylko częściowego prowadzenia prac budowlanych wysiłkiem własnym inwestora, ale bywało również uzupełniane o produkcję elementów konstrukcyjnych, takich jak bloczki czy pustaki, bezpośrednio na placu budowy. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przewodności cieplnej elementów ze styrobetonu, wykonanych na podstawie receptury jednego z inwestorów indywidualnych, opracowanej w latach 90. na potrzeby budowy domu jednorodzinnego oraz uzyskanego współczynnika przenikania ciepła ścian zewnętrznych tego domu.

Słowa kluczowe: współczynnik przewodzenia ciepła, izolacyjność cieplna ścian, system gospodarczy, styrobeton.

Abstract: At the beginning of the 1990s, the term „build-it-yourself” system referred not only to partial construction work carried out by the investor’s own effort, but it was also supplemented with the production of construction elements, such as blocks or hollow bricks, directly on the construction site. The article presents the results of measurements of the thermal conductivity of polystyrene concrete elements, made on the basis of a recipe of one of the individual investors, developed in the 1990s for the construction of a single-family house, and the obtained heat transfer coefficient of external walls of this house.

Keywords: thermal conductivity coefficient, thermal performance of walls of partitions, build-it-yourself system, polystyrene concrete.

1. Wprowadzenie

Obecna oferta materiałów budowlanych na rynku w Polsce jest na tyle zróżnicowana, że dobór optymalnych rozwiązań materiałowo-technologicznych w budynku pod kątem konstrukcyjnym, ekonomicznym i środowiskowym nie stanowi problemu. Na początku lat 90. ubiegłego wieku sytuacja na polskim rynku była diametralnie inna – dostępność materiałów budowlanych była zdecydowanie bardziej ograniczona, a inwestorzy indywidualni skrupulatniej niż obecnie poszukiwali oszczędności.

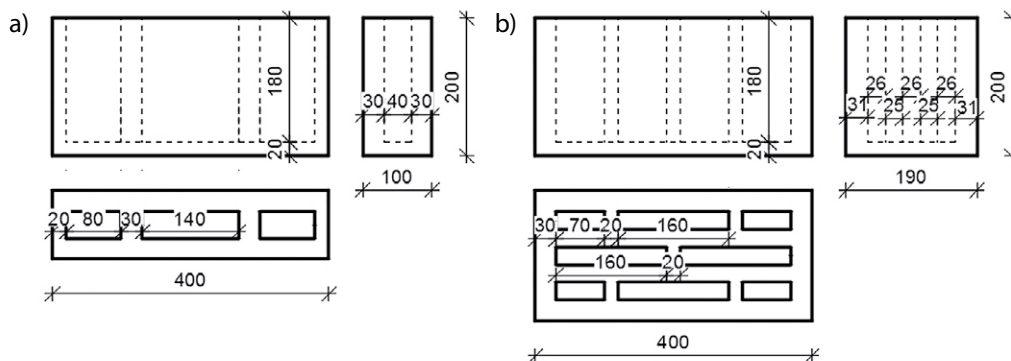
Metody produkcji elementów murowych na miejscu, mimo dodatkowego nakładu pracy, były jednym z często wykorzystywanych rozwiązań pozwalających zachować płynność procesu budowy i racjonalizować jej koszty. Wadą tego podejścia jest możliwość tylko zgrubnego oszacowania parametrów cieplnych tych elementów, co przy planowaniu termomodernizacji takiego budynku ma duże znaczenie.

2. Analizowany budynek

2.1. Dane ogólne

Budynek stanowiący podstawę opracowania, szczegółowo opisany w pracy [3], zaprojektowano w 1991 r., a jego budowa była realizowana w latach 1992–1999 w miejscowości Herby w województwie Śląskim. Budynek znajduje się na osiedlu domów jednorodzinnych na terenie płaskim i nie jest osłonięty wyższymi budynkami. Powierzchnia ogrzewana budynku jest równa 244,5 m², powierzchnia całkowita 374,2 m², a powierzchnia działki 667,0 m². Kubatura ogrzewana budynku wynosi 673,2 m³, a całkowita 927,0 m³. Budynek jest o konstrukcji tradycyjnej murowanej, stropy żelbetowe monolityczne, więźba dachowa drewniana. Elementami wytworzonymi metodą gospodarczą są pustaki ścian piwnic oraz pustaki ścian zewnętrznych (konstrukcyjne i elewacyjne), które są tematem niniejszego opracowania. Ściany piwniczne wykonano z pustaków betonowych o grubości 19 cm na zaprawie cementowej. Trójwarstwowe

