

dr inż. Katarzyna Kryzia¹⁾

ORCID: 0000-0001-7693-107X

dr inż. Dominik Kryzia^{2)*)}

ORCID: 0000-0003-0639-3485

The influence of thermal insulation types in residential building on levels emission of CO₂ in case selected heat sources

Wpływ rodzaju izolacji cieplnej budynku mieszkalnego na poziom emisji CO₂ w przypadku wybranych źródeł ciepła

DOI: 10.15199/33.2024.12.23

Abstract. The article discusses the heat demand of a single-family house, as well as the associated CO₂ emissions and the cost-effectiveness of various solutions. Three heat sources were analyzed: a gas boiler, a heat pump, and an oil boiler, along with insulation materials: mineral wool, polystyrene, and PIR foam. The results indicate that polystyrene is the most cost-effective solution for each heat source, while mineral wool features the lowest CO₂ emissions. Considering both criteria, the best results were achieved with a house equipped with a gas boiler as the heat source.

Keywords: heat source; thermal insulation; carbon footprint; single-family house; emission of CO₂; thermal insulation materials.

Streszczenie. Artykuł omawia zapotrzebowanie na ciepło w domu jednorodzinnym oraz związane z tym emisje CO₂ i efektywność kosztową różnych rozwiązań. Przeanalizowano trzy źródła ciepła: kocioł gazowy, pompę ciepła i kocioł olejowy, a także materiały izolacyjne: wełnę mineralną, styropian i piankę PIR. Wyniki wskazują, że styropian jest najbardziej opłacalnym rozwiązaniem dla każdego źródła ciepła, natomiast wełna mineralna cechuje się najniższymi emisjami CO₂. Analizując oba kryteria, najlepsze rezultaty osiągnięto w przypadku domu wyposażonego w kocioł gazowy jako źródło ciepła.

Słowa kluczowe: źródło ciepła; izolacja cieplna; ślad węglowy; budynek jednorodzinny; emisja CO₂; materiały izolacyjne.

The increase in prices of energy resources and energy has caused owners of single-family houses and investors building such facilities to look for effective solutions to reduce energy and heat consumption and the cost of obtaining them. One such way is to reduce the building's heat demand by lowering heat losses through the building envelope and using efficient central heating, hot water and ventilation systems. These measures also contribute to reducing CO₂ emissions, which is becoming very important due to the increasingly noticeable global climate change [1].

Buildings account for 36% of final energy demand and 39% of CO₂ emissions worldwide [2 ÷ 4], so it is necessary to conduct scientific research on the possibilities of reducing CO₂ emissions in the building sector and their impact on energy and cost efficiency. This paper presents a comparative analysis of typical technological and material solutions for single-family housing in Poland, conducted in terms of carbon footprint and cost analysis.

In the context of sustainability, estimating CO₂ emissions should cover the entire life cycle of a building and its components. The total emissions should be taken into

Wzrost cen surowców energetycznych i energii sprawił, że właściciele domów jednorodzinnych oraz inwestorzy budujący tego rodzaju obiekty szukają skutecznych rozwiązań zapewniających obniżenie zużycia energii i ciepła oraz kosztów ich pozyskania. Jednym z takich sposobów jest zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło w budynku przez obniżenie strat ciepła przez przegrody zewnętrzne oraz zastosowanie efektywnej instalacji c.o., c.w.u. oraz wentylacji. Działania te przyczyniają się także do zmniejszenia emisji CO₂, co ze względu na coraz bardziej odczuwalne globalne zmiany klimatyczne nabiera dużego znaczenia [1].

Budynki odpowiadają za 36% końcowego zapotrzebowania na energię i 39% emisji CO₂ na całym świecie [2 ÷ 4], dlatego konieczne jest prowadzenie badań naukowych dotyczących możliwości redukcji emisji CO₂ w sektorze budowlanym i ich wpływu na efektywność energetyczną oraz kosztową. W artykule przedstawiono analizę porównawczą typowych rozwiązań technologiczno-materiałowych dla budownictwa jednorodzinne w Polsce, przeprowadzoną pod kątem śladu węglowego i analizy kosztów.

W kontekście zrównoważonego rozwoju szacowanie emisji CO₂ powinno obejmować cały cykl życia budynku i jego komponentów. Należy wziąć pod uwagę całkowitą emisję, począwszy od produkcji materiałów budowlanych i budowy, przez fazę eksploatacyjną, aż do rozbiórki [5]. Największa część emi-

¹⁾ AGH University of Krakow, Faculty of Civil Engineering and Resource Management

²⁾ Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences

*) Correspondence address: kryzia@min-pan.krakow.pl

account, from the production of building materials and construction, through the operation phase, to demolition [5]. The largest part of CO₂ emissions is related to a building's energy consumption during its operational phase. In this article, we analyse how the various technological solutions for heat generation and the insulation materials used for the building envelope affect the emissivity at the scale of the entire building. This issue is important already at the stage of building design, especially from the point of view of selecting technologies and materials on the basis of various criteria. The most common is the cost criterion. Recently, we can see a conscious approach of both investors and designers to the selection of technologies and materials from the point of view of their environmental impact [6].

In this article, we presented an analysis of selected thermal insulation technologies for the building's exterior walls and the heating system for central heating and hot water preparation. A carbon footprint was determined for each of the wall insulation options, followed by an analysis of the emissivity of the building during the operational phase with different heat generation technologies. This allowed an assessment of how the choice of insulation materials and heating system would translate into the emissivity of the entire project. The building envelope was analysed because it forms the boundary between the indoor and outdoor environments, and also influences the thermal comfort of the occupants [7] and energy losses during the operation phase [8]. The building envelope is important because it strongly influences the microclimate [9].

The subject of the study and the assumptions made in the analysis

Spatial layout and architectural form of the building.

The analysed object is a residential building designed in 2022 with traditional technology, without basement, detached, two-story, single-family house. The walls were made using masonry technology: exterior walls made of cellular concrete blocks, and interior walls made of silicate blocks combined with plasterboard walls. The footings are reinforced concrete, the reinforced concrete monolithic ceiling, the roof is of wooden construction, covered with ceramic tiles. The advantages of the traditional technology used are high strength, resistance to weathering, and the lack of need for specialized equipment for the construction of the building. On the other hand, the disadvantages – longer time for the implementation of the project and higher costs compared to other technologies [10].

A single-family building constructed using traditional technology was selected for the analysis, since according to the Central Statistical Office, this technology dominates single-family housing construction (98.8% of all single-family buildings erected in Poland in 2022) [11]. The building selected for analysis, with a built-up area of 69.25 m², has a net area of 99.49 m², including a usable area of 95.39 m² and a gross volume of 511.97 m³. The length of its front elevation is 9.16 m, and the width of its side elevation is 7.56 m. The building

sji CO₂ związana jest ze zużyciem energii w budynku w fazie jego eksploatacji. W artykule analizujemy, jak poszczególne rozwiązania technologiczne wytwarzania ciepła i stosowane materiały izolacyjne przegród zewnętrznych budynku wpływają na emisyjność w skali całego budynku. Zagadnienie to jest istotne już na etapie projektowania budynków szczególnie z punktu widzenia doboru technologii i materiałów na podstawie różnych kryteriów. Najczęściej jest to kryterium kosztowe. Ostatnio widać świadome podejście zarówno inwestorów, jak i projektantów do wyboru technologii i materiałów z punktu widzenia ich wpływu na środowisko naturalne [6].

