

Received: Jun 30, 2025; Received in revised form: July 4, 2025; Accepted: November 13, 2025

Citation: Gawęł, D., Guz, Ł., Jakubiak, N., (2025). Evaluation of Thermal Retrofit Variants for Facades in High-Rise Large-Panel Residential Buildings: Impact on Energy Demand Using the BESM Model/ Ocena modernizacji termicznej fasad wysokich wielkopłytych budynków mieszkalnych. Wpływ na zapotrzebowanie energetyczne przy użyciu Modelu Symulacji Energetycznej Budynku (BESM). Środowisko Mieszkaniowe/ Housing Environment, e2025030. <https://doi.org/10.2478/he-2025-0030>

DARIUSZ GAWĘŁ*, ŁUKASZ GUZ**, NATALIA JAKUBIAK***

Evaluation of Thermal Retrofit Variants for Facades in High-Rise Large-Panel Residential Buildings: Impact on Energy Demand Using the BESM Model

Ocena modernizacji termicznej fasad wysokich wielkopłytych budynków mieszkalnych. Wpływ na zapotrzebowanie energetyczne przy użyciu Modelu Symulacji Energetycznej Budynku (BESM)

Streszczenie

W artykule przeanalizowano skuteczność powtórnej termomodernizacji budynków wysokich wykonanych w technologii wielkopłytywowej oraz opracowano model oceny efektywności metod modernizacji i estetyzacji fasad, ze szczególnym uwzględnieniem efektu energetycznego. Analizie poddano trzy warianty modernizacji: zwiększenie przeszkleń balkonów, obudowę balkonów fasadą aluminiową oraz pełną fasadę szklaną. Obliczenia, wykonane w programie Audytor Sankom na podstawie audytu energetycznego i pomiarów *in-situ*, uwzględniały współczynnik U [$W/(m^2 \cdot K)$], roczne zapotrzebowanie na energię EHV [$kWh/m^2 \cdot rok$], koszt C [$€/m^2$] oraz ślad węglowy eCO_2 [$kgCO_2/(m^2 \cdot rok)$]. Wyniki wykazały, że wariant drugi (V2) pozwala na największą redukcję zużycia energii (32,1%), podczas gdy wariant pierwszy (V1) osiąga najlepszą izolacyjność ($U = 0,149 W/(m^2 \cdot K)$) i najwyższy wskaźnik BESM (1,109). Mimo wyższego kosztu (155 €/m²), V2 znacząco poprawia efektywność energetyczną oraz estetykę budynku. Optymalizacja metod termomodernizacji stanowi kluczowy element dostosowania budynków wielkopłytych do współczesnych standardów i poprawy jakości życia.

Abstract

This article examines the effectiveness of secondary thermal retrofitting in high-rise buildings constructed using large-panel technology and presents a model for evaluating the efficiency of facade modernisation and aesthetic enhancement methods, with particular emphasis on their energy performance. Three retrofit variants were analysed: increased glazing of balconies, aluminium-clad balcony facades, and a fully glazed facade. Calculations were performed using Audytor software by Sankom, based on an energy audit and *in-situ* measurements, taking into account the U -value [$W/(m^2 \cdot K)$], annual energy demand EHV [$kWh/m^2 \cdot year$], cost C [$€/m^2$], and carbon footprint eCO_2 [$kgCO_2/(m^2 \cdot year)$]. The results show that Variant 2 (V2) achieves the greatest energy consumption reduction (32.1%), while Variant 1 (V1) provides the best insulation performance ($U = 0.149 W/(m^2 \cdot K)$) and the highest BESM index (1.109). Despite its higher cost (155 €/m²), V2 significantly improves both the building's energy efficiency and aesthetics. Optimising thermal retrofit methods is a key factor in adapting large-panel buildings to contemporary standards and enhancing residents' quality of life.

Słowa kluczowe: BESM, symulacja energetyczna, efektywność energetyczna, termomodernizacja, budownictwo wielkopłytowe, budynek wysoki, budynki mieszkalne, fasada
Keywords: BESM, energy simulation, energy efficiency, thermal retrofit, large-panel construction, high-rise building, residential buildings, facade

*Dariusz GAWĘŁ, dr inż. arch., Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska / Dariusz GAWĘŁ, PhD Eng. Arch., Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, <https://orcid.org/0000-0001-5759-1962>, e-mail: d.gawel@pollub.pl

**Łukasz GUZ, dr inż., Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Lubelska / Łukasz GUZ, PhD Eng., Faculty of Environmental Engineering and Energy, Lublin University of Technology, <https://orcid.org/0000-0002-5024-4738>, e-mail: l.guz@pollub.pl

***Natalia JAKUBIAK, mgr inż. arch., Szkoła Doktorska w Politechnice Lubelskiej, Politechnika Lubelska / Natalia JAKUBIAK, MSc Eng. Arch., Lublin University of Technology Doctoral School, Lublin University of Technology, <https://orcid.org/0009-0009-4273-5666>, e-mail: natalia.jakubiak@pollub.edu.pl

Copyright: © 2025 Gawęł, Guz, Jakubiak. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Most frequently used symbols:

BESM – Building Energy Simulation Model, pol: model symulacji energetycznej budynku,
BRI – Building Research Institute in Poland, pol: Instytut Badawczy Budownictwa w Polsce,
ETICS – External Thermal Insulation Composite System, pol: zewnętrzny złożony system izolacji cieplnej,
LPB – Large-Panels Building, pol: budynek wielkopłytkowy,
SC – Seamless Coating, pol: bezspoinowa powłoka,
TR – Thermal Retrofits, pol: termomodernizacja.

WSTĘP

Postępujące cywilizacyjne zmiany środowiskowe wymuszają wdrażanie strategii poprawy efektywności energetycznej oraz dostosowania warunków życia do nowych wyzwań (Aaheim, Rive, 2005). Współczesne podejście do gospodarki energetycznej koncentruje się na zrównoważonym użytkowaniu zasobów¹ (European Commission, 2019; European Union, 2020), co staje się kluczowym zadaniem dla właścicieli nieruchomości, zarządców budynków oraz prawodawców (Rada Ministrów, 2022).

Od lat 60. XX w. w Polsce powstało wiele budynków wielorodzinnych w technologii prefabrykowanej, mającej na celu szybkie zbilansowanie między popytem a podażą mieszkańców. Typizacja i unifikacja elementów budynków umożliwiała szybkie wznoszenie bez skomplikowanej dokumentacji projektowej zespołów budynków, dużych osiedli, a nawet całych miast (Szulc, 2019, s. 21-26). W latach 70-80. XX w. udział tej technologii w budownictwie mieszkaniowym wielorodzinnym wynosił w niektórych miastach 40,5%, a obecnie szacuje się, że budynki prefabrykowane to około 20% zasobu mieszkaniowego, z czego budynki wysokie i wysokościone stanowią co piąty z nich (Zańko-Gulczyński, 2019).

Systemy budownictwa prefabrykowanego były energochłonne (Radziszewska-Zielina, Gleń, 2014, s. 13-26), poczynając od produkcji elementów, przez budowę, eksploatację, aż po remonty i modernizację. Mieszkania w tych budynkach nie cieszą się dużą popularnością na rynku nieruchomości, gdyż uznawane są za przestarzałe, nie spełniające norm technicznych i pozbawione elastyczności w aranżacji (Radziejowska, Sobotka, 2021, s. 93-108). Właściciele i zarządcy poszukują metod, które poprawią atrakcyjność tych obiektów, skupiając się na trzech głównych celach:

- poprawie izolacyjności poprzez odpowiedni wybór materiałów,
- zwiększeniu estetyki w celu podniesienia wartości nieruchomości,
- dostosowaniu do przepisów przeciwpożarowych, co zwiększa bezpieczeństwo użytkowania.

W artykule podjęto problematykę badawczą wyboru odpowiednich metod oraz oceny docieplenia wysokich budynków mieszkalnych wielkopłytkowych w kontekście zmieniających się przepisów prawa budowlanego. Pierwsze docieplenia budynków wielorodzinnych w Polsce miały miejsce w 1982 roku, z zastrzeżeniem jako obiekty doświadczalne. Na szeroką skalę technologia bezspoinowa, w tym metoda ETICS, została wprowadzona dopiero w latach 90. Od tego czasu zarówno technologie, jak i materiały stosowane do dociepleń uległy znaczącym zmianom (Stazi, Di Perna, Munafò, 2009, s. 721-731).

Metoda ETICS jest najpopularniejszym i jednocześnie najtańszym sposobem docieplania ścian zewnętrznych budynków w Polsce. Szacuje się, że technologia ta stanowi około 60% wszystkich prac termomodernizacyjnych w kraju. Kluczowym atutem tej metody jest jednoczesne osiągnięcie oszczędności energetycznych oraz

Most frequently used symbols:

BESM – Building Energy Simulation Model, pol: model symulacji energetycznej budynku,
BRI – Building Research Institute in Poland, pol: Instytut Badawczy Budownictwa w Polsce,
ETICS – External Thermal Insulation Composite System, pol: zewnętrzny złożony system izolacji cieplnej,
LPB – Large-Panels Building, pol: budynek wielkopłytkowy,
SC – Seamless Coating, pol: bezspoinowa powłoka,
TR – Thermal Retrofits, pol: termomodernizacja.

INTRODUCTION

Ongoing environmental changes driven by global civilisation necessitate the implementation of strategies aimed at improving energy efficiency and adapting living conditions to emerging challenges (Aaheim, Rive, 2005). Contemporary approaches to energy management focus on the sustainable use of resources (European Commission, 2019; European Union, 2020), which has become a key responsibility for property owners, building managers, and policymakers (Rada Ministrów, 2022).