Rys. 1. Wymiary elementów styrobetonowych: a) pustaki elewacyjne, b) pustaki konstrukcyjne



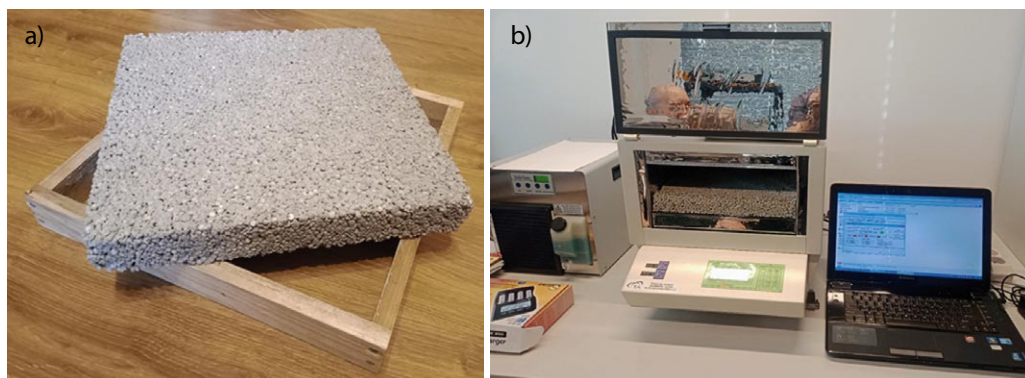
ściany zewnętrzne składały się z pustaków styrobetonowych konstrukcyjnych 19 cm, pustki powietrznej 1,5 cm, styropianu 5 cm i styrobetonowych pustaków elewacyjnych 10 cm. Ściany obustronnie otynkowano tynkiem cementowo-wapiennym 1,5 cm.

2.2. Elementy ze styrobetonu

W budynku występują dwa elementy wykonane z mieszanki styrobetonowych – pustaki konstrukcyjne oraz pustaki elewacyjne, których wymiary przedstawia rysunek 1. Udział otworów w przekroju pustaków jest podobny: dla pustaka elewacyjnego otwory zajmują 30% powierzchni, dla pustaka konstrukcyjnego jest to 31%.

Obydwa elementy zostały wykonane z tej samej mieszanki betonowej, a cechą, jaka je odróżnia, jest objętościowy stosunek ilości mieszanki betonowej do ilości granulatu styropianowego. Dozowanie składników mieszanki betonowej odbywało się według proporcji: 1 worek cementu (25 kg), 1,5 wiadra wody (15 litrów), 20 łopat żwiru, 6 łopat piasku i 11 wiader granulatu styropianowego w przypadku pustaków elewacyjnych, a 4 wiadra dla pustaków konstrukcyjnych. Składniki mieszano mechanicznie przy użyciu betoniarki bębnowej. Szacowany czas mieszania wynosił 7 minut. Następnie mieszankę układano we własnoręcznie wykonanych formach (podobnych do ówczesnej formy na pustaki „Alfa”). Mieszanka w formach była zagęszczana przy użyciu stołu wibracyjnego oraz niezwłocznie po tym rozformowywana. Wstępny czas wiązania wynosił 2 dni, po upływie 21 dni elementy były gotowe do wmurowania. Pustaki użyte do budowy domu powstawały na bieżąco podczas wszystkich czterech pór roku, dlatego warunki takie, jak temperatura i wilgotność były wartościami zmiennymi.

Rys. 2. Pomiary przewodności cieplnej: a) widok wykonanej próbki po rozformowaniu, b) stanowisko pomiarowe z próbką umieszczoną w urządzeniu FOX 314



3. Metodyka badań

3.1. Próbkki ze styrobetonu

Na potrzeby badań odtworzono obie mieszanki styrobetonowe, z których wykonano 6 próbek pustaków konstrukcyjnych oraz 6 próbek pustaków elewacyjnych. Próbkki miały kształt prostokątny o wymiarach 30x30x4 cm, widoczny na rysunku 2a.