W artykule zaprezentowaliśmy analizę wybranych technologii izolacji cieplnej ścian zewnętrznych budynku oraz systemu grzewczego do przygotowania c.o. i c.w.u. W przypadku każdego z wariantów ocieplenia ścian został określony ślad węglowy, a następnie wykonano analizę emisyjności budynku w fazie eksploatacji z zastosowaniem różnych technologii wytwarzania ciepła. Pozwoliło to na ocenę, jak wybór materiałów izolacyjnych oraz systemu grzewczego przełożą się na emisyjność całej inwestycji. Analizie zostały poddane ściany zewnętrzne budynku, ponieważ stanowią granicę między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym i wpływają na komfort cieplny mieszkańców [7] oraz straty energii w fazie eksploatacji [8]. Przegrody zewnętrzne budynku są istotne, ponieważ silnie oddziałują na mikroklimat [9].

Przedmiot badań i założenia przyjęte w analizie

Układ przestrzenny oraz forma architektoniczna budynku.

Analizowany obiekt to budynek mieszkalny zaprojektowany w 2022 r. w technologii tradycyjnej, niepodpiwniczony, wolnostojący, dwukondygnacyjny, jednorodzinny. Ściany zostały wykonane w technologii murowanej, zewnętrzne z bloczków z betonu komórkowego, a wewnętrzne z bloczków silikatowych w połączeniu ze ścianami z płyt g-k, ławy fundamentowe żelbetowe, strop żelbetowy monolityczny, dach o konstrukcji drewnianej, kryty dachówką ceramiczną. Zaletami zastosowanej technologii tradycyjnej jest duża wytrzymałość, odporność na działanie czynników atmosferycznych oraz brak specjalistycznego sprzętu do budowy obiektu, natomiast wadami – dłuższy czas wykonywania inwestycji oraz większe koszty w porównaniu z innymi technologiami [10].

Do analizy wybrano budynek jednorodzinny wykonany w technologii tradycyjnej, ponieważ wg danych Głównego Urzędu Statystycznego ta technologia dominuje w jednorodzinym budownictwie mieszkaniowym (98,8% wszystkich wzniesionych budynków jednorodzinnych w Polsce w 2022 r.) [11]. Wybrany do analizy budynek o powierzchni zabudowy 69,25 m² ma powierzchnię netto 99,49 m², w tym powierzchnię użytkową 95,39 m² i kubaturę brutto wynoszącą 511,97 m³. Długość jego elewacji frontowej wynosi 9,16 m, a szerokość elewacji bocznej 7,56 m. Budynek jest zorientowany na osi wschód-zachód, wybudowany na planie prostokąta, pokryty dachem symetrycznym dwuspadowym o kącie nachylenia 40° z połaciami dachowymi skierowanymi na północ/południe. Zastosowano w nim stolarkę okienną PVC o współczynniku przenikania ciepła U równym 0,9 W/(m²·K) i łącznej po-

is oriented on an east-west axis, built on a rectangular plan, covered with a symmetrical gable roof with a slope angle of 40° , with roof slopes facing north/south.

It uses PVC window frames with a U-value of $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ and a total area of 25.1 m^2 , exterior doors with a U-value of $1.3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ and a floor on the ground with a U-value of $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. The attic is unheated, the roof is uninsulated. The ceiling separating the floor from the attic is made in suspended technology with insulation, the external walls are without insulation, and their heat transfer coefficient U is $1.25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. The building is equipped with a mechanical supply and exhaust ventilation system with heat recovery (heat recovery efficiency of 85%).

The study was performed with the assumption that the building is located in climate zone III, ground frost zone II, wind zone I, snow load zone II, land category II, and the groundwater level is below the foundation level. The building is designed for a family of 4. On the first floor there is a vestibule, technical room, toilet and common space: living room with dining room, kitchen and hall. The first floor houses three bedrooms, a bathroom and a hallway. The selected building was designed in accordance with the requirements [12 ÷ 14].

Thermal insulation of the building. The choice of thermal insulation material for residential buildings has a direct impact on subsequent heating costs. On the construction market in Poland, thermal insulation materials are dominated by polystyrene (expanded polystyrene – EPS and extruded polystyrene – XPS), mineral wool (from molten rock – rock wool, from glass – glass wool, from slag – slag wool) and foams (polyurethane – PUR, polyisocyanurate – PIR, polyethylene – PE, phenolic – PF). They differ in technical parameters, appearance, structure and installation method [15]. Manufacturers provide information on their products about the parameters that should be taken into account to make a selection of thermal insulation materials. Particularly important is the value of the thermal conductivity coefficient λ . Price lists and offers from manufacturers were used to determine the value of the cost of thermal insulation depending on the type and thickness of the thermal insulation material used [16].

For the analysis, the thickness of the structural layer of the wall was adopted according to the design, while thermal insulation layers were adopted in several variants. The following thermal insulation materials were selected and analysed:

- a) EPS boards with a λ coefficient of $0.032 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- b) PIR foam boards with a λ coefficient of $0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- c) stone wool insulation boards with a λ coefficient of $0.034 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

In the analysis, the thermal insulation layer of the exterior walls and attic ceiling was used in the following thickness variants: 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 cm.

For each of the selected thermal insulation materials that were analysed for use in the project, the environmental impact was determined using CO_2 emission data available in EPD declarations [17 ÷ 22]. These declarations provide detailed information on a material's environmental impact, including

wierzchni wynoszącej $25,1 \text{ m}^2$, drzwi zewnętrzne o współczynniku przenikania ciepła U wynoszącym $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ oraz podłogę na gruncie o współczynniku przenikania ciepła U $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Poddasze jest nieogrzewane, dach nieocieplony. Strop oddzielający kondygnację od poddasza wykonany został w technologii podwieszanej z ociepleniem, ściany zewnętrzne są bez ocieplenia, a ich współczynnik przenikania ciepła U wynosi $1,25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Budynek wyposażony jest w instalację wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej, z odzyskiem ciepła (sprawność odzysku ciepła 85%).

Badania wykonano przy założeniu, że budynek zlokalizowany jest w III strefie klimatycznej, II strefie przemarzania gruntu, I strefie wiatrowej, II strefie obciążenia śniegiem, II kategorii terenu, a poziom wód gruntowych znajduje się poniżej poziomu posadowienia. Budynek jest przeznaczony dla 4-osobowej rodziny. Na parterze znajduje się wiatrołap, pomieszczenie techniczne, toaleta oraz przestrzeń wspólna: pokój dzienny z jadalnią, kuchnią i holem. Na piętrze mieszczą się trzy sypialnie, łazienka oraz korytarz. Wybrany budynek został zaprojektowany zgodnie z wymaganiami [12 ÷ 14].