Since the 1960s, a large number of multi-family residential buildings have been constructed in Poland using prefabrication technology, intended to rapidly balance the demand and supply of housing. The standardisation and unification of building components enabled the fast erection of entire building complexes, large housing estates, and even whole cities, without the need for complex design documentation (Szulc, 2019, pp. 21–26). In the 1970s and 80s, this construction method accounted for up to 40.5% of multi-family housing in some cities. Today, it is estimated that prefabricated buildings constitute around 20% of the country's housing stock, with high-rise and tall buildings making up approximately one in five of them (Zańko-Gulczyński, 2019).

Prefabricated construction systems were energy-intensive (Radziszewska-Zielina, Gleń, 2014, pp. 13–26), starting from the production of components, through the construction phase, operation, and eventually renovation and modernisation. Flats in these buildings are not particularly popular on the real estate market, as they are considered outdated, non-compliant with current technical standards, and lacking in spatial flexibility (Radziejowska, Sobotka, 2021, pp. 93–108). Property owners and building managers seek solutions to improve the attractiveness of these structures, focusing on three main objectives:

- improving thermal insulation by selecting appropriate materials,
- enhancing the aesthetic quality to increase property value,
- complying with fire safety regulations to improve user safety.

This article addresses the research problem of selecting appropriate methods and evaluating the thermal insulation of high-rise large-panel residential buildings in the context of evolving building regulations. The first thermal insulation of multi-family buildings in Poland took place in 1982, initially as experimental projects. It was not until the 1990s that seamless insulation technologies, including the ETICS method, were widely implemented. Since then, both the technologies and materials used for insulation have undergone significant changes (Stazi, Di Perna, Munafò, 2009, pp. 721–731).

The ETICS method is the most popular and, at the same time, the most cost-effective approach to insulating external building walls in Poland. It is estimated that this technology accounts for approximately 60% of all thermal retrofit work carried out in the country. One of its key advantages is the

poprawa estetyki elewacji budynku. Trwałość systemów izolacyjnych, zgodnie z deklaracjami producentów, wynosi około 20-30 lat, wtedy też materiały nie powinny tracić swoich właściwości (Landolfi, Nicolella, 2022).

CHARAKTERYSTYKA METODY ETICS W PRACACH TERMO-MODERNIZACYJNYCH OBIEKTÓW Z WIELKIEJ PŁYTY

Dobór metody termomodernizacji zależy przede wszystkim od oczekiwanej efektywności energetycznej, a w mniejszym stopniu od korzyści ekonomicznych i estetycznych. Ostateczna decyzja o wyborze odpowiedniej metody powinna być wynikiem kompromisu, który uwzględniony został w badaniach BESM. Obecnie kierunki modernizacji technologii wielkopłytywowej opierają się na ocenie bezpieczeństwa konstrukcji oraz oczekiwań społecznych mieszkańców. Ocena postępowania kwalifikacyjnego wymaga zarówno wiedzy technicznej, jak i analizy końcowych efektów prac (Nowogórska, Mielczarek, 2021). Autorzy artykułu dostrzegli potrzebę oceny modelu teoretycznego zmiany sposobu modernizacji budynków, uwzględniającej konieczność dostosowania technologii do wymogów prawnych (Minister Infrastruktury, 2002). Od pierwszych dociepleń metodą ETICS minęło już ponad 30 lat. Zarządcy nieruchomościami muszą podjąć działania na rzecz poprawy efektywności energetycznej budynków. Prefabrykowane obiekty osiągają wiek 40-50 lat, co wymaga decyzji dotyczących ich modernizacji, w tym poprawę efektywności energetycznej. Z badań Instytutu Badawczego Budownictwa wynika, że nie ma obawy o obniżenie wytrzymałości konstrukcyjnej tych budynków, choć nadal ważne są regularne przeglądy techniczne zgodne z obowiązującymi przepisami. Pozytywne przykłady modernizacji bloków z wielkiej płyty, które przeprowadzono w ostatnich latach we Francji, Holandii, Niemczech czy Skandynawii, pokazują, że w Europie pojawiają się podobne wyzwania związane z rewitalizacją całych kompleksów tych budynków. Skupiają się one na humanizacji i dostosowaniu do współczesnych standardów (Malazdrewicz, Ostrowski, Sadowski, 2022; Czado, 2012; Hariasz, 2020). Prace adaptacyjne obejmują głównie przebudowę segmentów, przemurowanie otworów okiennych, dobudowę samonośnych konstrukcji balkonów oraz

ability to achieve both energy savings and an improved facade appearance. According to manufacturers' declarations, the durability of insulation systems is estimated at around 20 to 30 years, during which the materials are expected to retain their performance properties (Landolfi, Nicolella, 2022).

CHARACTERISTICS OF THE ETICS METHOD IN THE THERMAL RETROFITTING OF LARGE-PANEL BUILDINGS

The choice of thermal retrofit method depends primarily on the expected level of energy efficiency, and to a lesser extent on economic and aesthetic benefits. The final decision on the appropriate approach should be the result of a balanced compromise, which has been reflected in the BESM analysis. Current approaches to the modernisation of large-panel technology are based on assessments of structural safety as well as the social expectations of residents. The qualification process requires not only technical expertise but also an evaluation of the final outcomes of the renovation work (Nowogórska, Mielczarek, 2021). The authors of this article identified the need to evaluate a theoretical model for changing the approach to building modernisation, taking into account the necessity of adapting technologies to current legal requirements (Minister Infrastruktury, 2002). More than 30 years have passed since the first applications of the ETICS method in Poland. Property managers must now take action to improve the energy efficiency of buildings. Prefabricated structures are reaching 40 to 50 years of age, which calls for decisions regarding their modernisation, including enhancements in energy performance. According to research by the Building Research Institute, there is no concern regarding the structural durability of these buildings, however, regular technical inspections in accordance with applicable regulations remain essential. Positive examples of large-panel housing estate modernisations carried out in recent years in France, the Netherlands, Germany and the Nordic countries demonstrate that similar challenges related to the revitalisation of entire building complexes are emerging across Europe. These efforts focus

Tabela 1. Charakterystyka materiałów stosowanych do izolacji fasad metodą ETICS. Opracowanie: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak

Table 1. Characteristics of materials used for facade insulation with the ETICS method. Compiled by: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak

Nr/ No.	Cecha zastosowanego materiału/ Property of the insulation material	Izolacja zewnętrzna/ External insulation	
		styropian/ expanded polystyrene	wełna mineralna/ mineral wool
1	mocowanie izolacji do fasady/ Fixing of insulation to facade	klejenie i kołkowanie/ adhesive bonding and mechanical fixing	klejenie i kołkowanie/ adhesive bonding and mechanical fixing
2	odporność na działanie mikroorganizmów/ Resistance to microorganisms	dobra/ good	bardzo dobra/ very good
3	naturalny proces starzenie się / Natural ageing process	ograniczona/ limited	dobra/ good
4	oddziaływanie na zdrowie człowieka/ Impact on human health	brak/ none	brak/ none
5	odporność na działanie substancji chemicznych/ Resistance to chemical substances	brak/ none	bez ograniczeń/ no limitations
6	ograniczenia przeciwpożarowe na fasadach/ Fire safety limitations on facades	na budynkach do 25m / up to 25 m building height	bez ograniczeń/ no limitations
7	średni ciężar 1,0 m ² warstwy 10cm izolacji/ Average weight of 10 cm thick 1.0 m ² layer	10-20 kg	20-35 kg
8	przepuszczalność powietrza/ Air permeability	brak/ none	bardzo dobra/ very good
9	średni okres stosowania na fasadzie budynku/ Average service life on building facade	20-25 lat/ years	25-30 lat/ years
10	wyprawa tynkarska na powierzchni/ Surface finishing (plaster)	akryl, silikon, silikat mineralny/ acrylic, silicone, mineral silicate	silikon, silikat mineralny/ silicone, mineral silicate

zastosowanie nowoczesnych technologii, takich jak gotowe systemy obudowy fasadowej (Schabowicz, 2018).

Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na opracowanie narzędzi badawczych była konieczność dostosowania metod budowlanych do obowiązujących przepisów, szczególnie dotyczących doboru materiałów ocieplających. Jedną z najczęściej stosowanych metod termomodernizacji jest metoda ETICS polegająca na trwałym montażu do ściany zewnętrznej warstw izolacji, najczęściej styropianu lub wełny, za pomocą kołków lub kleju oraz pokrycie jej warstwą ochronną i dekoracyjną. Dotychczas w metodzie ETICS w ponad 90% przypadków wykorzystywano styropian. Obecne przepisy przeciwpożarowe dopuszczają stosowanie styropianu w budynkach wysokich i wysokościowych, ale tylko do określonej wysokości, nieobejmującej całego obiektu. W związku z tym jedynym dopuszczonym materiałem w tej metodzie jest wełna mineralna. Zmiana ta wiąże się z pewnymi korzyściami, ale również wpływa na wzrost kosztów prac remontowych, co ma swoje konsekwencje ekonomiczne (Gorszkov, Orłowicz, 2016). Różnice w efektach energetycznych dla różnych typów obudowy fasadowej skłaniają do analizy technologii dociepleniowych pod kątem używanych materiałów izolacyjnych (Li, Chen, 2020; Michalak, Czernik, Marcinek i in., 2020).