Do ich przygotowania wykorzystano formy z drzewa sosnowego. Składniki mieszano mechanicznie w betoniarce bębnowej w czasie około 8 minut. Następnie mieszanką wypełniono formy oraz zagęszczono ręcznie. Konsystencję mieszanki podczas formowania można określić jako gęstoplastyczną. Próbkki były wykonywane w październiku 2022 r. Po wykonaniu próbki dojrzewały przez okres 1 miesiąca w temperaturze około +10°C i wilgotności powietrza około 80%. Próbkki zostały zabezpieczone przed działaniem niskiej temperatury oraz pielęgnowane pod względem wysychania. W ostatnim tygodniu składowania próbki zostały rozformowane oraz umieszczone w pomieszczeniu o temperaturze +21°C.

3.2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe, widoczne na rysunku 2b, do doświadczalnego wyznaczenia przewodności cieplnej analizowanego materiału składało się z aparatu płytowego FOX 314. Użyty płytowy miernik przepływu ciepła jest przyrządem umożliwiającym pomiar przewodności cieplnej zgodnie z normami ASTM C518 oraz ISO 8301. Dla badanych próbek o wymiarach 300x300 mm oraz grubości ok. 40–50 mm, widocznych na rysunku 2a, pomiar przewodności cieplnej

jest mierzony w centralnej części próbki z powierzchni 100x100 mm. Na stanowisku badawczym znajdowały się również: chłodziarka (do stabilizacji temperatury urządzenia) oraz laptop z oprogramowaniem do sterowania i kontroli urządzenia FOX 314.

3.3. Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła materiału

Badanie cieplnego parametru materiałowego, jakim jest współczynnik przewodzenia ciepła, przeprowadzono zgodnie z normową metodyką stacjonarnego pomiaru przewodności cieplnej materiałów budowlanych [4]. Procedura pomiaru w warunkach stacjonarnego (ustalonego) przepływu ciepła przez badany materiał jest czasochłonna, ale równocześnie bardziej wiarygodna i unormowana względem pomiarów metodami niestacjonarnymi [2]. Próbkę z materiałów styrobetonowych po wykonaniu były magazynowane przez okres ponad 4 miesiące w pomieszczeniu w stabilnych warunkach cieplno-wilgotnościowych (temperatura powietrza między +20 a +22°C oraz wilgotność względna w zakresie 40–60%). Po tym okresie próbki wykazywały stabilność masową (stan równowagi zawilgocenia próbki dla warunków średnio-wilgotnych) i rozpoczęto laboratoryjną procedurę pomiaru ich współczynnika przewodności cieplnej. Współczynnik przewodzenia ciepła λ był zmierzony dla średniej temperatury próbki +10°C (dolna płyta grzejna +20°C, górna płyta grzejna 0°C). Pomiaru dla wszystkich próbek zostały wykonane w okresie od 13 grudnia 2022 r. do 18 stycznia 2023 r. Ustabilizowanie przepływu ciepła w aparacie płytowym FOX i pomiar przewodności cieplnej z dokładnością stabilności warunków ustalonego przepływu ciepła do 2% w 3 kolejnych blokach pomiarowych trwał około 240 min dla jednej próbki.

3.4. Obliczenie współczynnika przewodzenia ciepła pustaka metodą numeryczną

Norma [5] w załączniku D opisuje procedurę wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła metodą numeryczną dla elementów murowych w przypadku znanej przewodności cieplnej ich materiału. Modele do obliczeń powinny być przygotowane zgodnie z założeniami podanymi w normie [6]. Elementy z pustkami powietrznymi „na wylot” mogą być modelowane dwuwymiarowo (2D), jednak w tym przypadku podstawa obu pustaków jest pełna (otwory nie są na wylot), więc wymagane było przygotowanie trójwymiarowych (3D) modeli pustaków. Pustki powietrzne modeluje się jako materiał o przewodności cieplnej λ_g wyznaczonej zgodnie z załącznikiem D normy [8] zgodnie ze wzorem:

$$\lambda_g = \frac{d_g}{R_g} \quad (1)$$

gdzie:

d_g – szerokość pustki powietrznej (wymiar mierzony w kierunku przepływu ciepła) [m],

R_g – opór cieplny warstwy powietrza wyznaczony zgodnie z załącznikiem D [(m²K)/W].