Izolacja cieplna budynku. Wybór materiału termoizolacji budynków mieszkalnych ma bezpośredni wpływ na późniejsze koszty ich ogrzania. Na rynku budowlanym w Polsce, w sektorze materiałów termoizolacyjnych dominują: styropian (polistyren ekspandowany – EPS i ekstrudowany – XPS); wełna mineralna (ze stopionej skały – wełna skalna, ze szkła – wełna szklana; z żużla – wełna żużlowa) oraz piany (poliuretanowa – PUR, poliizocyanurowa – PIR; polietylenowa – PE, fenolowa – PF). Różnią się one parametrami technicznymi, wyglądem, strukturą i sposobem montażu [15]. Producenci podają na swoich produktach informacje o parametrach, które należy wziąć pod uwagę, aby dokonać selekcji materiałów termoizolacyjnych. Szczególnie istotna jest wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ . Do określenia wartości kosztów wykonania termoizolacji w zależności od rodzaju oraz grubości zastosowanego materiału termoizolacyjnego korzystano z cenników i ofert producentów [16].

Do analizy przyjęto grubość warstwy konstrukcyjnej ściany zgodnie z projektem, natomiast warstwy termoizolacyjnej przyjęto w kilku wariantach. Wybrano i analizowano następujące materiały termoizolacyjne:

- a) płyty styropianowe EPS o współczynniku λ wynoszącym $0,032 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- b) płyty ze sztywnej pianki PIR o współczynniku λ równym $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- c) płyty izolacyjne z wełny kamiennej o współczynniku λ wynoszącym $0,034 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

W analizie zastosowano warstwę termoizolacji ścian zewnętrznych i stropu poddasza w następujących wariantach grubości: 5, 10, 15, 20, 25, 30 i 35 cm.

W przypadku każdego z wybranych materiałów termoizolacyjnych, które zostały przeanalizowane do wykorzystania w realizacji inwestycji, określono wpływ na środowisko, wykorzystując dane dotyczące emisji CO_2 dostępne w deklaracji EPD [17 ÷ 22]. Deklaracje te dostarczają szczegółowych informacji o wpływie materiału na środowisko, w tym informacji o współczynnikach emisji CO_2 w fazach A1–A3. Deklara-

information on CO₂ emission factors in phases A1-A3. EPD declarations were found on product manufacturers' websites [23 ÷ 25].

It was assumed that thermal insulation works were carried out on the basis of technical documentation prepared by the designer, in accordance with the technical conditions for the execution and acceptance of construction works and with the recommendations of manufacturers of insulation systems [12, 13, 26].

It was assumed that the durability of insulation is 30 years, which corresponds to the number of years of planned use of insulation [27]. The thermal insulation of the exterior walls of a building should meet the requirements specified in the legal and technical regulations on thermal insulation requirements and other requirements related to energy conservation and the technology of performing thermal insulation works [1, 14, 28 ÷ 33]. Despite the listed requirements, the analysis also includes such variants of thermal insulation layers of the external partitions that do not meet the indicated requirements.

Building heating system. Choosing the right heating system is a decision that requires a thorough analysis of the available options. Among the most commonly chosen heating systems in residential buildings are: boilers (gas – usually maintenance-free, fully automated; oil – less popular, emitting harmful compounds; electric – fully automated heating process, low installation costs); heat pumps (air – the bottom source of heat is air, they have a low coefficient of efficiency; ground – high coefficient of efficiency; water – the highest coefficient of efficiency and the most expensive); solar collector systems [34].

The analysis considered three different heat source options for the central heating and hot water system:

1) a dual-function, condensing, pulse gas boiler fueled by high-methane gas from the gas grid (36 MJ/m³), with power modulation from 3.6 to 12 kW, with a total efficiency of preparing usable heat of 95% and an efficiency of preparing hot water of 92%. The cost of purchasing and installing a gas boiler ranges from 2,500 to 8,000 PLN. For the calculations, a value of 4500 PLN was assumed for the nominal power of 12 kW. In addition, the cost of making a chimney amounting to 4000 PLN and the cost of making a gas connection estimated at 3000 PLN were taken into account;

2) reversible electric air-to-water heat pump powered by electricity from the electric grid, with a total efficiency of preparing usable heat of 244% and an efficiency of preparing hot water of 177%. The cost of purchasing and installing the device was assumed at: 17,000 PLN for 4 kW power; 18,500 PLN for 6 kW power; 19,000 PLN for 8 kW power and 20,000 PLN for 10 kW power;

3) a bifunctional oil boiler fueled by light fuel oil (38.8 MJ/dm³) with power modulation from 3.2 to 16 kW, with a total useful heat preparation efficiency of 71.4% and a hot water preparation efficiency of 82%. The cost of purchasing and installing an oil boiler ranges from 10,000 to 20,000 PLN. In this variant, the cost of purchasing and installing an oil boiler is assumed at 15,000 PLN for a nominal capacity of 16 kW. In addition, the costs of making a chimney 4,000 PLN and

cje EPD znaleziono na stronach internetowych producentów wyrobów [23 ÷ 25].

Założono, że roboty termoizolacyjne wykonano na podstawie opracowanej przez projektanta dokumentacji technicznej, zgodnie z warunkami technicznymi wykonania i odbioru robót budowlanych oraz z zaleceniami producentów systemów ociepleniowych [12, 13, 26].

Przyjęto, że trwałość izolacji wynosi 30 lat. Jest to liczba lat planowanego użytkowania izolacji [27]. Izolacyjność cieplna ścian zewnętrznych budynku powinna spełniać wymagania określone w przepisach prawnych i technicznych, dotyczących wymagań izolacyjności cieplnej oraz innych wymagań związanych z oszczędnością energii oraz technologią wykonania robót dociepleniowych [13, 14, 28 ÷ 33]. Pomimo wymienionych wymagań, w analizie uwzględniono także takie warianty warstw izolacji cieplnej przegród zewnętrznych, które nie spełniają wskazanych wymagań.

System grzewczy budynku. Wybór odpowiedniego systemu grzewczego to decyzja, która wymaga gruntownej analizy dostępnych opcji. Wśród najczęściej wybieranych systemów grzewczych w budynkach mieszkalnych są: kotły (gazowe zwykle bezobsługowe, w pełni zautomatyzowane; olejowe – mniejszy wybór, emitują szkodliwe związki; elektryczne – w pełni zautomatyzowany proces grzewczy, niskie koszty montażu); pompy ciepła (powietrzne – dolnym źródłem ciepła jest powietrze, mają mały współczynnik efektywności; gruntowe – wysoki współczynnik efektywności; wodne – najwyższy współczynnik efektywności i najbardziej kosztowne); systemy solarnych kolektorów [34].