Istotnym czynnikiem wpływającym na stan wyprawy zewnętrznej jest orientacja budynku względem stron świata. Ocena efektywności metod ETICS, zarówno pod względem termoizolacyjnym, technicznym, jak i estetycznym, jest istotna z punktu widzenia ekonomicznego producentów i wykonawców. Zmiany na powierzchni materiałów nie wpływają na ich fizyczne właściwości, jednak długotrwałe użytkowanie izolacji na fasadach może wpłynąć na strukturę materiałów renowacyjnych. Badania nad materiałami poprawiającymi właściwości powierzchniowe, takie jak twardość, zwartość, porowatość czy połysk, pokazują, że istnieją sposoby na zmniejszenie tego wpływu. Zastosowanie odpowiednich produktów pozwala na modyfikację właściwości powierzchniowych, poprawiając jej samooczyszczanie, hydrofobowość oraz estetykę, co wpływa na trwałość systemu ETICS (Barreira, de Freitas, 2013, s. 31-39).

Dopuszczenie metody ETICS do powszechnego użytku wymagało przeprowadzenia badań i certyfikacji w wielu krajach europejskich. Okazuje się, że często metoda ta posiada stosunkowo niewielką liczbę ocen technicznych (np. Europejska Ocena Techniczna, Jednostka Oceny Technicznej), co może wynikać z ograniczonej liczby badań dopuszczających ją na dany rynek. W tej kwestii zdecydowanie najlepiej prezentują się kraje Europy Środkowej. Współcześnie najważniejsza staje się ocena wpływu metody ETICS na środowisko (Michalak, 2021).

METODYKA BADAŃ

W artykule przeanalizowano skuteczność powtórnej termomodernizacji wysokich budynków wykonanych w technologii wielkopłytkowej. Studium przypadku obejmuje ocenę wielowariantowej termorenowacji obiektu zgodnie ze zmieniającymi się przepisami energetycznymi i przeciwpożarowymi. Badania skoncentrowano na stworzeniu teoretycznego modelu oceny efektywności różnych metod ponownej termomodernizacji i remontu elewacji w kontekście aktualnych regulacji prawnych oraz wymagań energetycznych i przeciwpożarowych.

W pracy przedstawiono model BESM jako metodę analizy i oceny różnych wariantów termomodernizacji budynków. Metoda ta nie wymaga skomplikowanych działań oraz wprowadzenia wielokryteriowych czynników do podjęcia oceny efektywności prac

on humanising the residential environment and adapting it to contemporary standards (Malazdrewicz, Ostrowski, Sadowski, 2022; Czado, 2012; Hariasz, 2020). Adaptation work typically includes reconfiguring building segments, modifying window openings, adding self-supporting balcony structures, and applying modern technologies such as prefabricated facade cladding systems (Schabowicz, 2018).

Another important factor influencing the development of the research tools was the need to align construction methods with current regulations, particularly those concerning the selection of insulation materials. One of the most commonly used thermal modernisation methods is the ETICS system, which involves the permanent attachment of insulation layers – most often polystyrene or mineral wool – to the external wall using anchors or adhesive, followed by the application of a protective and decorative coating. Until recently, over 90% of ETICS applications involved the use of expanded polystyrene. Current fire safety regulations still permit the use of polystyrene in tall and high-rise buildings, but only up to a certain height, which does not cover the entire structure. As a result, mineral wool is now the only permitted material for this method. While this change brings certain benefits, it also leads to increased renovation costs, which carries economic implications (Gorszkov, Orłowicz, 2016). The differences in energy performance between various facade cladding types encourage a closer examination of insulation technologies in relation to the materials used (Li, Chen, 2020; Michalak, Czernik, Marcinek et al., 2020).

An important factor affecting the condition of the external plaster is the building's orientation in relation to the cardinal directions. Evaluating the effectiveness of ETICS methods in terms of thermal insulation, technical performance and aesthetics is economically relevant for both manufacturers and contractors. Surface changes in materials do not affect their physical properties; however, long-term use of facade insulation may affect the structure of renovation materials. Research into surface-improving materials – such as those enhancing hardness, density, porosity or gloss – shows that it is possible to mitigate these effects. The use of appropriate products allows for the modification of surface characteristics, improving self-cleaning capacity, hydrophobicity and aesthetics, which in turn contributes to the overall durability of the ETICS system (Barreira, de Freitas, 2013, pp. 31–39).

The widespread approval of the ETICS method required testing and certification in many European countries. It turns out that in several of them, the method has a relatively small number of technical assessments (e.g., European Technical Assessment, Technical Assessment Body), which may result from a limited number of studies authorising its use on specific markets. In this regard, Central European countries perform noticeably better. Today, the environmental impact assessment of the ETICS method has become a key concern (Michalak, 2021).

RESEARCH METHODOLOGY

This article analyses the effectiveness of secondary thermal retrofitting in high-rise buildings constructed using large-panel technology. The case study focuses on the assessment of multi-variant thermal renovation of a building in accordance with evolving energy and fire safety regulations. The research was centred on developing a theoretical model for evaluating the effectiveness of various methods of secondary thermal retrofitting and facade renovation in the context of current legal regulations, as well as energy and fire safety requirements.

termomodernizacyjnych. Analiza BESM umożliwia zrównoważoną ocenę termomodernizacji poprzez uwzględnienie czterech równo ważnych wskaźników: efektywności energetycznej, zużycia energii, kosztu inwestycji i wpływu środowiskowego. Wskaźnik opiera się na porównaniu wyników z wariantem referencyjnym, zapewniając czytelność i prostotę interpretacji rezultatów. Szczegółowy opis metody BESM przedstawiono w sekcji „Opis metody BESM”.

Analizowany budynek

Badaniu poddano 11-kondygnacyjny budynek mieszkalny wykonany w technologii wielkopłytywowej W-70, zlokalizowany w Radomiu (III strefa klimatyczna). Jego centralne położenie w skali kraju pozwala na uzyskanie uśrednionych wyników dla tego typu obiektów. Budynek powstał w 1985 roku, a termomodernizację przeprowadzono w 2005 roku, stosując metodę ETICS z płytą styropianową (12 cm) na wszystkich fasadach. W efekcie współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych obniżono z 0,610 W/(m²K) do 0,218 W/(m²K). Dane badawcze analizowanego budynku mieszkalnego pozyskano z dokumentacji inwentaryzacyjnej, badań *in-situ* (ogłędziny i pomiary budynku oraz jego elementów), własnych analiz obliczeniowych i symulacji komputerowych oraz z przeglądu literatury fachowej. Po usystematyzowaniu materiałów określono stan początkowy oraz efekty energetyczne po termomodernizacji z użyciem 12 cm styropianu. Uzyskane dane posłużyły do stworzenia modelu badawczego, na którym oparto analizę różnych metod termomodernizacji i ich skuteczności.

The study presents the BESM model as a method for analysing and evaluating various building thermal modernisation variants. This approach does not require complex procedures or the introduction of multi-criteria factors to assess the effectiveness of thermal improvement measures. The BESM analysis enables a balanced evaluation of thermal modernisation by considering four equally weighted indicators: energy efficiency, energy consumption, investment cost, and environmental impact. The index is based on comparison with a reference variant, ensuring clarity and simplicity in interpreting the results. A detailed description of the BESM method is provided in the section “Description of the BESM Method.”

Analysed Building

The study was conducted on an 11-storey residential building constructed using the W-70 large-panel technology, located in Radom (climate zone III). Its central location within the country allows for the results to be considered representative for this type of structure. The building was completed in 1985, and thermal retrofitting was carried out in 2005 using the ETICS method with 12 cm expanded polystyrene boards applied to all facades. As a result, the thermal transmittance (*U*-value) of the external walls was reduced from 0.610 W/(m²K) to 0.218 W/(m²K). The research data for the analysed residential building were obtained from inventory documentation, *in-situ* investigations (visual inspections and measurements of the building and its components), the authors’ own calculations and analyses

II. 1. Powtarzalny plan kondygnacji – analizowany budynek. Opracowanie: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak
III.1. Repetitive floor plan – analysed building. Compiled by: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak

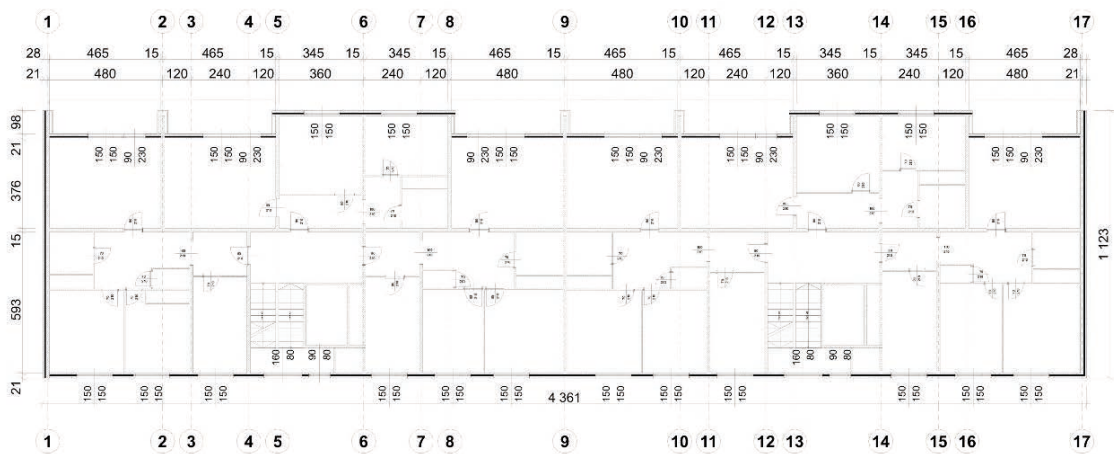


Tabela 2. Ogólne dane parametryczne budynku. Opracowanie: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak na podstawie (Audyt, 2011)
Table 2. General parametric data of the building. Compiled by: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak based on (Audyt, 2011)