Kolejnym krokiem jest dobranie odpowiednich współczynników przejmowania ciepła h_i i h_e (lub oporów przejmowania ciepła R_{si} i R_{se}) zgodnie z normą [8] na powierzchniach modelu i wykonanie symulacji. Uzyskana z symulacji wartość współczynnika sprzężenia cieplnego L^{3D} pozwala na obliczenie współczynnika przenikania ciepła pustaka U_{pus} zgodnie ze wzorem:

$$U_{pus} = \frac{L^{3D}}{A} \quad (2)$$

gdzie:

L^{3D} – współczynnik sprzężenia cieplnego [W/K], który można wyznaczyć ze wzoru:

$$L^{3D} = \frac{q}{(\Theta_i - \Theta_e)} \quad (3)$$

gdzie:

q – strumień ciepła przepływający przez model [W],

Θ_i – temperatura powietrza przyjęta po wewnętrznej stronie modelu [K],

Θ_e – temperatura powietrza przyjęta po zewnętrznej stronie modelu [K],

A – pole powierzchni modelu ograniczone osiami symetrii, wyznaczone zgodnie z normą [C], [m²].

Ostatnim krokiem jest obliczenie współczynnika przewodzenia ciepła pustaka λ_{pus} zgodnie z zależnością:

$$\lambda_{pus} = \frac{d_{pus}}{\left(\frac{1}{U_{pus}} - R_{si} - R_{se}\right)} \quad (4)$$

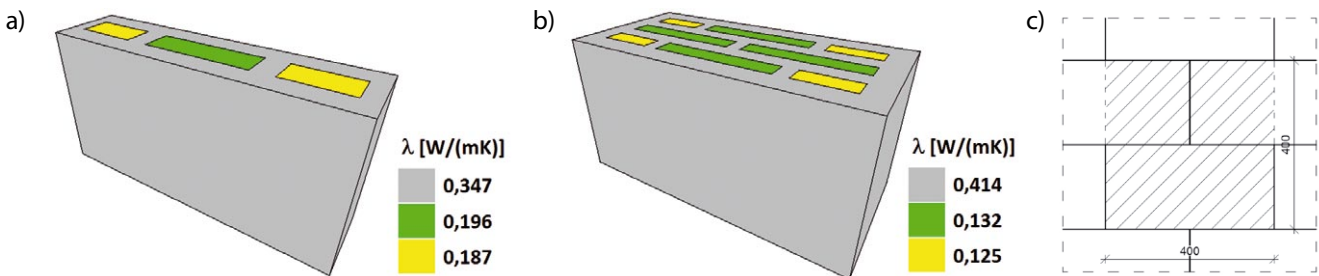
gdzie:

d_{pus} – szerokość modelu pustaka (wymiar mierzony w kierunku przepływu ciepła) [m].

3.5. Modele numeryczne pustaków

Obliczenia współczynników przewodzenia ciepła dla pustaków przeprowadzono, zgodnie z procedurą przedstawioną w normie [5] w załączniku D, w programie Physibel Voltra 7.0w. Przygotowanie modelu obliczeniowego 3D opierało się na składowych przedstawionych na rysunku 3, które wykorzystano do obliczeń współczynnika przewodzenia ciepła pustaka. Spoiny celowo pominięto w analizach.

Na podstawie wstępnej analizy dwuwymiarowego rozkładu temperatur w analizowanej ścianie zewnętrznej, w programie THERM, stwierdzono, że różnica temperatur na powierzchniach ograniczających poszczególne przestrzenie powietrzne w pustakach nie przekracza 5K i konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła można przyjąć według tablicy D.1 normy [8]. Opór cieplny R_a pustek powietrznych został wyznaczony zgodnie z załącznikiem D normy [8] jak dla małych niewentylowanych przestrzeni powietrznych o szerokości mniejszej niż ich 10-krotna grubość. Wszystkie obliczone parametry przestrzeni powietrznych zestawiono



Rys. 3. Składowe modelu obliczeniowego: a) model pustaka elewacyjnego, b) model pustaka konstrukcyjnego, c) reprezentatywny układ pustaków (zakreskowana część), który wykorzystano do modelu obliczeniowego

Tabela 1. Zestawienie oporów cieplnych i równoważnych współczynników przewodzenia ciepła pustek powietrznych w pustakach przyjętych do analiz 3D

Lp.	Pustak	Wymiary pustek powietrznych (długość x szerokość)	Opór cieplny pustki – R_a	Równoważny współczynnik przewodzenia ciepła pustki – λ_g
		[m]	[(m ² K)/W]	[W/(mK)]
1	Elewacyjny	0,080 x 0,040	0,214	0,187
2		0,140 x 0,040	0,204	0,196
3	Konstrukcyjny	0,070 x 0,026	0,208	0,125
4		0,160 x 0,026	0,197	0,132

w tabeli 1. Do analiz przyjęto warunki brzegowe na wewnętrznej powierzchni pustaka: $\Theta_i = +20^\circ\text{C}$, $h_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, na zewnętrznej: $\Theta_e = -20^\circ\text{C}$, $h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, na pozostałych adyabatyczne.