W analizie uwzględniono trzy różne warianty źródła ciepła na potrzeby instalacji c.o. i c.w.u.:

1) dwufunkcyjny, kondensacyjny, impulsowy kocioł gazowy zasilany gazem wysokometanowym z sieci gazowej (36 MJ/m³), z możliwością modulacji mocy od 3,6 do 12 kW, o całkowitej sprawności przygotowania ciepła użytkowego 95% oraz sprawności przygotowania c.w.u. wynoszącej 92%. Koszt zakupu i montażu kotła gazowego wynosi 2500 – 8000 zł. Do obliczeń przyjęto wartość 4500 zł w przypadku mocy nominalnej 12 kW. Dodatkowo uwzględniono koszty wykonania komina wynoszące 4000 zł oraz koszty wykonania przyłącza gazowego oszacowane na 3000 zł;

2) rewersyjna elektryczna pompa ciepła typu powietrze-woda zasilana energią elektryczną z sieci elektroenergetycznej, o całkowitej sprawności przygotowania ciepła użytkowego 244% oraz sprawności przygotowania c.w.u. wynoszącej 177%. Koszt zakupu i montażu urządzenia przyjęto na poziomie: 17 000,00 zł w przypadku mocy 4 kW; 18 500,00 zł o mocy 6 kW, 19 000,00 zł o mocy 8 kW i 20 000,00 zł o mocy 10 kW;

3) dwufunkcyjny kocioł olejowy zasilany lekkim olejem opałowym (38,8 MJ/dm³) z możliwością modulacji mocy od 3,2 do 16 kW, o całkowitej sprawności przygotowania ciepła użytkowego 71,4% oraz sprawności przygotowania c.w.u. wynoszącej 82%. Koszty zakupu i montażu kotła olejowego wahają się od 10 000 do 20 000 zł. W tym wariantcie źródła ciepła koszt zakupu i montażu kotła olejowego przyjęto na poziomie 15 000 zł w przypadku mocy nominalnej 16 kW. Dodatkowo uwzględnio-

installing a fuel oil tank with a connection 5,000 PLN were taken into account.

The central heating system uses underfloor heating and low-temperature wall radiators to distribute heat, and the hot water system is equipped with a water storage tank. A useful life of 30 years was assumed for the heat sources and installations analysed. The costs of preparing central heating and hot water depend on the heat generation technology used and the prices of electricity and fuels. The following prices were assumed in the analysis: electricity – 1.39 PLN/kWh; natural gas – 5.3 PLN/m³; heating oil – 5.7 PLN/dm³.

Calculations and results of analysed variants

For each of the thermal insulation variants listed, the cost of insulating the building and the cost of purchasing the heat source were estimated. Since each of the variants of thermal insulation and the heat source used affected the energy performance of the building, the calculations took into account the costs and CO₂ emissions during the building's operation phase.

The heat demand for domestic hot water and heating the building without insulation is 24,000 kWh/year, which corresponds to a thermal power demand of 9.8 kW. Based on the thermal insulation used, the building's heat demand was calculated, which made it possible to determine the amount of primary energy required to meet this demand. Knowing the primary energy demand, annual energy costs were calculated, and based on the final energy demand, CO₂ emissions were determined, identified for the purposes of the analysis with the carbon footprint during the building's operation.

For further analysis and selection of the optimal material variant, the following parameters were calculated as optimization criteria [35, 36]:

- the annual cost of meeting the heat demand of the K_r building, which is the quotient (formula 1): the sum of the discounted cost of building thermal insulation (materials, labor, equipment), the cost of purchasing and installing the heat source, the cost of primary energy consumption, i.e. fuel/electricity supplying the heat source, and the number of years of planned use. The discount rate was assumed at 5%.

- the annual CO₂ emissions resulting from meeting the heat demand of the E_r building, which is the sum of (formula 2): the quotient of CO₂ emissions at the production stage of the thermal insulation material (A1-A3) and installation materials, the annual CO₂ emissions over the life of the building resulting from final energy consumption for heat and hot water preparation, and the number of years of planned use.

$$K_r = \frac{\sum_{t=0}^k \frac{(T_k^t + Z_k^t + E_k^t)}{(1+r)^t}}{k} \quad (1)$$

$$E_r = \sum_{t=0}^k \frac{(T_e^t + E_e^t)}{k} \quad (2)$$

no koszty wykonania komina 4000 zł oraz montażu zbiornika na olej opałowy wraz z przyłączem równe 5000 zł.

Instalacja c.o. wykorzystuje ogrzewanie podłogowe i niskotemperaturowe grzejniki ściennie do dystrybucji ciepła, a instalacja c.w.u. wyposażona jest w zasobnik wodny. W przypadku analizowanych źródeł ciepła i instalacji przyjęto okres użytkowania 30 lat. Koszty przygotowania c.o. i c.w.u. zależą od zastosowanej technologii wytwarzania ciepła oraz cen energii elektrycznej i paliw. W analizie przyjęto następujące ceny: energii elektrycznej 1,39 zł/kWh; gazu ziemnego 5,3 zł/m³; oleju opałowego 5,7 zł/dm³.

Obliczenia i wyniki analizowanych wariantów

W przypadku każdego z wymienionych wariantów izolacji cieplnej oszacowano koszt wykonania termoizolacji budynku oraz koszt zakupu źródła ciepła. W związku z tym, że każdy z wariantów izolacji cieplnej oraz zastosowanego źródła ciepła miał wpływ na charakterystykę energetyczną budynku, w obliczeniach uwzględniono koszty i emisję CO₂ w fazie eksploatacji budynku. Zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania ciepłej wody użytkowej i ogrzewania budynku bez ocieplenia wynosi 24 000 kWh/r., co odpowiada zapotrzebowaniu na moc cieplną równą 9,8 kW. Na podstawie zastosowanej izolacji cieplnej obliczono zapotrzebowanie na ciepło w budynku, co pozwoliło wyznaczyć ilość energii pierwotnej niezbędnej do zaspokojenia zapotrzebowania na ciepło w budynku. Znając zapotrzebowanie na energię pierwotną, obliczono roczne jej koszty, a na podstawie zapotrzebowania na energię końcową określono emisję CO₂, uitożsamianą na potrzeby prowadzonej analizy ze śladem węglowym podczas eksploatacji budynku.

Do dalszych analiz i wyboru optymalnego wariantu materiałowego obliczono następujące parametry stanowiące kryteria optymalizacji [35, 36]:

- roczny koszt zaspokojenia zapotrzebowania na ciepło w budynku K_r będący ilorazem (wzór 1): sumy zdyskontowanych kosztów wykonania termoizolacji budynku (materiały, robocizna, sprzęt); kosztów zakupu i montażu źródła ciepła, kosztów zużycia energii pierwotnej, tj. paliwa zasilającego źródło ciepła, oraz liczby lat planowanego użytkowania. Stopę dyskontową przyjęto na poziomie 5%;

- roczną wielkość emisji CO₂ wynikającą z zaspokojenia zapotrzebowania na ciepło w budynku E_r będącą sumą (wzór 2): ilorazu emisji CO₂ na etapie produkcji materiału termoizolacyjnego (A1-A3) i materiałów montażowych; rocznej emisji CO₂ w okresie eksploatacji budynku wynikającej z tytułu zużycia energii końcowej do przygotowania ciepła i c.w.u. oraz liczby lat planowanego użytkowania.

$$K_r = \frac{\sum_{t=0}^k \frac{(T_k^t + Z_k^t + E_k^t)}{(1+r)^t}}{k} \quad (1)$$

$$E_r = \sum_{t=0}^k \frac{(T_e^t + E_e^t)}{k} \quad (2)$$

where:

k – number of years of use;

t – the next year of use;

r – discount rate %;

T_k^t – cost of building thermal insulation (materials, labor, equipment) in year t [PLN];

Z_k^t – cost of purchase and installation of heat source in year t PLN;