Nr No.	Dane ogólne budynku/ General building data	Parametry/ Parameters
1	technologia wykonania prefabrykowana/ Construction technology	wielkopłykowa W-70/ large-panel W-70
2	liczba kondygnacji/ Number of storeys	11
3	kubatura części ogrzewanej/ Heated volume	15300,0 m³
4	całkowita powierzchnia użytkowa budynku/ Total usable floor area	4632,2 m²
5	powierzchnia użytkowa mieszkań/ Usable floor area of residential units	3660,3 m²
6	powierzchnia użytkowa części niemieszkalnej/ Usable floor area of non-residential spaces	548,9 m²
7	liczba lokali mieszkalnych/ Number of residential units	66 mieszkań/ flats
8	liczba osób zamieszkujących budynek/ Number of residents	253 osoby/ people
9	współczynnik kształtu budynku A/V / Building shape factor A/V	0,31



II. 2. Analizowany budynek w Radomiu: a) model elewacji frontowej; b) zdjęcie elewacji frontowej; c) model elewacji balkonowej; d) zdjęcie elewacji balkonowej. a, c: Opracowanie: Dariusz Gawel; b,d2
 III. 2. Analysed building in Radom: a) front facade model; b) front facade foto; c) balcony facade model; d) balcony facade photo. a, c: Compiled by: Dariusz Gawel; b,d2

Warianty modernizacji fasadowej

Warianty modernizacji elewacji balkonowej (Tabela 3) obejmują trzy rozwiązania. W wariantcie pierwszym (V1) okno balkonowe zastąpiono przeszkleniem do podłogi, a 12 cm styropianu wymieniono na 20 cm wełny mineralnej oraz dodano izolację termiczną płyt balkonowych. W wariantcie drugim (V2) zachowano dotychczasową izolację, dodając pełną obudowę fasady w formie samonośnej konstrukcji osłoniętej panelami szklanymi. Wariant trzeci (V3) przewidywał częściową obudowę balkonów. Warianty drugi i trzeci poprzez obudowę balkonów zmniejsza konsekwencje mostków termicznych liniowych powstałych na balkonach. Istotnym

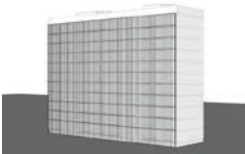
and computer simulations, as well as a review of technical literature. After organising the collected materials, the initial condition of the building and the energy performance achieved following thermal retrofitting with 12 cm polystyrene were defined. The data obtained served as the basis for developing a research model used to analyse various thermal retrofitting methods and their effectiveness.

Facade Modernisation Variants

The balcony facade modernisation variants (Table 3) include three solutions. In the first variant (V1), the balcony window is replaced with full-height glazing, the original 12 cm polystyrene insulation is replaced with 20 cm mineral wool, and thermal insulation is added to the balcony slabs. In the second variant (V2), the existing insulation is retained, and a full facade enclosure is added in the form of a self-supporting structure clad with glass panels. The third variant (V3) involves partial enclosure of the balconies. In both the second and third variants, the balcony enclosures help reduce the impact of linear thermal bridges formed at the balconies. An important design and research issue was the existing insulation layer from 2005. A natural solution would be to apply an additional layer of insulation, a practice that has been commonly used for many years. In such cases, the total thickness of the polystyrene layer can reach 18 cm or more. However, due to legal constraints, it is not possible to use polystyrene across the entire facade. Combining materials such as polystyrene and mineral wool - each requiring different installation methods within the ETICS system - presents an additional technological and construction challenge. Due to the physical properties, type of external plaster, and fixing technologies associated with these two insulation materials, the decision was made to apply a single layer of ETICS thermal insulation. The removal of the existing thermal insulation layer in the first variant (V1) was included in the cost estimate. The adopted multi-variant approach had a significant impact on the final results, which should reflect the outcomes of the

Tabela 3. Warianty termomodernizacji fasady balkonowej. Opracowanie: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak

Table 3. Thermal retrofit variants of the balcony facade. Compiled by: Dariusz Gawel, Natalia Jakubiak

Wariant/ Variant	Podgląd fasady/ Facade preview	Elementy modyfikacji fasady/ Facade modification elements
V1		Wymiana okien 150×150 cm na witryny 150×230 cm, usunięcie panelu ściennego podokiennika na szerokości okna (150×80 cm)./ Replacement of 150 × 150 cm windows with 150 × 230 cm full-height glazing; removal of 150 × 80 cm wide under-window wall panel. Izolacja: wełna mineralna, grubość 20 cm./ Insulation: mineral wool, 20 cm thick. Docieplenie od strony kuchni i ścian szczytowych w technologii ETICS./ Additional insulation on the kitchen side and gable walls using the ETICS system.
V2		- Technologia obudowy elewacyjnej – z wykorzystaniem samonośnej lekkiej konstrukcji aluminiowej./ Facade enclosure technology using a self-supporting lightweight aluminium structure. - Obudowa elewacji – samonośna ściana kurtynowa ze szkła w ramie aluminiowej./ Facade cladding: self-supporting curtain wall made of glass in an aluminium frame. - Docieplenie ścian szczytowych i kuchni w technologii ETICS./ Insulation of gable walls and kitchen walls using the ETICS system.
V3		- Technologia obudowy balkonów – samonośna konstrukcja z lekkiej ramy aluminiowej./ Balcony enclosure technology: self-supporting structure made of lightweight aluminium frame. - Docieplenie w technologii ETICS w przerwach między obudową aluminiową. / ETICS insulation in gaps between the aluminium enclosure. - Docieplenie ścian szczytowych i kuchni w technologii ETICS./ Insulation of gable walls and kitchen walls using the ETICS system.

problemem projektowo-badawczym była istniejąca warstwa izolacji z 2005 roku. Naturalnym rozwiązaniem byłoby nałożenie kolejnej warstwy izolacji, co jest powszechnie stosowane od wielu lat. W takich przypadkach grubość warstwy styropianu może wynosić nawet 18 cm i więcej. Ze względu na uwarunkowania prawne nie jest możliwe zastosowanie styropianu na całości elewacji. Łączenie materiałów, takich jak polistyren i wełna mineralna, przy różnych technologiach wykonania tych izolacji w systemie ETICS, staje się dodatkowym wyzwaniem technologicznym i budowlanym. Ze względu na właściwości fizyczne, rodzaj wyprawy zewnętrznej oraz technologie mocowania dwóch różnych materiałów izolacyjnych zdecydowano o zastosowaniu pojedynczej warstwy izolacji termicznej ETICS. Usunięcie warstwy izolacji termicznej w wariantcie pierwszym (V1) zostało uwzględnione w kosztach realizacji. Podjęte wielowariantowe założenia miały istotny wpływ na wyniki końcowe, które powinny stanowić rezultat oceny efektów BESM. Czytelny efekt plastyczny o prostym charakterze różnych wariantów stanowi dodatkowy atut w poszukiwaniu rozwiązań termomodernizacyjnych.

Programy komputerowe użyte do analizy

Do analizy energetycznej budynku wykorzystano program Audytor OZC Sankom 7.0 Pro, który zgodnie z aktualnymi normami obliczył współczynniki przenikania ciepła przez przegrody budowlane, projektowe obciążenie cieplne poszczególnych pomieszczeń oraz całego budynku, a także szczegółowy sezonowy bilans energetyczny. W programie określono również wskaźniki związane ze świadectwem charakterystyki energetycznej budynków (ChEB), takie jak energia użytkowa (EU), energia końcowa (EK), energia pierwotna (EP) oraz ślad węglowy (eCO₂), które uwzględniają BESM. Model zawierał typowe przegrody budynków W-70 z istniejącą warstwą izolacji. Mostki cieplne analizowano metodą szczegółową, a dane meteorologiczne oparto na III strefie klimatycznej (stacja Kielce-Suków). W budynku zastosowano centralne ogrzewanie z węzła wymiennikowego podłączonego do miejskiej sieci ciepłowniczej. Ciepła woda użytkowa również jest przygotowywana centralnie w wymiennikowni i rozprowadzana z zastosowaniem cyrkulacji. Wentylacja grawitacyjna wywiewna obejmuje kuchnię i łazienki. Do analizy mostków cieplnych zastosowano program THERM 7.8 opracowany przez Lawrence Berkeley National Laboratory, umożliwiający dwuwymiarowe modelowanie przepływu ciepła zgodnie z normą ISO 10211. Pozwoliło to na szczegółową ocenę rozkładu izoterm, miejsc potencjalnej kondensacji pary wodnej oraz obszarów o najwyższych stratach ciepła. Szczególną uwagę poświęcono liniowym mostkom na balkonach, analizując wpływ braku izolacji płyt na straty ciepła oraz ryzyko kondensacji pary wodnej. W celu prawidłowej diagnozy stanu istniejącego oraz określenia potrzeby termomodernizacji wykonane zostały zdjęcia termowizyjne za pomocą kamery FLIR E8-XT rejestrującej promieniowanie podczerwone w zakresie temperatur od -20°C do 550°C i współczynnikiem emisyjności ϵ od 0,1 do 1,0. Obraz termowizyjny przedstawia typowe wady cieplne występujące w analizowanym budynku wielorodzinnym. Zdjęcie zostało wykonane przy temperaturze zewnętrznej wynoszącej -8°C.

Opis metody BESM

Przy opracowaniu wzorcowego modelu BESM kluczowe jest określenie kryteriów oceny termomodernizacji. Zbyt skomplikowany system oceny może być nieczytelny dla mieszkańców, dlatego istotne jest proste, jednoznaczne narzędzie. Certyfikowane metody wymagają wielokryteriowej analizy przed wystawieniem oceny końcowej. W tym przypadku autorzy skupili się jednak na

BESM evaluation. The clear and straightforward visual effect of the different variants is an additional advantage in the search for effective thermal retrofit solutions.