4. Wyniki

4.1. Wyniki pomiarów przewodności cieplnej

Otrzymane wyniki w postaci zmierzonych parametrów współczynnika przewodzenia ciepła oraz grubości próbki d dla poszczególnych próbek badawczych zestawiono w tabeli 2. Przedstawione wartości współczynnika przewodzenia ciepła są wartościami pomierzonymi i nie należy ich mylić

Tabela 2. Wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła dla wszystkich próbek badawczych

Lp.	Rodzaj materiału (styrobetonu)	Oznaczenie próbki	Masa próbki – m	Grubość – d	Przewodność cieplna materiału – λ
			[kg]	[mm]	[W/(mK)]
1	Elewacyjny	1E	4,3	43,29	0,297
2		6E	4,3	43,76	0,255
3		8E	4,2	44,01	0,232
4		9E	4,4	44,56	0,268
5		12E	4,2	43,50	0,302
6		11E	4,4	44,24	0,298
7	Konstrukcyjny	2K	5,5	44,39	0,239
8		3K	5,8	44,60	0,369
9		4K	5,8	43,48	0,300
10		5K	5,8	44,22	0,311
11		7K	5,8	45,18	0,298
12		10K	5,7	44,26	0,322

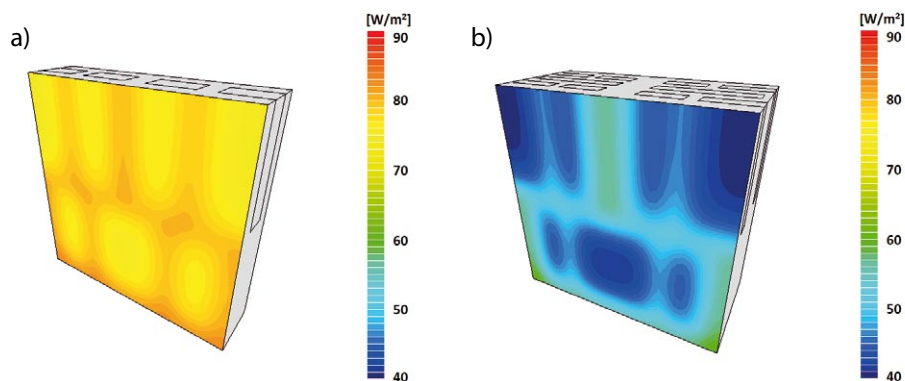
z wartościami deklarowanymi i obliczeniowymi [1], [7]. Wartość deklarowaną obliczono zarówno dla materiału konstrukcyjnego jak i materiału elewacyjnego zgodnie z procedurą zawartą w pracy ITB [1] i pokazano w tabeli 3. Wartość deklarowana λ_D została obliczona na podstawie 6 zmierzonych wartości przewodności cieplnej λ , średniej arytmetycznej λ_m , odchylenia standardowego w próbie S_λ oraz dobraniu współczynnika przedziału ufności k_2 zgodnie z [1].

4.2. Wyniki obliczeń numerycznych współczynnika przewodzenia ciepła dla pustaków

Rozkład gęstości strumienia ciepła przepływającego przez oba modele pustaków przedstawia rysunek 4. Sumaryczny strumień ciepła przepływający przez model pustaków elewacyjnych wynosił $q_{\text{elew}} = 12,51 \text{ W}$, a pustaków konstrukcyjnych $q_{\text{konstr}} = 7,68 \text{ W}$. Następnie wyznaczono współczynniki sprzężenia cieplnego, które wynosiły odpowiednio $L^{3D, \text{elew}} = 0,3128 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ oraz $L^{3D, \text{konstr}} = 0,1920 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Po dokończeniu obliczeń, wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla pustaka elewacyjnego wynosił $\lambda_{\text{pus,elew}} = 0,293 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, a dla konstrukcyjnego $\lambda_{\text{pus,konstr}} = 0,286 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Tabela 3. Wyniki obliczenia deklarowanego współczynnika przewodzenia ciepła dla materiału zgodnie z [1]

Lp.	Rodzaj materiału (styrobetonu)	Średnia – λ_m	Odchylenie średniej – s_λ	Współczynnik k_2	Wartość deklarowana – λ_D
		[W/(mK)]	[W/(mK)]	[-]	[W/(mK)]
1	Elewacyjny	0,276	0,028	2,54	0,347
2	Konstrukcyjny	0,307	0,042	2,54	0,414

Rys. 4. Rozkład gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni modelu pustaków: a) elewacyjnych, b) konstrukcyjnych.