E_k^t – cost of primary energy consumption, i.e. fuel/electricity supplying the heat source in year t PLN;

T_e^t – emission of CO₂ s at the stage of production of thermal insulation material (A1-A3) and installation materials in year t PLN;

E_e^t – emission of CO₂ over the life of the building resulting from final energy consumption for heat and hot water preparation in year t PLN.

gdzie:

k – liczba lat użytkowania;

t – kolejny rok użytkowania;

r – stopa dyskontowa [%];

T_k^t – koszt wykonania termoizolacji budynku (materiały, robocizna, sprzęt) w roku t [zł];

Z_k^t – koszt zakupu i montażu źródła ciepła w roku t [zł];

E_k^t – koszt zużycia energii pierwotnej, tj. paliwa/energii elektrycznej zasilającego źródło ciepła w roku t [zł];

T_e^t – emisji CO₂ na etapie produkcji materiału termoizolacyjnego (A1-A3) i materiałów montażowych w roku t [zł];

E_e^t – emisji CO₂ w okresie eksploatacji budynku wynikającej z tytułu zużycia energii końcowej do przygotowania ciepła i c.w.u. w roku t [zł].

Table 1 summarizes the cost of thermal insulation depending on the type and thickness of thermal insulation material used, and calculates the carbon footprint values of the A1-A3 product phases of the production of thermal insulation materials in each variant [16, 23 ÷ 25, 35 ÷ 36]. In addition, the table includes the values of the heat transfer coefficient for exterior walls depending on the thickness of thermal insulation. Marked in gray are values that meet the technical conditions of 2021 [13].

In order to select the optimal technological and material variant of the analysed building, the values of K_r and E_r parameters were determined for different variants of thermal insulation of the building both in terms of the material used and the thickness of the insulation layer and the installed heat sources. Table 2 shows the calculated values of energy, emission and cost parameters for the analysed building with a **gas boiler as the heat source**. Based on them, the values of K_r and E_r parameters were calculated for the analysed variants of thermal insulation of the building.

W tabeli 1 zestawiono koszty wykonania termoizolacji w zależności od rodzaju oraz grubości zastosowanego materiału termoizolacyjnego, a także obliczone wartości śladu węglowego faz wyrobu A1-A3 wytworzenia materiałów użytych do termoizolacji w poszczególnych wariantach [16, 23 ÷ 25, 35 ÷ 36]. Ponadto tabela 1 zawiera wartości współczynnika przenikania ciepła ścian zewnętrznych w zależności od grubości izolacji cieplnej. Na szaro zaznaczono wartości, które spełniają warunki techniczne z 2021 r. [13].

W celu wyboru optymalnego wariantu technologiczno-materiałowego analizowanego budynku wyznaczono wartości parametrów K_r i E_r w przypadku różnych wariantów izolacji cieplnej zarówno pod kątem zastosowanego materiału, jak i grubości warstwy ociepleniowej i zainstalowanych źródeł ciepła. W tabeli 2 przedstawiono obliczone wartości parametrów energetycznych, emisyjnych i kosztowych analizowanego budynku z **kotłem gazowym jako źródłem ciepła**. Na ich podstawie obliczono wartości parametrów K_r i E_r w przypadku analizowanych wariantów termoizolacji budynku.

Table 1. Emissions of CO₂ and the cost of thermal insulation for buildings using different materials

Tabela 1. Emisja CO₂ i koszt wykonania termoizolacji budynku z użyciem różnych materiałów

Type of thermal insulation material/ Rodzaj materiału termoizolacyjnego	Thickness insulation [cm]/ Grubość izolacji [cm]	Thermal transmittance of external walls [W/(m ² ·K)]/ Współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych [W/(m ² ·K)]	Emissions of CO ₂ during the production stage of thermal insulation material (A1-A3) [kg/building]/ Emisja CO ₂ na etapie produkcji materiału termoizolacyjnego (A1-A3) [kg/budynek]	Cost of execution thermoinsulation [PLN]/ Koszt wykonania termoizolacji [zł]
None/Brak	0	1,25	0	0
	5	0,42	1 209	21 542
	10	0,25	1 900	23 901
	15	0,18	2 687	26 261
	20	0,14	3 339	28 620
	25	0,12	4 242	38 059
	30	0,10	5 017	40 418
	35	0,09	5 534	42 777
Polistyren EPS/Styropian	5	0,36	959	33 318
	10	0,21	1 645	38 384
	15	0,15	2 330	43 449
	20	0,11	3 015	48 515
	25	0,09	3 838	59 481
	30	0,08	4 523	64 546
	35	0,07	5 345	69 612
	PIR foam/Pianka PIR	5	0,44	510
10		0,27	643	29 348
15		0,19	782	32 372
20		0,15	895	35 396
25		0,12	1 195	45 501
30		0,10	1 320	48 525
35		0,09	1 501	51 549
Mineral wool/Włna mineralna		5	0,44	510
	10	0,27	643	29 348
	15	0,19	782	32 372
	20	0,15	895	35 396
	25	0,12	1 195	45 501
	30	0,10	1 320	48 525
	35	0,09	1 501	51 549

Table 2. Results of cost and emission calculations for different variants of thermal insulation of a building with a gas-fired boiler as heat source
Tabela 2. Wyniki obliczeń kosztów i emisji w przypadku różnych wariantów izolacji cieplnej budynku z zainstalowanym kotłem gazowym jako źródłem ciepła

Type of thermal insulation material/ Rodzaj materiału termoizolacyjnego	Thickness insulation [cm]/ Grubość izolacji [cm]	Amount of primary energy [kWh/year]/Ilość energii pierwotnej [kWh/r.]	Emissions of CO ₂ from fuel combustion [kg/year]/ Emisja CO ₂ ze spalania paliwa [kg/r.]	Cost of purchase and installation of the heat source [PLN]/Koszt zakupu i montażu źródła ciepła [zł]	Cost of primary energy [PLN/year]/ Koszt energii pierwotnej [zł/r.]	K _r [PLN/year]/ K _r [zł/r.]	E _r [PLN/year]/ E _r [kg/r.]
None/Brak	0	25 400	5 612	11 500	13 462	7 730	5 612
Polistyren EPS/ Styropian	5	14 090	3 327		7 468	5 177	3 367
	10	11 841	2 873		6 276	4 605	2 936
	15	10 842	2 671		5 746	4 395	2 761
	20	10 259	2 553		5 437	4 305	2 664
	25	9 877	2 476		5 235	4 509	2 617
	30	9 606	2 421		5 091	4 509	2 588
	35	9 404	2 380		4 984	4 529	2 564
PIR foam/ Pianka PIR	5	13 227	3 153		7 010	5 320	3 185
	10	11 208	2 745		5 940	4 905	2 800
	15	10 336	2 569		5 478	4 821	2 647
	20	9 840	2 468		5 215	4 847	2 569
	25	9 518	2 404		5 045	5 119	2 532
	30	9 293	2 358		4 925	5 223	2 509
Mineral wool/ Wełna mineralna	5	14 310	3 372		7 584	5 400	3 389
	10	12 011	2 907		6 366	4 836	2 928
	15	10 978	2 698		5 818	4 638	2 724
	20	10 374	2 576		5 498	4 564	2 606
	25	9 975	2 496		5 287	4 785	2 536
	30	9 692	2 439		5 137	4 804	2 483
	35	9 480	2 396		5 024	4 844	2 446

The values of calculated K_r costs range from 7,730 PLN/year for the variant without thermal insulation, to 4,509 PLN/year for the variant with thermal insulation made of 25 cm thick EPS boards. In the case of the E_r emission factor, the range of values is from 5,612 kg/yr. for the variant without thermal insulation, to 2,446 kg/yr. for the variant with insulation made of 35 cm thick mineral wool.

Table 3 shows the calculated values of energy, emission and cost parameters for the analysed building with an installed **heat pump as a heat source**. The values of calculated K_r costs range from 8,514 PLN/yr. in the variant without thermal insulation to 4,896 PLN for the variant with thermal insulation made of 20 cm thick EPS boards. As for the E_r emission factor, the range of values is from 9,206 kg/yr. for the variant without thermal insulation, to 3,740 kg/yr. for the variant with insulation made of 35 cm thick mineral wool.

The values of the energy, emission and cost parameters of the analysed building with an **oil boiler as the heat source** were calculated and are shown in Table 4. The values of the calculated K_r costs are in the range from 10,262 PLN /yr. for the variant without thermal insulation to 5,402 PLN for the variant with thermal insulation made of 20 cm thick EPS boards. The value of the emission factor E_r is in the range from 9157 kg/yr. for the variant without thermal insulation, to 3,572 kg/yr. for the variant with insulation made of 35 cm thick mineral wool.

The analyses and the result obtained indicate that:

- making a building's thermal insulation has the lowest costs when using EPS boards as insulation material, and the highest

Wartość obliczonych kosztów K_r waha się od 7 730 zł/r., w przypadku wariantu bez izolacji cieplnej, do 4 509 zł/r. wariantu z izolacją cieplną ze styropianu o grubości 25 cm. W przypadku wskaźnika emisji E_r zakres wartości mieści się w przedziale od 5 612 kg/r. w wariacie bez izolacji cieplnej do 2 446 kg/r. w wariacie z izolacją wykonaną z wełny mineralnej o grubości 35 cm.

W tabeli 3 przedstawione zostały obliczone wartości parametrów energetycznych, emisyjnych i kosztowych w przypadku budynku **z pompą ciepła jako źródłem ciepła**. Wartości obliczonych kosztów K_r wynoszą od 8 514 zł/r. w wariacie bez izolacji cieplnej do 4 896 zł w przypadku wariantu z izolacją cieplną wykonaną ze styropianu o grubości 20 cm. Jeśli chodzi o wskaźnik emisji E_r, to zakres wartości znajduje się w przedziale od 9 206 kg/r. dla wariantu bez izolacji cieplnej do 3 740 kg/r. w przypadku wariantu z izolacją wykonaną z wełny mineralnej o grubości 35 cm.

Wartości parametrów energetycznych, emisyjnych i kosztowych analizowanego budynku **z kotłem olejowym jako źródłem ciepła** zostały obliczone i przedstawione w tabeli 4. Wartości obliczonych kosztów K_r znajdują się w przedziale od 10 262 zł/r. w przypadku wariantu bez izolacji cieplnej do 5 402 zł w przypadku wariantu z izolacją cieplną wykonaną ze styropianu o grubości 20 cm. Wartość wskaźnika emisji E_r mieści się w przedziale od 9 157 kg/r. w wariacie bez izolacji cieplnej, do 3 572 kg/r. w przypadku wariantu z izolacją wykonaną z wełny mineralnej o grubości 35 cm.

Analizy i otrzymane wyniki wskazują, że:

- wykonanie termoizolacji budynku ma najniższe koszty w przypadku wykorzystania styropianu jako materiału izola-

Table 3. Results of cost and emission calculations for different insulation variants for a building with a heat pump as heat source
Tabela 3. Wyniki obliczeń kosztów i emisji w przypadku różnych wariantów izolacji cieplnej budynku z zainstalowaną pompą ciepła jako źródłem ciepła

Type of thermal insulation material/ Rodzaj materiału termoizolacyjnego	Thickness insulation [cm]/Grubość izolacji [cm]	Amount of primary energy [kWh/year]/Ilość energii pierwotnej [kWh/r.]	Emissions of CO ₂ from fuel combustion [kg/year]/Emisja CO ₂ z wytwarzania energii elektrycznej [kg/r.]	Cost of purchase and installation of the heat source [PLN]/Koszt zakupu i montażu źródła ciepła [zł]	Cost of primary energy [PLN/year]/Koszt energii pierwotnej [zł/r.]	K _r [PLN/year]/K _r [zł/r.]	E _r [PLN/year]/E _r [kg/r.]
None/Brak	0	10 344	9 206	20 000	14 378	8 514	9 206
Polistyren EPS/ Styropian	5	5 941	5 287	18 500	8 258	5 842	5 327
	10	5 065	4 508		7 040	5 256	4 571
	15	4 676	4 162	17 000	6 500	4 989	4 252
	20	4 449	3 960		6 184	4 896	4 071
	25	4 300	3 827		5 977	5 097	3 968
	30	4 195	3 733		5 831	5 096	3 900
35	4 116	3 663	5 721	5 115	3 847		
PIR foam/ Pianka PIR	5	5 604	4 988	18 500	7 790	5 978	5 020
	10	4 818	4 288	17 000	6 697	5 501	4 343
	15	4 479	3 986		6 226	5 413	4 064
	20	4 286	3 814		5 958	5 435	3 915
	25	4 161	3 703		5 784	5 706	3 831
	30	4 073	3 625		5 661	5 808	3 776
35	4 008	3 567	5 571		5 928	3 745	
Mineral wool/ Włna mineralna	5	6 026	5 363	18 500	8 376	6 065	5 380
	10	5 131	4 567	17 000	7 132	5 487	4 588
	15	4 729	4 209		6 573	5 233	4 235
	20	4 494	3 999		6 247	5 156	4 029
	25	4 338	3 861		6 030	5 374	3 901
	30	4 228	3 763		5 877	5 391	3 807
35	4 146	3 690	5 763		5 430	3 740	

when using PIR foam. The cost difference between the two technologies ranges from 54.5% to 69.5%, depending on the thickness of the insulation used, which is 5 cm and 20 cm, respectively;

- the performance of building thermal insulation using mineral wool has the lowest carbon footprint, while the largest carbon footprint is caused by thermal insulation made with EPS boards. The difference in carbon footprint between the two technologies ranges from 137% to 280%, depending on the thickness of the insulation used, which is 5 cm and 30 cm, respectively;

- for all of the analysed heat sources and each thickness of insulation, the lowest cost K_r is characterized by thermal insulation made of EPS boards (marked in purple in Tables 2, 3 and 4);

- taking into account the E_r emission rate of a building with a gas boiler installed as a heat source, the most favorable thermal insulation variant is PIR foam for insulation thicknesses of 5, 10, 15, 20 and 25 cm (which is marked in orange in Table 2). When the thickness of insulation is 30 and 35 cm, the E_r emission rate has the lowest value in the variant with thermal insulation made of mineral wool, which is marked in green in Table 2);

- taking into account the E_r emission rate of a building with an installed heat pump or oil boiler as heat sources, the most favorable thermal insulation variant is PIR foam with a thickness of 5 to 30 cm (marked in orange in Tables 3 and 4). When the thickness of insulation is 35 cm, the E_r emission rate has the lowest value in the variant with thermal

cyjnego, a najwyższe w przypadku użycia pianki PIR. Różnica kosztów pomiędzy tymi dwoma technologiami wynosi od 54,5% do 69,5% w zależności od grubości użytej izolacji wynoszącej odpowiednio 5 i 20 cm;

- wykonanie termoizolacji budynku z wykorzystaniem wełny mineralnej charakteryzuje się najmniejszym śladem węglowym, a największy ślad węglowy powoduje izolacja cieplna wykonana z użyciem płyt styropianowych. Różnica w śladzie węglowym pomiędzy tymi dwoma technologiami wynosi od 137% do 280% w zależności od grubości zastosowanej izolacji wynoszącej odpowiednio 5 cm i 30 cm;

- w przypadku wszystkich analizowanych źródeł ciepła i każdej grubości izolacji, najmniejszym kosztem K_r charakteryzuje się izolacja cieplna wykonana ze styropianu (zaznaczono kolorem fioletowym w tabelach 2, 3 i 4);

- biorąc pod uwagę wskaźnik emisji E_r budynku, z zainstalowanym kotłem gazowym jako źródłem ciepła, najkorzystniejszym wariantem termoizolacji jest pianka PIR o grubości 5, 10, 15, 20 i 25 cm (zaznaczono kolorem pomarańczowym w tabeli 2). W przypadku, gdy grubość izolacji wynosi 30 i 35 cm, wskaźnik emisji E_r ma najmniejszą wartość w wariantcie z izolacją cieplną wykonaną z wełny mineralnej (zaznaczono kolorem zielonym w tabeli 2);

- biorąc pod uwagę wskaźnik emisji E_r budynku z zainstalowaną pompą ciepła lub kotłem olejowym, jako źródłami ciepła, najkorzystniejszym wariantem termoizolacji jest pianka PIR o grubości od 5 do 30 cm (zaznaczono kolorem pomarańczowym w tabeli 3 i 4). W przypadku, gdy grubość izolacji wynosi 35 cm, wskaźnik emisji E_r ma najmniejszą wartość w wa-

Table 4. Results of cost and emission calculations for different thermal insulation variants for a building with an oil boiler as heat source
 Tabela 4. Wyniki obliczeń kosztów i emisji w przypadku różnych wariantów izolacji cieplnej budynku z zainstalowanym kotłem olejowym jako źródłem ciepła

Type of thermal insulation material/Rodzaj materiału termoizolacyjnego	Thickness insulation [cm]/Grubość izolacji [cm]	Amount of primary energy [kWh/year]/Ilość energii pierwotnej [kWh/r.]	Emissions of CO ₂ from fuel combustion [kg/year]/Emisja CO ₂ ze spalania paliwa [kg/r.]	Cost of purchase and installation of the heat source [PLN]/Koszt zakupu i montażu źródła ciepła [zł]	Cost of primary energy [PLN/year]/Koszt energii pierwotnej [zł/r.]	K _r [PLN/year]/K _r [zł/r.]	E _r [PLN/year]/E _r [kg/r.]
None/Brak	0	32 784	9 157	24 000	17 338	10 262	9 157
Polistyren EPS/Styropian	5	17 736	5 154		9 380	6 637	5 194
	10	14 744	4 358		7 798	5 852	4 421
	15	13 414	4 004		7 094	5 547	4 094
	20	12 639	3 798		6 684	5 402	3 909
	25	12 130	3 663		6 415	5 570	3 804
	30	11 770	3 567		6 225	5 544	3 734
	35	11 501	3 495		6 082	5 545	3 679
PIR foam/Pianka PIR	5	16 587	4 848		8 772	6 698	4 880
	10	13 901	4 134		7 352	6 092	4 189
	15	12 741	3 825		6 738	5 926	3 903
	20	12 081	3 650		6 389	5 904	3 751
	25	11 653	3 536		6 163	6 146	3 664
	30	11 354	3 456		6 005	6 229	3 607
	35	11 132	3 397		5 887	6 333	3 575
Mineral wool/Welna mineralna	5	18 029	5 232		9 535	6 881	5 249
	10	14 969	4 418		7 917	6 099	4 439
	15	13 595	4 052		7 190	5 803	4 078
	20	12 791	3 839		6 765	5 672	3 869
	25	12 261	3 698		6 484	5 856	3 738
	30	11 884	3 597		6 285	5 848	3 641
	35	11 603	3 522	6 136	5 867	3 572	

insulation made of mineral wool (green color in Table 3 and 4);

■ from the point of view of the cost K_r, the optimal variant is thermal insulation made of EPS with a thickness of 20 cm, and this applies to all analysed heat sources (gas boiler: K_r = 4 305 PLN; heat pump: K_r = 4,896 PLN; oil boiler: K_r = 5,402 PLN);

■ from the point of view of the emission factor E_r, the optimal thermal insulation variant for all heat source variants is 35 cm thick mineral wool insulation (gas boiler: E_r = 2,446 kg; heat pump: E_r = 3,740 kg; oil boiler: E_r = 3,572 kg);

■ in the case of the K_r criterion, the most favorable solution is to use 20 cm thick EPS boards as thermal insulation and together with a gas boiler as a heat source, and from the point of view of E_r emissions, it is optimal to use 35 cm thick mineral wool as thermal insulation also with a gas boiler as a heat source.

Summary

The comparative analysis of the carbon footprint showed variation between the technological and material solutions considered. For the K_r criterion, the optimal solution is the use of EPS boards, and from the point of view of the E_r criterion, mineral wool at each of the analysed heat sources. The most favorable values are achieved in a building equipped with a gas boiler as a heat source. The most popular technology of thermal insulation in Poland using EPS boards

z izolacją cieplną wykonaną z wełny mineralnej (kolor zielony w tabeli 3 i 4);

■ z punktu widzenia kosztu K_r, optymalnym wariantem jest izolacja cieplna wykonana ze styropianu o grubości 20 cm i dotyczy to wszystkich analizowanych źródeł ciepła (kocioł gazowy: K_r = 4 305 zł; pompa ciepła: K_r = 4 896 zł; kocioł olejowy: K_r = 5 402 zł);

■ z punktu widzenia wskaźnika emisji E_r optymalnym wariantem izolacji cieplnej w przypadku wszystkich wariantów źródła ciepła jest izolacja wykonana z wełny mineralnej o grubości 35 cm (kocioł gazowy: E_r = 2 446 kg; pompa ciepła: E_r = 3 740 kg; kocioł olejowy: E_r = 3 572 kg);

■ w przypadku kryterium K_r, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie styropianu o grubości 20 cm jako izolacji cieplnej i kotła gazowego jako źródła ciepła, a z punktu widzenia emisji E_r optymalne jest zastosowanie wełny mineralnej o grubości 35 cm jako termoizolacji również z kotłem gazowym jako źródłem ciepła.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy porównawcze śladu węglowego wykazały różnicowanie pomiędzy rozpatrywanymi rozwiązaniami technologiczno-materiałowymi. W przypadku kryterium K_r, optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie styropianu, a z punktu widzenia kryterium E_r wełny mineralnej przy każdym z analizowanych źródeł ciepła. Najkorzystniejsze wartości osiąga się w budynku wyposażonym w kocioł gazowy jako źródłem ciepła. Najpopularniejsza w Polsce technologia wykonywania

is not the optimal solution from the point of view of emissions (E_r criterion), but the difference with the most favorable solution is not small – from 2.7% (in the case of a heat pump as a heat source) to 6.1% (in the case of an oil boiler). The results obtained strictly depend on the data adopted in the analysis.

Received: 02.09.2024

Revised: 14.10.2024

Published: 20.12.2024

izolacji cieplnej z zastosowaniem płyt styropianowych nie jest rozwiązaniem optymalnym z punktu widzenia emisji (kryterium E_r), ale różnica w porównaniu z najkorzystniejszym rozwiązaniem jest nieduża – od 2,7% (w przypadku pompy ciepła jako źródłem ciepła) do 6,1% (w przypadku kotła olejowego). Otrzyma-
ne wyniki ściśle zależą od danych przyjętych w analizie.

Artykuł wpłynął do redakcji: 02.09.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.10.2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

Literature

[1] Zeroemisyjna Polska 2050, Raport WWF Polska, Warszawa, 2020.

[2] Ala-Juusela M, Rehman HU, Hukkalinainen M, Reda F. Positive energy building definition with the framework, elements and challenges of the concept. *Energies*. 2021. DOI: 10.3390/en14196260.

[3] Paślawski J, Szaśniak J, Rzeczkowska K. Izolacyjność termiczna materiałów termoizolacyjnych w kontekście budownictwa dodatnio energetycznego. *Materiały Budowlane*. 2023. DOI: 10.15199/33.2023.01.

[4] IEA – Międzynarodowa Agencja Energetyczna <https://www.iea.org/topics/buildings>.

[5] Tupenaite L, Zavadskas EK, Kaklauskas A, Turskis Z, Seniut M. Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation. *J. Civ. Eng. Manag.* 2010. DOI: 10.3846/jcem.2010.30.

[6] Fedorczak-Cisak M, Leśniak A, Markiewicz-Zahorski P, Węglarz A. Analiza wpływu rozwiązań materiałowych przegród zewnętrznych budynków nZEB na poziom emisji CO₂. *Przegląd Budowlany*. 2021; 11 – 12: 94 – 97.

[7] Madhumathi A, Sundararaja MC, Shanthipriya R. A comparative study of the thermal comfort of different building materials in madurai. https://www.researchgate.net/publication/288363877_A_comparative_study_of_the_thermal_comfort_of_different_building_materials_in_madurai. [12.05.2021].

[8] De Lieto Vollaro R, Guattari C, Evangelisti L, Battista G, Carnielo E, Gori P. Building energy performance analysis: A case study. *Energy Build.* 2015; tom 87, 1/2015: 87 – 94

[9] Pisello AL, Castaldo VL, Pignatta G, Cotana F, Santamouris M. Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation. *Energy Build.* 2016; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.026>.

[10] Wojtczak E. Budownictwo ogólne w ujęciu tradycyjnym, Wyd. Politechnika Gdańska, Gdańsk: 2019.

[11] Główny Urząd Statystyczny <https://stat.gov.pl> [12.05.2021].

[12] Ustawa z 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. z 2021 r. poz. 2351, z późn. zm.).

[13] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. nr 75, poz. 690, z późn. zm.).

[14] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.

[15] Firląg S. Kompleksowa termomodernizacja budynków jednorodzinnych: praca zbiorowa, Wydawca Warszawa: Fundacja Ziemia i Ludzie, 2019.

[16] BISTYP Informacyjny cennik materiałów budowlanych, stawek robocizny kosztorysowej i najmu sprzętu – III kwartał 2024 r., Wyd. Wolters Kluwer Polska.

[17] PN-EN ISO 14020:2003 Etykiety i deklaracje środowiskowe – Zasady ogólne.

[18] PN-EN ISO 14025:2010 Etykiety i deklaracje środowiskowe – Deklaracje środowiskowe III typu Zasady i procedury.

[19] PN-EN 15804+A2:2020 Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu. Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.

[20] PN-EN 15804+A2:2020-03 Zrównoważenie obiektów budowlanych. Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych.

[21] Ustawa z 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych (Dz. U. 2004 nr 92 poz. 881).

[22] PN-EN 15978: 2012 Zrównoważone obiekty budowlane. Ocena środowiskowych właściwości użytkowych budynków. Metoda obliczania.

[23] Wskaźnik GWP izolacji budowlanych PAROC: <https://pl.p-aroc.com/co2-calculator> [10.05.2024].

[24] Deklaracja Środowiskowa dotycząca śladu węglowego płyt izolacyjnych termPIR Gór-Stal: <https://termpir.eu/do-pobrania/dokumenty/ślad-węglowy> [10.05.2024].

[25] Deklaracja środowiskowa wyrobów budowlanych TERMO ORGANIKA: <https://termoorganika.pl/produkt/termonium-fasada> [10.05.2024].

[26] Zamorowska R, Sieczkowski J. WTWiORB, część C. Zabezpieczenia i izolacje zeszyt 8. Zabezpieczenia i izolacje. Złożone systemy ocieplania ścian zewnętrznych budynków (ETICS) z zastosowaniem styropianu lub wełny mineralnej i wypraw tynkarskich. ITB, Warszawa 2023.

[27] Szacowanie śladu węglowego budynków. Mapa drogowa dekarbonizacji budownictwa do roku 2050 – Raport.

[28] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 16 sierpnia 1999 r. w sprawie warunków technicznych użytkowania budynków mieszkalnych (Dz.U. z 1999 r. nr 74 poz. 836).

[29] PN-EN ISO 13788:2013-05 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej – Metody obliczania.

[30] PN-EN 13163+A2:2016-12 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby ze styropianu (EPS) produkowane fabrycznie. Specyfikacja.

[31] PN-EN 13165+A2:2016-08 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby ze sztywnej pianki poliuretanowej (PU) produkowane fabrycznie. Specyfikacja.

[32] PN-EN 13162+A1:2015-04 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby z wełny mineralnej (MW) produkowane fabrycznie. Specyfikacja.

[33] Popczyk J. Bezspoinowy system ocieplania ścian zewnętrznych budynków, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2014 (seria: Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. Część C. Zabezpieczenia i izolacje. Zeszyt 8).

[34] Bartoszek M. Źródła ciepła i termomodernizacja budynku mieszkalnego. KaBe, 2021.

[35] Polityki wdrażania przepisów w zakresie śladu węglowego w całym cyklu życia budynków w krajach UE-27 mające na celu obniżenie wbudowanej emisji dwutlenku węgla w nowych budynkach (ang. „Whole life carbon models for the EU27 to bring down embodied carbon emissions from new buildings”). Ramboll i Uniwersytet KU Leuven, 2022.

[36] EN 15459-1:2017 Energy performance of buildings – Economic evaluation procedure for energy systems in buildings.