Software Used for the Analysis

The energy analysis of the building was conducted using the Sankom Audytor OZC7.0 Pro software, which, in accordance with current standards, calculated the heat transfer coefficients of building partitions, the design heat load for individual rooms and the entire building, as well as a detailed seasonal energy balance. Indicators related to the Energy Performance Certificate (EPC), such as useful energy (EU), final energy (EK), primary energy (EP), and carbon footprint (eCO₂), were also determined within the software and incorporated into the BESM. The model accounted for typical partitions used in W-70 buildings with the existing insulation layer. Thermal bridges were analysed using a detailed method, and meteorological data were based on climate zone III (Kielce-Suków station). The building uses central heating supplied by a heat exchanger station connected to the municipal district heating network. Domestic hot water is also prepared centrally in the exchanger station and distributed via a circulation system. Gravity exhaust ventilation serves the kitchens and bathrooms. The analysis of thermal bridges was carried out using the THERM 7.8 software developed by Lawrence Berkeley National Laboratory, which enables two-dimensional modelling of heat transfer in accordance with ISO 10211. This allowed for a detailed assessment of isotherm distribution, potential condensation zones, and areas with the highest heat loss. Particular attention was given to linear thermal bridges at the balconies, analysing the impact of missing slab insulation on heat loss and the risk of water vapour condensation. In order to accurately diagnose the existing condition and determine the need for thermal retrofitting, thermal images were taken using a FLIR E8-XT camera, which records infrared radiation within a temperature range of -20°C to 550°C and an emissivity coefficient ϵ from 0.1 to 1.0. The thermal image reveals typical thermal defects present in the analysed multi-family residential building. The image was captured at an outdoor temperature of -8°C.

Description of the BESM Method

When developing the reference BESM model, it is essential to define the criteria for assessing thermal retrofitting. An overly complex evaluation system may be unclear to residents; therefore, a simple and unambiguous tool is crucial. Certified methods require multi-criteria analysis before issuing a final rating. In this case, however, the authors focused on an accurate diagnosis of the initial condition for simulation purposes, rather than expanding the number of evaluation criteria. It was proposed to adopt four components C_i of the BESM model (Table 4):

- heat transfer coefficient of external walls,
- average annual energy consumption of the building,
- unit cost of insulating 1 m² of facade,
- CO₂ emissions related to the building's energy demand.

Each of these components has an equal weight (0.25) in the overall BESM index. Although it is possible to include additional criteria, such as the use of recycled materials or the durability of the thermal insulation method, but an excessive number of factors could complicate the assessment and limit the practical applicability of this simple method.

Each component C_i of the model for variant V_x was converted

Tabela 4. Definiowanie kryteriów oceny BESM. Opracowanie: Dariusz Gawel, Łukasz Guz

Table 4. Defining the BESM evaluation criteria. Compiled by: Dariusz Gawel, Łukasz Guz

Nr/ No	Kryteria/ Group of criteria	Czynnik oceny/ Evaluation factor	Waga	Wskaźnik
C_1	efektywność energetyczna/ energy efficiency	współczynnik przenikania ciepła/ heat transfer coefficient	0.25	U [W/(m ² ·K)]
C_2	zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i wentylacji/ energy demand for heating and vent.	roczne zużycie energii/ annual energy consumpt.	0.25	E_{HV} [kWh/m ³ ·rok]
C_3	koszt modernizacji przypadający na powierzchnię fasady/ retrofit cost per facade surface	koszt jednostkowy/ unit cost	0.25	C [€/m ²]
C_4	zrównoważony wpływ środowiskowy/ environmental sustainability	ślad węglowy/ carbon footprint	0.25	CO_2 [kg _{CO2} /(m ² ·rok)]
BESM			1.00	[-]

Tabela 5. Zestawienie sposobu symulacji 3 przykładów termomodernizacji badanego budynku. Opracowanie: Dariusz Gawel, Łukasz Guz

Table 5. Summary of the simulation effects of 3 examples of thermal modernization of the studied building. Compiled by: Dariusz Gawel, Łukasz Guz

Nr/ No	Czynnik oceny/ Evaluation factor	Wariant/ Variant		
		V1	V2	V3
1	C_1	$C_{1,V_R}/C_{1,V_1}$	$C_{1,V_R}/C_{1,V_2}$	$C_{1,V_R}/C_{1,V_3}$
2	C_2	$C_{2,V_R}/C_{2,V_1}$	$C_{2,V_R}/C_{2,V_2}$	$C_{2,V_R}/C_{2,V_3}$
3	C_3	$C_{3,V_R}/C_{3,V_1}$	$C_{3,V_R}/C_{3,V_2}$	$C_{3,V_R}/C_{3,V_3}$
4	C_4	$C_{4,V_R}/C_{4,V_1}$	$C_{4,V_R}/C_{4,V_2}$	$C_{4,V_R}/C_{4,V_3}$
		$BESM_1$	$BESM_2$	$BESM_3$

precyzyjnej diagnozie stanu wyjściowego do symulacji, zamiast rozszerzania liczby kryteriów.

Zaproponowano przyjęcie czterech składników C_i modelu BESM (Tab. 4):

- współczynnik przenikalności cieplnej ścian zewnętrznych,
- średnie roczne zużycie energii budynku,
- koszt jednostkowy docieplenia 1 m² fasady,
- emisja CO₂ związana z zapotrzebowaniem energetycznym budynku.

Każdy z tych składników ma równą wagę (0,25) w sumarycznym wskaźniku BESM. Choć możliwe jest uwzględnienie dodatkowych kryteriów, takich jak zastosowanie materiałów z recyklingu czy trwałość metody termoizolacyjnej, jednak ich nadmierna liczba mogłaby skomplikować ocenę i ograniczyć praktyczne zastosowanie tej prostej metody.

Każdy składnik modelu C_i dla wariantu V_x został przeliczony na wartość względną poprzez podzielenie wartości składnika wariantu referencyjnego V_R przez odpowiadającą mu wartość w danym wariantcie. Wskaźnik $BESM_x$ dla wariantu V_x termomodernizacji oblicza się według wzoru (1):

$$BESM_x = \sum_{i=1}^4 0,25 \cdot \frac{C_{i,V_R}}{C_{i,V_x}} \quad (1)$$

gdzie:

x – wariant termomodernizacji,

i – numer wskaźnika w modelu BESM,

V_R – wariant referencyjny.

Macierz wyników obliczeń dla wszystkich analizowanych wariantów przedstawiono w Tab. 5, a graficzne zobrazowanie idei wskaźnika BESM znajduje się na Il. 3.

Koszt termomodernizacji uwzględnia wydatki na materiały, wynagrodzenie pracowników oraz koszty rusztowania i zabezpieczeń placu budowy. Przyjęto jednostkową cenę materiału izolacyjnego 150 zł/m³, a koszt robocizny dla metody lekkiej mokrej 63 zł/m².

into a relative value by dividing the value of the reference variant V_R by the corresponding value in the given variant. The BESM index for thermal retrofit variant V_x is calculated using the following formula (1):

$$BESM_x = \sum_{i=1}^4 0,25 \cdot \frac{C_{i,V_R}}{C_{i,V_x}} \quad (1)$$

where:

x – thermal retrofit variant,

i – indicator number in the BESM model,

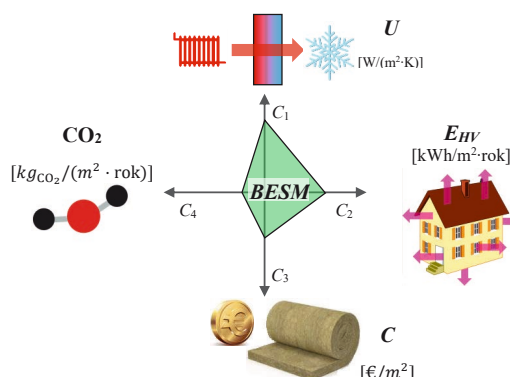
V_R – reference variant.

The results matrix for all analysed variants is presented in Table 5, while III.3 illustrates the concept of the BESM index.

The cost of thermal retrofitting includes expenses for materials, labour, as well as scaffolding and site safety measures.

Il. 3. Graficzne przedstawienie idei wskaźnika BESM. Opracowanie: Dariusz Gawel, Łukasz Guz

III. 3. Graphical representation of the BESM concept indicator. Compiled by: Dariusz Gawel, Łukasz Guz



WYNIKI

Badając stan termorenowacji przedmiotowego budynku (oraz innych budynków wielkopłytowych), odnotowano liczne uchybienia, które można podzielić na trzy główne grupy:

- brak lub uproszczona dokumentacja projektowa,
- błędy w realizacji robót budowlanych,
- problemy związane z użytkowaniem obiektu.

W pierwszej grupie błędów stwierdzono brak pełnej lub częściowej dokumentacji projektowej, zarówno dotyczącej oceny stanu przedprojektowego, jak i zakończenia robót. Szczególnie dotyczyło to opracowania detali w miejscach skomplikowanych konstrukcyjnie, gdzie pojawiały się mostki termiczne. Brakowało także ekspertyzy konstrukcyjnej dotyczącej nośności ścian zewnętrznych w miejscach łączenia warstw, tzw. wieszaków (Szulc, 2019; Wójtowicz, 2014). W zakresie doboru materiałów kierowano się głównie ekonomią robót, a nie właściwościami fizycznymi, mechanicznymi czy estetycznymi wypraw zewnętrznych.

W zakresie realizacji robót budowlanych stwierdzono różne grubości warstwy materiału izolacyjnego w miejscach ościeży i połączeń z ramą okienną, a czasami całkowity brak izolacji w tych miejscach. Po kilkudziesięciu latach zauważono odpryski i zarysowania, prawdopodobnie wynikające z nierównych warstw wyprawy oraz uszkodzeń warstwy klejącej.

W zakresie użytkowania budynków termomodernizowanych stwierdzono potrzebę regularnej kontroli stanu technicznego fasad. Wykonanie z opóźnieniem prac konserwacyjnych, naprawy drobnych pęknięć czy ubytków wypraw elewacyjnych połączonych z łuszczeniem farby elewacyjnej spowodowało widoczne uszkodzenia na wielu elewacjach. Z czasem pojawiły się skażenia mikrobiologiczne, które, jak dowodzą badania BRI, nie wpływają na wytrzymałość wyprawy, jednak mogą wskazywać na złe dopasowanie materiałów lub inne problemy użytkowe (Knyziak, 2016; Knyziak, Krentowski, Bieranowski, 2017), takie jak niewłaściwe połączenia z obróbkami blacharskimi, niewłaściwe odprowadzenie wód opadowych oraz problemy z wentylacją fasad.

Mostki termiczne

Przed przystąpieniem do określenia metody oceny BESM określony został stan istniejący obiektu objętego studium przypadku w celu prawidłowej weryfikacji konieczności i potrzeb ponownej termomodernizacji. Doprecyzowania wymagały miejsca związane z przypadkiem mostków termicznych, takie jak:

- brak izolacji płyt balkonowych,
- niewielka grubość izolacji przy ościeżach okiennych,
- połączenia warstwy izolacji fasadowej z cokołem,
- występowanie zniszczonych, drewnianych okien w dwóch mieszkaniach.

Newralgicznym elementem są balkony, stanowiące mostki liniowe, które wynikają z przerwania powłoki termoizolacyjnej na łączeniu stropów i płyt balkonowych (II. 4a). Brak izolacji termicznej pomiędzy płytą balkonową a wieńcem stropowym powoduje, że płyta balkonowa pełni funkcję radiatora, rozpraszając ciepło do środowiska. Temperatura płyty balkonowej przy elewacji wynosi około 7°C. W obrazie termowizyjnym widać także znaczny ubytek energii na krawędziach okien, łączeniach szyb z ramą, ramy z ościeżnicą oraz brakiem ciągłości warstwy izolacyjnej i nieszczelnościami w połączeniu między oknem z murem (II. 4b).

W technologii wielkopłytowej występują również mostki cieplne na złączach poziomych między kondygnacjami, wynikające z niedoskonałości prefabrykacji i montażu elementów. Te zjawiska prowadzą do podwyższonych strat energii, obniżenia komfortu cieplnego mieszkańców oraz mogą sprzyjać kondensacji wilgoci i rozwojowi pleśni.

The unit price of the insulation material was set at PLN 150/m³, and the labour cost for the wet-applied method was assumed to be PLN 63/m².

RESULTS

An assessment of the thermal renovation of the analysed building (as well as other large-panel buildings) revealed numerous shortcomings, which can be divided into three main categories:

- lack of or simplified design documentation,
- construction execution errors,
- issues related to building use.

In the first group of issues, a lack of complete or partial design documentation was identified, both for the pre-design condition assessment and for the completion of works. This was particularly evident in the absence of detailed drawings in structurally complex areas where thermal bridges occurred. There was also a lack of structural expertise concerning the load-bearing capacity of external walls at the junctions of layered components, known as hangers (Szulc, 2019; Wójtowicz, 2014). In terms of material selection, decisions were primarily driven by cost rather than the physical, mechanical or aesthetic properties of the external materials.

In the execution of construction works, varying thicknesses of the insulation layer were observed around window reveals and junctions with window frames, and in some cases, insulation was completely absent in these areas. After several decades, flaking and cracking became visible, most likely resulting from uneven plaster layers and damage to the adhesive layer.

In the use of thermally retrofitted buildings, the need for regular inspection of facade condition was identified. Delays in carrying out maintenance work, such as repairing minor cracks or losses in the facade plaster combined with peeling paint, led to visible damage on many facades. Over time, microbiological contamination appeared, which, according to BRI research, does not affect the durability of the plaster but may indicate poor material compatibility or other operational issues (Knyziak, 2016; Knyziak, Krentowski, Bieranowski, 2017), such as improper connections with metal flashings, inadequate rainwater drainage, and problems with facade ventilation.

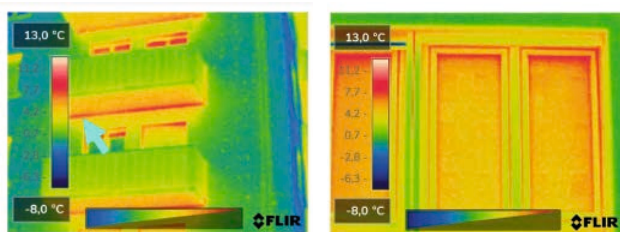
Thermal Bridges

Before determining the BESM evaluation method, the existing condition of the building included in the case study was assessed to properly verify the need and justification for secondary thermal retrofitting. Particular attention was given to areas associated with thermal bridges, such as:

- lack of insulation on balcony slabs,
- insufficient insulation thickness around window reveals,
- junctions between the facade insulation layer and the plinth,
- damaged wooden windows present in residential units.

A critical element is the balconies, which act as linear thermal bridges resulting from the interruption of the thermal insulation layer at the junction between the floor slabs and the balcony slabs (III. 4a). The absence of thermal insulation between the balcony slab and the floor ring beam causes the balcony slab to function as a radiator, dissipating heat into the environment. The temperature of the balcony slab at the facade is approximately 7°C.

The thermal image also reveals significant energy loss at window edges, glass-to-frame junctions, frame-to-reveal connections, as well as discontinuities in the insulation layer and heat leakage at the window-to-wall connection (III. 4b).



II. 4. Zdjęcie termowizyjne: a) płyt balkonowych, b) okien. Opracowanie: Łukasz Guz
III. 4. Thermal imaging: a) balcony slabs, b) windows. Compiled by: Łukasz Guz

W symulacjach numerycznych przepływu ciepła zaobserwowano, że najwyższy strumień ciepły występuje w miejscach, gdzie łączą się elementy konstrukcyjne o różnych właściwościach przewodzenia, zwłaszcza tam, gdzie izolacja jest przerwana lub osłabiona. Skutkuje to wzrostem przenikania ciepła i niższą temperaturą powierzchni wewnętrznych w tych rejonach. Najzimniejsze miejsca ścian znajdują się zwykle w pobliżu krawędzi przegród, łączeń płyt konstrukcyjnych oraz połączeń izolacji pionowej i poziomej. Efektem są większe straty energii i ryzyko kondensacji pary wodnej, gdy temperatura powierzchni spada poniżej punktu rosy.

Obliczeniowe efekty termomodernizacji

Wyniki obliczeń wariantów termomodernizacji przedstawiono w Tab. 6. Wszystkie warianty charakteryzują się takim samym strumieniem powietrza wentylacyjnego, wynoszącym 6184,6 m³/h, ponieważ w żadnym z wariantów nie przewidziano modernizacji systemu wentylacyjnego. Wprowadzone zmiany nie miały wpływu na przenikalność powietrza przez przegrody ani na szczelność stolarki okiennej, dlatego nie było potrzeby różnicowania tego parametru.

Zastosowanie centralnej wentylacji kanałowej w budynku wielorodzinnym, szczególnie w technologii wielkopłytowej, napotyka na liczne bariery techniczne i finansowe. Wymaga to wydzielenia pionowych przestrzeni kanałowych w istniejącej strukturze budynku, co wiąże się z kosztownymi i inwazyjnymi pracami budowlanymi oraz ingerencją w elementy konstrukcyjne lub wykończeniowe. Dodatkowo w budynkach wielomieszkaniowych zarządzanie systemem i podział kosztów eksploatacyjnych staje się skomplikowane. Wariant referencyjny (VR) zużywa 266,220 kWh/rok na ogrzewanie i wentylację. Największą redukcję energochłonności (32,1%) osiąga wariant drugi (V2), natomiast warianty pierwsze (V1) i trzecie (V3) wykazują poprawę na poziomie 15,8% i 11,7%.

Model oceny BESM

Wyniki analizy BESM przedstawiono w tabeli 7. W przypadku wariantów z całkowicie przeszkloną fasadą lub balkonami, współczynnik przenikania ciepła odnosi się do warstw: ściany zewnętrznej oraz słabo wentylowanej przestrzeni balkonowej. Koszt wariantu referencyjnego uwzględnia wykonanie istniejącej izolacji termicznej, zgodnie z cenami obowiązującymi w dniu analizy.

In large-panel construction, thermal bridges also occur at horizontal joints between storeys, resulting from imperfections in the prefabrication and assembly of elements. These phenomena lead to increased energy losses, reduced thermal comfort for the residents, and may contribute to moisture condensation and mould growth.

Numerical heat transfer simulations showed that the highest heat flux occurs at junctions of structural elements with different thermal conductivity properties, particularly where insulation is interrupted or weakened. This results in increased heat transfer and lower internal surface temperatures in these areas. The coldest parts of the walls are typically located near the edges of partitions, at joints between structural panels, and at connections between vertical and horizontal insulation. As a consequence, there is greater energy loss and an increased risk of water vapour condensation when surface temperatures fall below the dew point.

Calculated Effects of Thermal Retrofitting

The calculation results for the thermal retrofit variants are presented in Table 6. All variants feature the same ventilation airflow rate of 6,184.6 m³/h, as no modifications to the ventilation system were proposed in any of the scenarios. The introduced changes did not affect the air permeability of building partitions or the airtightness of the window joinery; therefore, there was no need to differentiate this parameter.

The implementation of a central ducted ventilation system in a multi-family building – particularly one constructed using large-panel technology – faces numerous technical and financial barriers. It requires the creation of vertical duct spaces within the existing structure, which involves costly and invasive construction work, as well as interference with structural or finishing elements. Additionally, in multi-unit buildings, managing the system and distributing operating costs becomes complex.

The reference variant (VR) consumes 266,220 kWh/year for heating and ventilation. The greatest reduction in energy demand (32.1%) is achieved in the second variant (V2), while the first (V1) and third (V3) variants show improvements of 15.8% and 11.7%, respectively.

BESM Evaluation Model

The results of the BESM analysis are presented in Table 7. In the case of variants with fully glazed facades or balconies, the heat transfer coefficient refers to the layers of the external wall and the low-ventilated balcony space. The cost of the reference variant includes the implementation of the existing thermal insulation, based on prices valid at the time of the analysis.

The most favourable heat transfer coefficient, $U = 0.149$ W/(m²·K), was achieved in the first thermal retrofit variant (V1), where the thickest layer of mineral wool was applied,

Tabela 6. Podstawowe wyniki analizy wpływu termomodernizacji w poszczególnych wariantach. Opracowanie: Łukasz Guz

Table 6. Basic results of the analysis of the impact of thermomodernisation in the individual variants. Compiled by: Łukasz Guz

Parametr/ Parameter	V1	V2	V3	VR	Jedn.
Strumień powietrza wentylacyjnego/ Ventilation airflow rate	6184,6	6184,6	6184,6	6184,6	m ³ /h
Zapotrzebowanie na ciepło (H+V)/ Heat demand (H+V)	224088	180889	235071	266220	kWh/rok
Zmiana zapotrzebowania/ Change in demand	15.8	32.1	11.7	0.0	%

Tabela 7. Wyniki analizy BESM. Opracowanie: Łukasz Guz
Table 7. Results of the BESM analysis. Compiled by: Łukasz Guz

Nr/ No.	Wskaźnik/ Indicator	Wartości bezwzględne/ Absolute values				Wartości względne/ Relative values		
		V1	V2	V3	VR	V1	V2	V3
C ₁	U [W/(m²·K)]	0.149	0.177	0.187	0.218	1.463	1.231	1.164
C ₂	E _{HV} [kWh/m³·rok]	14.6	11.8	15.4	17.4	1.188	1.471	1.132
C ₃	C [€/m²]	36	155	124	21.6	0.600	0.139	0.174
C ₄	CO ₂ [kgCO ₂ /(m²·rok)]	21.1	17.1	22.2	25.1	1.188	1.471	1.132
					BESM	1.109	1.078	0.900

→ Il. 5. Wyniki analizy BESM analizowanego budynku. Opracowanie: Dariusz Gawęł, Łukasz Guz

→ Ill. 5. Results of the BESM analysis of the analysed building. Compiled by: Dariusz Gawęł, Łukasz Guz

Najkorzystniejszy współczynnik przewodzenia ciepła $U = 0,149$ W/(m²·K) uzyskano w pierwszym wariancie (V1) termomodernizacji, gdzie zastosowano najgrubszą warstwę wełny, co poprawia wydajność o 36,8% w porównaniu do wariantu referencyjnego (VR). Dla tego wariantu uzyskano również najkorzystniejszy współczynnik BESM wynoszący 1,109. Wartość ta wynika z niskiego współczynnika przenikania ciepła ($U = 0,149$ W/(m²·K)), dobrej charakterystyki energetycznej budynku (EHV 14,6 kWh/m³·rok) oraz znacząco niskiego kosztu wykonania termomodernizacji. Z punktu widzenia architektonicznego zmiana nie wpływa na wygląd zabudowy osiedlowej, a większa grubość izolacji jest niemal niewidoczna, jedynie zmiana wykończenia lub kolorystyki może stanowić różnicę.

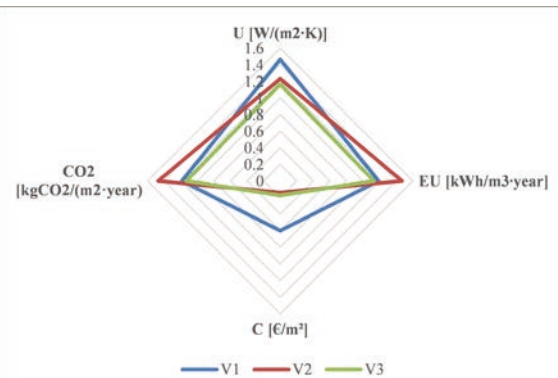
W wariancie drugim(V2) wskaźnik BESM wynosi 1,078, co jest nieznacznie niższym wynikiem niż w wariancie pierwszym. Choć koszt wykonania wynosi $C = 155$ €/m², co jest stosunkowo wysoką wartością, korzyści energetyczne sprawiają, że ten wariant ma duże znaczenie. Przeszklona fasada poprawia współczynnik przenikania ciepła o 18,8% w porównaniu do wariantu referencyjnego i umożliwia pozyskiwanie energii z nasłonecznienia. Południowo-zachodnia orientacja balkonu sprzyja nasłonecznieniu, a w lecie możliwe jest zastosowanie wewnętrznych urządzeń przeciwsłonecznych (np. żaluzji), które pomogą ograniczyć nadmierne obciążenie cieplne pomieszczeń. Współczynnik zapotrzebowania na energię do ogrzewania wynosi 11,8 kWh/m³·rok. Dodatkowo przeszklenie fasady stanowi nowoczesny element architektoniczny, który poprawia estetykę budynku.

Wariant trzeci (V3) zakładał przeszklenie wydłużonych balkonów na konstrukcji samonośnej. Współczynnik przenikania ciepła w układzie ściana zewnętrzna–przeszklenie wynosi 0,187 W/(m²·K). Wyższy wskaźnik strat ciepła wynika z większej powierzchni przeszklenia, w tym także z uwzględnienia powierzchni bocznej balkonów. Dodatkowo relatywnie wysoki koszt wykonania $C = 124$ €/m² wpływa na uzyskanie niskiego współczynnika BESM, który wynosi 0,900.

Wyniki analizy BESM dla analizowanego budynku przedstawiono graficznie na Il. 5, gdzie pole powierzchni pod danym wykresem jest proporcjonalne do wskaźnika BESM. W przypadku wykresu o największej powierzchni, wybór wariantu termomodernizacji byłby jednoznaczny. Jednakże widoczne jest zróżnicowanie wyników, które wynika z poszczególnych składników modelu BESM.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Budynki wielopłytkowe od dekad stanowią istotny element krajobrazu miejskiego w wielu krajach. Należy je zatem postrzegać jako „domy dostępne” (Gawęł, 2015), których modernizacja jest



improving performance by 36.8% compared to the reference variant (VR). This variant also achieved the highest BESM index of 1.109. This value results from the low heat transfer coefficient ($U = 0.149$ W/(m²·K)), good energy performance of the building (EHV 14.6 kWh/m³·year), and significantly low retrofit cost. From an architectural perspective, the change does not alter the appearance of the housing estate, and the increased insulation thickness is virtually unnoticeable – only the finish or colour scheme may present a visible difference. In the second variant (V2), the BESM index is 1.078, which is slightly lower than in the first variant. Although the implementation cost is $C = 155$ €/m², which is relatively high, the energy-related benefits make this variant highly significant. The glazed facade improves the heat transfer coefficient by 18.8% compared to the reference variant and enables solar energy gains. The south-west orientation of the balcony promotes solar exposure, while in summer, internal shading devices (e.g., blinds) can be used to help reduce excessive heat load in the rooms. The energy demand for heating is 11.8 kWh/m³·year. Additionally, the glazed facade introduces a modern architectural element that enhances the building's aesthetic value.

The third variant (V3) involved glazing extended balconies using a self-supporting structure. The heat transfer coefficient for the external wall–glazing configuration is 0.187 W/(m²·K). The higher heat loss index results from the larger glazed area, including the side surfaces of the balconies. Additionally, the relatively high implementation cost of $C = 124$ €/m² contributes to the lower BESM index of 0.900.

The results of the BESM analysis for the examined building are presented graphically in Ill. 5, where the surface area under each diagram is proportional to the BESM index. In the case of the diagram with the largest area, the choice of thermal retrofit variant would be clear. However, the variation in results reflects the differences between the individual components of the BESM model.

kluczowa w kontekście kształtowania zrównoważonego ładu przestrzennego miast i osiedli. W obliczu rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej oraz komfortu użytkowania, termomodernizacja tych budynków staje się koniecznością.

Zaproponowane w artykule narzędzie oceny projektów modernizacyjnych i termomodernizacyjnych budynków wielorodzinnych łączy kluczowe aspekty środowiskowe, ekonomiczne i energetyczne. Może ono stanowić cenne wsparcie dla zarządców budynków oraz wspólnot mieszkaniowych, które nie dysponują odpowiednią wiedzą techniczną w zakresie modernizacji obiektów budowlanych. Dzięki uwzględnieniu zarówno parametrów efektywności energetycznej, jak i kosztów inwestycyjnych, pozwala ono na świadome podejmowanie decyzji dotyczących modernizacji budynków. Z przeprowadzonych analiz wynikają następujące wnioski:

Wariant drugi (V2) zapewnia największą redukcję zużycia energii na poziomie 32,1%, podczas gdy warianty pierwsze (V1) i trzecie (V3) osiągają odpowiednio 15,8% i 11,7%.

Najniższy współczynnik przenikania ciepła ($U = 0,149 \text{ W/m}^2\text{K}$) uzyskano w wariantcie pierwszym (V1), co stanowi poprawę o 36,8% w porównaniu do stanu referencyjnego (VR).

Wariant drugi (V2), mimo stosunkowo wysokich kosztów obudowy $C = 155 \text{ €/m}^2$, zapewni korzyści w postaci energii cieplnej pozyskiwanej z nasłonecznienia oraz poprawia efektywność energetyczną budynku.

Najlepszy wskaźnik BESM (1,109) uzyskano w wariantcie pierwszym (V1) dzięki najniższemu współczynnikowi przenikania ciepła oraz korzystnym kosztom wykonania, ponieważ nie wymaga on kosztownej obudowy konstrukcji aluminiowej.

Przedstawione analizy wskazują na duży potencjał różnych wariantów termomodernizacji budynków wielkopłytowych, umożliwiając uzyskanie korzyści energetycznych i ekonomicznych, przy jednoczesnym zachowaniu lub poprawie komfortu mieszkańców. Odpowiednio zaplanowane działania modernizacyjne nie tylko redukują zapotrzebowanie na energię i koszty eksploatacyjne, ale także mogą poprawić estetykę budynków i jakość życia ich użytkowników.

PRZYPISY KOŃCOWE

- 1 https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/recovery-plan-europe_en (dostęp: 16.02.2025).
- 2 <https://www.google.com/maps>, Location of object: 51.404184, 21.177314

BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

- [1] Aaheim, H.A., Rive, N., 2005, *A Model for Global Responses to Anthropogenic Changes in the Environment* (GRACE), Oslo: Center for International Climate and Environmental Research.
- [2] Audyt energetyczny obiektu dla przedsięwzięcia termomodernizacyjnego do realizacji w trybie ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów z dnia 21.11.2008, Radom 2011.
- [3] Barreira, E., de Freitas, V. P., 2013, *Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*, Building and Environment, vol. 63, pp. 31-39.
- [4] Czado, J., 2012, *Możliwości rehabilitacji wielkich zespołów mieszkaniowych na przykładzie wybranych państw zachodnich*, Czasopismo Techniczne PK, Zeszyt 7-A, vol. 29, pp. 25-38.
- [5] European Commission, 2019, *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION, The European Green Deal*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640> (dostęp: 16.02.2025).
- [6] European Union, 2020, *Views on Construction - 2020 and beyond*, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/40706> (dostęp: 16.02.2025).
- [7] Gawel, D., 2015, *Dom dostępny – kształtowanie środowiska zamieszkania w warunkach zrównoważonego rozwoju*, W: Twardoch, A., red., *Mieszkać w mieście. Sprawy mieszkaniowe*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, pp. 99-110.
- [8] Gorszkow, A., Orłowicz, R., 2016, *Ocena przewidywanego okresu zwrotu inwestycji na ocieplenie elewacji budynków mieszkalnych*, <https://www.izolacje.com.pl/artykul/sciany-stropy/174288,ocena-przewidywanego-okresu-zwrotu-inwestycji-na-ocieplenie-elewacji-budynkow-mieszkalnych> (dostęp: 16.02.2025).
- [9] Hariasz, N., 2020, *Modernizacja bloków z wielkiej płyty*, <https://www.izolacje.com.pl/artykul/sciany-stropy/194720,modernizacja-blokow-z-wielkiej-plyty> (dostęp: 16.02.2025).
- [10] Knyziak, P., 2016, *The Quality and Reliability in the Structural Design, Production, Execution and Maintenance of the Precast Residential Buildings in Poland in the Past and Now*, Key Engineering Materials, vol. 691, pp. 420-431.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

Large-panel buildings have been a significant feature of the urban landscape in many countries for decades. They should therefore be regarded as "accessible homes" (Gawel, 2015), whose modernisation is essential in shaping the sustainable spatial order of cities and housing estates. In light of increasing demands for energy efficiency and user comfort, the thermal retrofitting of these buildings has become a necessity.

The evaluation tool for modernisation and thermal retrofitting projects of multi-family buildings proposed in this article integrates key environmental, economic and energy-related aspects. It may serve as valuable support for building managers and housing cooperatives that lack specialised technical knowledge in the field of building modernisation. By accounting for both energy efficiency parameters and investment costs, it enables informed decision-making regarding building upgrades. The following conclusions can be drawn from the analysis:

The second variant (V2) provides the greatest reduction in energy consumption at 32.1%, while the first (V1) and third (V3) variants achieve reductions of 15.8% and 11.7%, respectively.

The lowest heat transfer coefficient ($U = 0.149 \text{ W/m}^2\text{K}$) was obtained in the first variant (V1), representing a 36.8% improvement compared to the reference state (VR).

Despite the relatively high enclosure cost ($C = 155 \text{ €/m}^2$), the second variant (V2) offers benefits in the form of solar heat gains and improved energy performance of the building.

The highest BESM index (1.109) was achieved in the first variant (V1) due to the lowest heat transfer coefficient and favourable implementation cost, as it does not require an expensive aluminium enclosure.

The presented analyses indicate the significant potential of various thermal retrofit variants for large-panel buildings, enabling both energy and economic benefits while maintaining or improving residents comfort. Properly planned modernisation measures not only reduce energy demand and operating costs but can also enhance the aesthetic quality of buildings and improve the quality of life for their users.

- [11] Knyziak, P., Krentowski, J. R., Bieranowski, P., 2017, *Risks of the Durability of Large-Panel Buildings Elevations in Reference to the Conclusions from Technical Conditions Audits*, MATEC Web of Conferences, vol. 117, 00080.
- [12] Landolfi, R., Nicoletta, M., 2022, *Durability Assessment of ETICS: Comparative Evaluation of Different Insulating Materials*, MDPI Sustainability, vol. 14(2), 980.
- [13] Li, Y., Chen, L., 2020, *A study on database of modular facade retrofitting building envelope*, Energy and Buildings, vol. 214, 109826.
- [14] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., Sadowski, L., 2022, *Large Panel System Technology in the Second Half of the Twentieth Century – Literature Review, Recycling Possibilities and Research Gaps*, MDPI Buildings, vol. 12(11), 1822.
- [15] Michalak, J., Czernik, S., Marcinek, M., Michałowski, B., 2020, *Environmental burdens of External Thermal Insulation Systems. Expanded Polystyrene vs. Mineral Wool: Case Study from Poland*, MDPI Sustainability, vol. 12(11), 4532.
- [16] Michalak, J., 2021, *External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) from Industry and Academia Perspective*, MDPI Sustainability, vol. 13(24), 13705.
- [17] Minister Infrastruktury, 2002, *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z późniejszymi zmianami*.
- [18] Nowogońska, B., Mielczarek, M., 2021, *Renovation Management Method in Neglected Buildings*, MDPI Sustainability, vol. 13(2), 929.
- [19] Rada Ministrów, 2022, *Załącznik do Uchwały nr 23/2022 Rady Ministrów z dnia 9 lutego 2022 r., Długoterminowa strategia renowacji budynków. Wspieranie renowacji krajowego zasobu budowlanego*, https://kegw.krakow.pl/wp-content/uploads/2022/08/Długoterminowa_strategia_renowacji_budynkow.pdf (dostęp: 16.02.2025).

- [20] Radziejowska, A., Sobotka, A., 2021, *Assessment of large-panel prefabricated buildings in the social aspect of sustainable construction*, Archives of Civil Engineering, vol. 67(3), pp. 93-108.
- [21] Radziszewska-Zielina E., Gieł, M., 2014, *Studies of the Prefabricated Housing Construction Market in Poland*, Košice: SSP - Journal of Civil Engineering, vol. 9 (2), pp. 13-26.
- [22] Schabowicz, K., 2018, *Rozwiązania elewacyjne stosowane w modernizowanych obiektach*, <https://www.izolacje.com.pl/artykul/sciany-stropy/183273,rozwiązania-elewacyjne-stosowane-w-modernizowanych-obiektach> (dostęp: 16.02.2025).
- [23] Stazi, F., Di Perna, C., Munafò, P., 2009, *Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations*, Energy and Buildings vol. 41(7), pp. 721-731.
- [24] Szulc, J., 2019, *Systemy budynków wielkopłytowych*, W: Diagnostyka budynków wielkopłytowych, Materiały szkoleniowe, Instytut Techniki Budowlanej [https://](https://www.itb.pl/wp-content/uploads/2023/04/seminarium_diagnostyka_budynkow_wielkoplytowych_z-okladka_2-skompresowany.pdf)

- www.itb.pl/wp-content/uploads/2023/04/seminarium_diagnostyka_budynkow_wielkoplytowych_z-okladka_2-skompresowany.pdf (dostęp: 16.02.2025), pp. 21-26.
- [25] Szulc, J., 2019, *Możliwości techniczne napraw lub wzmocnienia budynków z wielkiej płyty*, <https://www.izolacje.com.pl/artykul/termomodernizacja/189113,mozliwosci-techniczne-napraw-lub-wzmocnienia-budynkow-z-wielkiej-plyty> (dostęp: 16.02.2025).
- [26] Wójtowicz, M., 2014, *Trwałość budynków wielkopłytowych w świetle badań*, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Warsztat pracy rzeczoznawcy Budowlanego”, Kielce-Cedzyna, pp. 444-454.
- [27] Zańko-Gulczyński, P., 2019, *Wielka płyta wciąż jest popularna. Dlaczego chcemy mieszkać w blokach z wielkiej płyty?*, <https://dziennikpolski24.pl/wielka-plyta-wciaz-jest-popularna-dlaczego-chcemy-mieszkac-w-blokach-z-wielkiej-plyty/ar/c9-14387275> (dostęp: 16.02.2025).

ŹRÓDŁA INTERNETOWE/ONLINE SOURCES

- [1] European Commission, *Recovery plan for Europe*, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/recovery-plan-europe_en (dostęp: 16.02.2025).
- [2] Google maps - view, <https://www.google.com/maps>, Location of object: 51.404184, 21.177314 (dostęp: 16.02.2025).