5. Podsumowanie

Przy ocenie bilansu cieplnego budynku istniejącego i projektowaniu zakresu jego termomodernizacji istotnym elementem jest znajomość cieplno-wilgotnościowych właściwości materiałów, z których wykonane są przegrody tworzące jego termiczną obudowę. Jeśli jest to możliwe, projektanci w obliczeniach bazują na danych normowych lub tabelarycznych z dostępnych opracowań. Zdarzają się jednak sytuacje, gdzie zastosowane rozwiązania są na tyle różniące, że dobór cieplnych cech materiałów jest utrudniony i wówczas bardzo pomocne jest wykonanie badań tych cech w laboratorium. Naturalną konsekwencją tego jest zwiększenie dokładności obliczeń współczynnika przenikania ciepła przegród oraz innych wskaźników w obliczeniach charakterystyki energetycznej budynku.

Przeprowadzone badania doświadczalne i analiza analityczno-numeryczna pozwoliła wyciągnąć poniższe wnioski.

- Zmierzona średnia przewodność cieplna materiału (styrobetonu) wynosi dla elementów elewacyjnych 0,276 W/(mK), a dla elementów konstrukcyjnych 0,307 W/(mK).
- Mieszanka betonu i styropianu wykonywana metodą gospodarczą charakteryzuje się dużą nierównomiernością współczynnika przewodzenia ciepła λ , odchylenie standardowe wynosi powyżej 10% wartości średniej.
- Deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła λ_D styrobetonu wynosi dla elementów elewacyjnych 0,347 W/(mK), a dla elementów konstrukcyjnych 0,414 W/(mK).
- Większa szerokość przestrzeni powietrznej w pustakach wpływa niekorzystnie na izolacyjność cieplną takiej warstwy powietrza – pustka 4 cm grubości ma 1,5 razy większą przewodność cieplną niż pustka 2,6 cm.
- Obliczony współczynnik przewodzenia ciepła pustaków wynosi dla elementów elewacyjnych 0,294 W/(mK), a dla elementów konstrukcyjnych 0,286 W/(mK).

- Mimo wyjściowo lepszego materiału (o 19% niższa wartość λ_D), podobnego udziału pustek powietrznych w przekroju (30 i 31%), pustaki elewacyjne mają nieco wyższy współczynnik przewodzenia ciepła (o 3% wyższa wartość λ_{pus}) niż pustaki konstrukcyjne ze względu na większą szerokość zastosowanych pustek powietrznych.

Uwzględniając wszystkie warstwy ściany zewnętrznej, wymienione w pkt. 2.1., jej współczynnik przenikania ciepła jest na poziomie 0,42 W/(m²K), co było wartością spełniającą ówczesne wymogi w zakresie ochrony cieplnej.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Panu Marianowi Słodczykowi za pomoc w odtworzeniu składu mieszanki betonowej do wyrobu pustaków.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Firkowicz-Pogorzelska K., Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych, Building Research Institute – Quartely 3(119)2001
- [2] Pogorzelski J., Ostrożnie z niestacjonarnymi badaniami przewodności cieplnej!, Building Research Institute – Quartely 1(113)2000
- [3] Słodczyk J., Projekt termomodernizacji domu jednorodzinnego z lat 90-tych ubiegłego stulecia, Praca dyplomowa, Politechnika Wroclawska, Wroclaw, 2023
- [4] PN-EN 12667: 2002: Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego – Wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym
- [5] PN-EN 1745: 2020: Mury i wyroby murowe – Metody określania właściwości cieplnych
- [6] PN-EN ISO 10211: 2017-09: Mostki cieplne w konstrukcji budowlanej – Przepływy ciepła i temperatury powierzchni – Obliczenia szczegółowe
- [7] PN-EN ISO 10456: 2009: Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych
- [8] PN-EN ISO 6946: 2017: Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania