

dr hab. inż. Anna Ostańska, prof. PL¹⁾

ORCID: 0000-0002-1789-4288

dr hab. inż. Anna Życzynska, prof. PL^{1*)}

ORCID: 0000-0003-3435-3392

mgr inż. Grzegorz Dyś²⁾

ORCID: 0009-0006-8806-0877

Analysis of energy effects and costs thermomodernization of operating residential buildings in WBLŻ system

Analiza efektów energetycznych i kosztów termomodernizacji eksploatowanych obiektów mieszkalnych w systemie WBLŻ

DOI: 10.15199/33.2024.07.05

Abstract. Data from the Central Statistical Office (January 2024) confirm that, in Poland, out of 6 million residential buildings, approximately 60,000 are constructed from prefabricated elements. This accounts for about 1% of the building stock and accommodates 10–12 million people. This corresponds to around 4 million dwellings [1]. The article presents a typical high-rise residential building, insulated 25 years ago [2], located in the Lublin region. The building is constructed from large-panel elements using the WBLŻ system. Technical improvements feasible for implementation were proposed to reduce the building's demand for energy for heating and ventilation, and six variants of these measures were developed. The energy performance of each variant was assessed and the associated implementation costs were estimated.

Keywords: prefabricated construction; thermal modernization; technical improvement; energy and investment costs.

Streszczenie. Dane GUS (styczeń 2024 r.) potwierdzają, że w Polsce, spośród 6 mln budynków mieszkalnych, ok. 60 tys. jest wykonanych z elementów prefabrykowanych. Stanowi to ok. 1% zasobu budynków i mieszka w nich 10–12 mln ludzi. Jest to ok. 4 mln lokali mieszkalnych [1]. W artykule przedstawiono typowy wysoki budynek mieszkalny ocieplony 25 lat temu [2], który znajduje się na Lubelszczyźnie. Budynek jest wykonany z elementów wielkowymiarowych w systemie WBLŻ. Zaproponowano możliwe do realizacji usprawnienia techniczne prowadzące do spadku zapotrzebowania budynku na energię do ogrzewania i wentylacji oraz utworzono z nich sześć wariantów. Oceniono efekty energetyczne w poszczególnych wariantach i oszacowano koszty ich realizacji.

Słowa kluczowe: budownictwo prefabrykowane; termomodernizacja; usprawnienie techniczne; koszty energetyczne i inwestycyjne.

In Poland, ensuring the safe use of a building is the responsibility of its owner or manager [3]. Between 1946 and 1992, multi-family housing constructed using large-panel systems accounted for approximately 30% of the residential stock [4]. The large-panel system (WBLŻ), colloquially referred to as the “Żerań brick”, was one of the first prefabricated systems used for building construction as early as the 1960s. In residential buildings, a transverse wall layout was most commonly applied, although longitudinal and cross layouts were also used. The system allowed for the construction of buildings up to sixteen storeys high. Wall blocks and floor slabs were 24 cm thick and incorporated internal longitudinal channels. Gable walls were constructed from wall blocks externally clad with a 12 or 14 cm layer of aerated concrete and finished with plaster. External curtain walls were made of 24 cm thick aerated concrete blocks. The system comprised approximately 200 prefabricated elements of various shapes and dimensions. The concept of the system continues to be implemented in various forms of hollow-core slabs, even in contemporary construction. Studies conducted on over 300 prefabricated buildings in the Mazowieckie,

W Polsce bezpieczne użytkowanie obiektu budowlanego należy do obowiązku właściciela lub zarządcy [3]. Udział budownictwa wielorodzinnego w systemie wielkoblokowym w latach 1946–92 wynosił ok. 30% [4]. System wielkoblokowy (WBLŻ), nazywany również potocznie „cegłą żerańską”, był jednym z pierwszych systemów prefabrykowanych, w którym wznoszono budynki już w latach sześćdziesiątych XX w. W budynkach mieszkalnych stosowano najczęściej poprzeczny układ ścian, ale występowały też układy podłużny i krzyżowy. Możliwe było wznoszenie budynków do szesnastu kondygnacji. Bloki ściennne i płyty stropowe mają grubość 24 cm i wewnętrzne kanały podłużne. Ściany szczytowe wykonywano z bloków ściennych obłożonych od strony zewnętrznej warstwą betonu komórkowego o grubości 12 lub 14 cm i wykończonych tynkiem. Oslonowe ściany zewnętrzne są wykonane z bloczków z betonu komórkowego o grubości 24 cm. W skład systemu wchodziło ok. 200 elementów prefabrykowanych o różnych kształtach i wymiarach. Idea systemu jest nadal realizowana w różnych odmianach płyt kanałowych, również w nowym budownictwie. Badania ponad trzystu budynków prefabrykowanych w województwach: mazowieckim, łódzkim, śląskim i dolnośląskim przeprowadzone przez Instytut Techniki Budowlanej (ITB) [5, 6], potwierdziły, że większość budynków

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ ERG s.c.

^{*)} Adres do korespondencji: a.zyczynska@pollub.pl

Łódzkie, Śląskie and Dolnośląskie voivodeships by the Building Research Institute (ITB) [5, 6] confirmed that the majority of large-panel buildings are in good technical condition. Nevertheless, modernisation works involving reinforcement of the load-bearing structure and thermal insulation are required to enable their safe use for another 100–120 years. Consequently, existing large-panel buildings, following deep thermal modernisation, may remain in serviceable condition without issues until as late as 2080 [7]. Furthermore, banks provide mortgages for the purchase of dwellings in such buildings since the credit repayment period is shorter than their predicted safe service life. The analyses presented herein are also based on in-depth surveys of residents conducted through direct interviews in housing estates over the past twenty years [8]. The article presents an analysis of calculation results included in [2], which were also used in the implementation of a project under **Grant Agreement G-2304-66012**, finalised with the report [9].

Research

The objective of the study was to determine the degree of improvement in the annual energy demand indicators of an existing building for useful and final energy for heating and ventilation resulting from implemented thermal modernisation measures, as well as to define cost indicators associated with the implementation of these measures. The analysis covered a typical large-panel prefabricated building supplied with heat from a centralised district heating system via an individual dual-function heat exchanger and equipped with a central heating installation meeting the requirements of technical regulations.

The adopted **energy efficiency assessment method** considered the following aspects of the selected type of existing building: technical characteristics of the building; description of the large-panel technology; calculation assumptions for the heating system; description of the considered improvements and the variants developed; design calculations of the heating load; calculations of the building's useful and final energy demand for heating purposes; determination of energy indicators; estimation of construction costs together with cost indicators.

The study focused on an existing building constructed using the WBLŻ large-panel system. The calculation results were taken from the authors' own work [2]. Table 1 presents key information on the analysed building, including its operational parameters, dwelling structure, and the scope of thermal modernisation works already implemented. Table 2 contains the results of calculations of thermal transmittance coefficients for the building envelope elements forming the heat balance shell of the heated part of the building. The data presented in Tables 1 and 2 were derived from a review of archival design documentation and the authors' own expertise.

The article discusses **four thermal modernisation measures aimed at reducing heat consumption for space heating**. Improvements U1 and U2 concern the enhancement of the thermal insulation of building envelope components, whereas U3A and U3B address changes to the building's ventilation system. A detailed description of these measures is

wykonanych w technologii wielkowymiarowej jest w dobrym stanie technicznym. Należy jednak przeprowadzić w nich prace modernizacyjne polegające na wzmocnieniu konstrukcji nośnej i ociepleniu, aby mogły nadal być użytkowane 100–120 lat. Wynika z tego, że eksploatowane budynki wielkowymiarowe, po głębokiej termomodernizacji, mogą być użytkowane bezproblemowo nawet do 2080 roku [7]. Co więcej, banki udzielają kredytu na zakup mieszkania, ponieważ okres kredytowania, w latach jest mniejszy niż koniec bezpiecznego użytkowania tych budynków. Podstawę do analiz stanowią także dogłębne badania użytkowników, prowadzone w wywiadzie bezpośrednim, w osiedlach mieszkaniowych od ponad dwudziestu lat [8]. W artykule przedstawiono analizę wyników obliczeń zawartych w [2], które wykorzystano również do realizacji projektu na podstawie Umowy o **grant G-2304-66012**, zakończonego raportem [9].

Badania

Celem badań było określenie stopnia poprawy wskaźników rocznego zapotrzebowania eksploatowanego budynku na energię użytkową oraz końcową do ogrzewania i wentylacji z tytułu wprowadzonych usprawnień termomodernizacyjnych oraz określenie wskaźników kosztowych związanych z realizacją tych usprawnień. Analizą był objęty typowy budynek z prefabrykatów wielkowymiarowych, zasilany w ciepło ze scentralizowanego systemu ciepłowniczego przez indywidualny dwufunkcyjny węzeł cieplny oraz wyposażony w centralną instalację grzewczą spełniającą wymagania warunków technicznych.

Przyjęta **metoda efektywności energetycznej** uwzględnia następujące zagadnienia dotyczące wybranego typu eksploatowanego budynku: charakterystyka techniczna budynku; opis technologii wielkowymiarowej; założenia do obliczeń dotyczące systemu grzewczego; opis rozpatrywanych usprawnień i utworzonych wariantów; obliczenia projektowego obciążenia cieplnego; obliczenia zapotrzebowania budynku na energię użytkową i końcową na cele ogrzewania; wyznaczenie wskaźników energetycznych; oszacowanie kosztów robót budowlanych wraz z wyznaczeniem wskaźników kosztowych.

Rozpatrywano eksploatowany budynek wykonany w systemie wielkoblokowym WBLŻ. Wyniki obliczeń zaczerpnięto z autorskiego opracowania [2]. W tabeli 1 zamieszczono podstawowe informacje dotyczące rozpatrywanego budynku, jego parametry użytkowe, strukturę mieszkań, a także zakres dotychczas zrealizowanych usprawnień termomodernizacyjnych. Tabela 2 zawiera wyniki obliczeń współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych tworzących osłonę bilansową ogrzewanej części budynku. Źródło informacji zawartych w tabelach 1 i 2 stanowiła kwerenda archiwalnej dokumentacji projektowej i własna wiedza autorów publikacji. W artykule omówiono **cztery usprawnienia termomodernizacyjne, które mają prowadzić do zmniejszenia zużycia ciepła do ogrzewania budynku**. Usprawnienia U1 i U2 dotyczą poprawy izolacyjności cieplnej przegród budowlanych, natomiast U3A i U3B zmian systemu wentylacji pomieszczeń w budynku. Szczegółowy opis usprawnień zawiera tabela 3.

Table 1. General characteristics of the building

Tabela 1. Charakterystyka ogólna budynku

Specification / Wyszczególnienie	Description / Opis
Building designation / Oznaczenie budynku	WBLŻ
Building type / Rodzaj budynku	residential, multi-family, high-rise – 11 storeys / mieszkalny, wielorodzinny, wysoki – 11 kondygnacji
Construction technology / Technologia wykonania budynku	large-panel system, WBLŻ (“Żerań brick”) / wielkowymiarowy, WBLŻ (cegła żerańska)
Year of construction / Rok budowy	1975
Usable floor area of dwellings [m ²] / Powierzchnia użytkowa mieszkań [m ²]	2,855.62
Heated floor area [m ²] / Powierzchnia ogrzewana [m ²]	3,513.12
Conditioned volume [m ³] – A_f / Kubatura o regulowanej temperaturze [m ³] – A_f	8,782.80
Number of dwellings / Liczba mieszkań	55; including: M2 – 11; M3 – 11; M4 – 11; M5 – 11; M6 – 11 / 55; w tym: M2 – 11; M3 – 11; M4 – 11; M5 – 11; M6 – 11
Year and scope of thermal modernisation / Rok i zakres termomodernizacji	2000; additional insulation of external walls with polystyrene (thermal conductivity $\lambda = 0.045$ W/m·K, thickness $d = 5$ cm) / 2000 r.; dodatkowe docieplenie ścian zewnętrznych styropianem o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda = 0,045$ W/m·K i grubości $d = 5$ cm
Ventilation type / Rodzaj wentylacji	natural (gravitational) ventilation / grawitacyjna
Inflow of fresh air / Napływ powietrza świeżego	window and external door infiltration / nieszczelności w oknach i drzwiach zewnętrznych
Exhaust of stale air / Wyciąg powietrza zużytego	ventilation ducts in kitchens and bathrooms / kanały wentylacyjne w kuchni i łazience

Table 2. Thermal transmittance of building partitions – U [W/m²·K]Tabela 2. Współczynnik przenikania ciepła przegród budowlanych – U [W/m²·K]

Type of building envelope component / Rodzaj przegrody budowlanej	Value / Wartość
External walls / walls of machine room / Ściany zewnętrzne / ściany maszynowni	0.540; 0.528 / 1.121
Ventilated flat roof / flat roof above machine room / Stopodach wentylowany / stropodach nad maszynownią	0.224 / 1.029
Floor above unheated basement / Strop nad piwnicą nieogrzewaną	0.897
Windows in dwellings (average value weighted by window area) / Okna w mieszkaniach (wartość średnia wg udziału okien)	1.5
Windows in stairwells / Okna na klatkach schodowych	1.5
External doors / Drzwi zewnętrzne	1.8

Table 3. Characteristics of thermomodernization improvements

Tabela 3. Charakterystyka usprawnień termomodernizacyjnych

Specification / Wyszczególnienie	Description / Opis
Additional insulation of external walls (adding a supplementary layer of thermal insulation to the existing one); additional insulation of the flat roof; insulation of the floor above the basement. / Dodatkowe docieplenie ścian zewnętrznych (dołożenie, do już istniejącej, dodatkowej warstwy materiału izolacyjnego), dodatkowe docieplenie stropodachu, docieplenie stropu nad piwnicą.	U1
Removal of existing external wall insulation and re-insulation with a new layer of thermal insulation; additional insulation of the flat roof; insulation of the floor above the basement. / Usunięcie ze ścian zewnętrznych warstwy ocieplenia, a następnie ponowne docieplenie tych przegród warstwą izolacji, dodatkowe docieplenie stropodachu, docieplenie stropu nad piwnicą	U2
Installation of individual centralised mechanical ventilation systems with heat recovery (MVHR) in each dwelling. / Wyposażenie każdego mieszkania w budynku w indywidualny system centralnej wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (rekuperacja)	U3A
Installation of room-based mechanical ventilation units with heat recovery in external walls of living rooms and kitchens, and a separate heat recovery unit in bathrooms. / Wyposażenie każdego pomieszczenia w mieszkaniu (pokoju i kuchni) w urządzenia wentylacyjne z odzyskiem ciepła, montowane w ścianach zewnętrznych oraz wyposażenie łazienki w urządzenie wentylacyjne z odzyskiem ciepła	U3B

Note: Additional insulation of building envelope components will be carried out to ensure compliance with the technical requirements for thermal transmittance (U-values). Replacement of external joinery was not considered; U-values remain as shown in Table 2.

Uwaga: dodatkowe docieplenie przegród budowlanych nastąpi w sposób umożliwiający spełnienie wymagań Warunków technicznych dotyczących współczynnika przenikania ciepła (U). Nie uwzględniano wymiany stolarki zewnętrznej, współczynniki U wg tabeli 2.

provided in Table 3.

Based on the improvements described in Table 3, **six thermal modernisation variants** for the analysed building were developed, as indicated in Table 4. The first two variants, designated W1 and W2, concern only modifications to the heat balance envelope of the heated part of the building. The remaining four variants (W3–W6) additionally include improvements related to modifications of the building's room ventilation system.

Table 4. List of variants
Tabela 4. Wykaz wariantów

Lp.	Improvement designation / Oznaczenie usprawnienia	Variant designation / Oznaczenie wariantu
1	U1	W1
2	U2	W2
3	U1 and U3A / U1 i U3A	W3
4	U1 and U3B / U1 i U3B	W4
5	U2 and U3A / U2 i U3A	W5
6	U2 and U3B / U2 i U3B	W6

Research results

Demand for useful energy for heating and ventilation – existing state. Table 5 presents the results of the authors' calculations for the design heating load and the building's demand for useful energy for heating and ventilation **in its existing state**. The calculations [2] were carried out using standards [10÷15], regulations [16, 17], and software [18], based on the following assumptions:

- climate zone: III according to the Polish classification;
- design outdoor air temperature: -20°C ;
- meteorological station: Lublin Radawiec;
- design indoor temperature for the heated zone: 20°C ;
- air exchange rate in the heated zone: 0.7 h^{-1} ;
- thermal transmittance values of building envelope components as specified in Table 2;
- building geometry according to archival design documentation.

The annual indicator of the building's demand for useful energy for heating and ventilation was calculated using formula (1):

$$EU_H = \frac{Q_{H,nd}}{A_f} \quad (1)$$

where:

$Q_{H,nd}$ – annual demand for useful energy for heating and ventilation [kWh/year]

A_f – conditioned floor area [m^2]

Useful energy – post-modernisation state.

Table 6 summarises the calculation results for the annual demand for useful energy, the annual useful energy demand indicator, and the heating load indicator for each of the considered variants. In the calculations for variants W3–W6, it was assumed that the heat recovery

Na podstawie usprawnień opisanych w tabeli 3 utworzono **6 wariantów termomodernizacji** badanego obiektu wg oznaczeń w tabeli 4. Dwa pierwsze warianty oznaczone jako W1 i W2 dotyczą tylko zmian w osłonie bilansowej ogrzewanej części budynku. Natomiast pozostałe cztery (W3–W6) obejmują dodatkowo usprawnienia związane ze zmianami systemu wentylacji pomieszczeń w budynku.

Wyniki badań

Zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji – stan istniejący. W tabeli 5 podano wyniki obliczeń własnych projektowego obciążenia cieplnego oraz zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji **w stanie istniejącym**. Do obliczeń [2] wykorzystano normy [10÷15], rozporządzenia [16, 17] i oprogramowanie [18] oraz przyjęto następujące założenia:

- strefa klimatyczna: III wg podziału Polski;
- temperatura obliczeniowa powietrza zewnętrznego: -20°C ;
- stacja meteorologiczna: Lublin Radawiec;
- temperatura obliczeniowa wewnętrzna strefy ogrzewanej budynku: 20°C ;
- krotność wymiany powietrza w strefie ogrzewanej: $0,7\text{ l/h}$;
- wartości współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych wg tabeli 2;
- geometria budynków wg projektowej dokumentacji archiwalnej.

Wskaźnik rocznego zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji obliczono ze wzoru (1):

$$EU_H = \frac{Q_{H,nd}}{A_f} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{H,nd}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji [kWh/rok]

A_f – powierzchnia o regulowanej temperaturze [m^2]

Energia użytkowa – stan po termomodernizacji.

W tabeli 6 zestawiono wyniki obliczeń rocznego zapotrzebowania budynku na energię użytkową, wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię użytkową i wskaźnika obciążenia cieplnego w poszczególnych wariantach. Obliczenia w wariantach W3–W6 wykonano przy założeniach, że w każdym

Table 5. Utility energy needs demand – existing condition
Tabela 5. Zapotrzebowanie na energię użytkową – stan istniejący

Specification / Wyszczególnienie	Designation / Oznaczenie	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Design heating load of the building / Projektowe obciążenie cieplne budynku	Φ_{HL}	kW	202.6
Heating load indicator / Wskaźnik obciążenia cieplnego	ϕ_{HL}	kW/m^2	0.058
Annual demand for useful energy for heating and ventilation / Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$Q_{H,nd}$	$\text{kWh}/\text{year} / \text{kWh}/\text{rok}$	277,450
		$\text{GJ}/\text{year} / \text{GJ}/\text{rok}$	998.82
Annual indicator of demand for useful energy for heating and ventilation / Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	EU_H	$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{year} / \text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$	78.98

Table 6. Utility energy demand after thermomodernization, according to the variant of improvements

Tabela 6. Zapotrzebowanie na energię użytkową po termomodernizacji, wg wariantów usprawnień

Specification / Wyszczególnienie	Designation / Oznaczenie	Unit / Jednostka	Variant / Wariant			
			W1	W3 and W4 / W3 i W4	W2	W5 and W6 / W5 i W6
Design heating load of the building / Projektowe obciążenie cieplne budynku	Φ_{HL}	kW	159,41	148,66	159,86	149,11
Heating load indicator / Wskaźnik obciążenia cieplnego	ϕ_{HL}	kW/m ²	0.05	0.04	0.05	0.04
Annual demand for useful energy for heating and ventilation / Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$Q_{H,nd}$	kWh/year / kWh/rok	179,938	144,720	180,876	145,626
		GJ/ year / GJ/rok	647.78	520.99	651.15	524.26
Annual indicator of demand for useful energy for heating and ventilation / Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	EU_H	kWh/m ² · year / kWh/m ² · rok	51.22	41.19	51.49	41.45
Reduction in design heating load / Spadek projektowego obciążenia cieplnego	$\Delta\Phi_{HL}$	kW	43.23	53.98	42.78	53.53
		%	21.30	26.60	21.10	26.40
Reduction in annual demand for useful energy for heating and ventilation / Spadek rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$\Delta Q_{H,nd}$	kWh/ year / kWh/rok	97,512	132,730	96,574	131,824
		GJ/ year / GJ/rok	351.04	477.83	347.67	474.56
		%	35.10	47.80	34.80	47.50
Reduction in annual indicator of demand for useful energy for heating and ventilation / Zmniejszenie wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	ΔEU_H	kWh/m ² · year / kWh/m ² · rok	27.76	37.78	27.49	37.52
		%	35.10	47.80	34.80	47.50

efficiency is identical in all solutions and that the ventilation air flow rate remains unchanged. Table 6 also includes the reduction in the building's demand for useful energy, expressed both in energy units and as a percentage.

Final energy demand for heating and ventilation. To calculate the building's demand for final energy and compare the obtained results, the average seasonal efficiency of the heating system was adopted based on [17] and is provided in Table 7 along with a detailed description of the heating system components. It was assumed that there are no interruptions in heating during the week or day; therefore, the coefficients w_t and w_d were taken as 1.0.

The described heating system is typical for many buildings constructed using the WBLŻ technology located throughout Poland.

Final energy – existing state. The demand for final energy for heating and ventilation and the annual indicator of final energy demand (EK_H) were calculated using formulae (2)÷(4):

$$Q_{k,H} = \frac{Q_{H,nd} \cdot w_t \cdot w_d}{\eta_{H,tot}} \quad (2)$$

$$\eta_{H,tot} = \eta_{H,g} \cdot \eta_{H,d} \cdot \eta_{H,e} \cdot \eta_{H,s} \quad (3)$$

$$EK_H = \frac{Q_{k,H}}{A_f} \quad (4)$$

Table 8 presents the authors' calculation results for the demand of the WBLŻ building for final energy for heating and ventilation in its existing state.

rozwiązaniu sprawność odzysku ciepła jest taka sama, a wielkość strumienia wentylacyjnego nie ulega zmianie. Tabela 6 zawiera również wielkość spadku zapotrzebowania budynku na energię użytkową wyrażoną w jednostkach energii i procentach.

Zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania i wentylacji. W celu przeprowadzenia obliczeń zapotrzebowania budynku na energię końcową i porównania uzyskanych wyników, wartości średniej sezonowej sprawności systemu grzewczego przyjęto na podstawie [17] i podano w tabeli 7 wraz ze szczegółowym opisem elementów systemu ogrzewania. Przyjęto założenie, że nie występują przerwy w ogrzewaniu w okresie tygodnia i doby, dlatego wartości współczynników w_t oraz w_d są równe 1,0.

Opisany system grzewczy jest typowy w przypadku wielu budynków wykonanych w technologii WBLŻ zlokalizowanych na terenie całej Polski.

Energia końcowa – stan istniejący. Zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania i wentylacji oraz wskaźnik rocznego zapotrzebowania na tę energię (EK_H) obliczono ze wzorów 2÷4:

$$Q_{k,H} = \frac{Q_{H,nd} \cdot w_t \cdot w_d}{\eta_{H,tot}} \quad (2)$$

$$\eta_{H,tot} = \eta_{H,g} \cdot \eta_{H,d} \cdot \eta_{H,e} \cdot \eta_{H,s} \quad (3)$$

$$EK_H = \frac{Q_{k,H}}{A_f} \quad (4)$$

W tabeli 8 zamieszczono wyniki obliczeń własnych dotyczące zapotrzebowania budynku WBLŻ na energię końcową do ogrzewania i wentylacji w stanie istniejącym.

Table 7. Coefficients to account for heating intervals and seasonal average heating system efficiencies

Tabela 7. Współczynniki uwzględniające przerwy w ogrzewaniu i średnie sezonowe sprawności systemu ogrzewania

Specification / Wyszczególnienie	Description / Opis	Designation / Oznaczenie	Value / Wartość
Coefficients accounting for heating interruptions / Współczynniki uwzględniające przerwy w ogrzewaniu			
During the week / W okresie tygodnia	Heating operated 7 days a week / Czas ogrzewania 7 dni w tygodniu	w_t	1.00
During the day / W okresie doby	Continuous heating; no devices for individual heat cost allocation (e.g., cost allocators, individual heat meters) / Ogrzewanie bez przerw; brak urządzeń do indywidualnego rozliczania kosztów ogrzewania (np. podzielniki kosztów, indywidualne ciepłomierze)	w_d	1.00
Average seasonal efficiency / Średnia sezonowa sprawność			
Heat generation from energy supplied to the heat source / Wytwarzanie ciepła z energii dostarczonej do źródła ciepła	Compact district heating substation without casing, nominal capacity above 100 to 300 kW / Węzeł ciepłowniczy kompaktowy bez obudowy o mocy nominalnej powyżej 100 do 300 kW	$\eta_{H,g}$	0.93
Heat distribution from the heat source to the heated space / Przesyłanie ciepła ze źródła ciepła do przestrzeni ogrzewanej	Central water-based heating system with a local heat source located within the heated building; insulated pipes, fittings and devices installed in unheated spaces / Ogrzewanie centralne wodne z lokalnego źródła ciepła usytuowanego w ogrzewanym budynku, z zaizolowanymi przewodami, armaturą i urządzeniami, które są zainstalowane w przestrzeni nieogrzewanej	$\eta_{H,d}$	0.90
Heat regulation and utilisation in the heated space / Regulacja i wykorzystanie ciepła w przestrzeni ogrzewanej	Water-based heating with sectional or panel radiators; central and local regulation with proportional thermostatic valves (proportionality range P-2K) / Ogrzewanie wodne z grzejnikami członowymi lub płytowymi, regulacja centralna i miejscowa z zaworami termostatycznymi o działaniu proporcjonalnym z zakresem proporcjonalności P-2K	$\eta_{H,e}$	0.88
Heat storage in thermal capacity elements of the heating system / Akumulacja ciepła w elementach pojemnościowych systemu ogrzewania	No heat storage tank in the heating system / Brak zasobnika ciepła w systemie ogrzewania	$\eta_{H,s}$	1.00
Average total seasonal efficiency of the heating system / Średnia sezonowa sprawność całkowita systemu ogrzewania		$\eta_{H,tot}$	0.737

Final energy – post-modernisation state.

The calculations for the building's demand for final energy in the post-modernisation state for each variant were carried out using formulae (2)–(4). Table 9 contains the authors' calculation results for the WBLŻ building.

Energy indicators.

Table 10 summarises the calculation results for the energy effects and energy indicator values achieved in each variant following the implementation of the proposed thermal modernisation measures.

Costs of construction works. The summary of costs for the proposed measures in each variant of the analysed WBLŻ building and the associated cost indicators was prepared based on cost estimates and the obtained results regarding energy savings. The costs include an 8% VAT on materials and services. Table 11 presents the calculation results in relation to the useful energy savings from Table 10. The cost indicator [PLN/GJ] was calculated as the quotient of these values. The

Table 8. Summary of final energy demand for heating and ventilation

Tabela 8. Zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania i wentylacji

Specification / Wyszczególnienie	Designation / Oznaczenie	Unit / Jednostka	Value / Wartość
Annual demand for final energy for heating and ventilation / Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$Q_{K,H}$	kWh/year / kWh/rok	376,459
		GJ/year / GJ/rok	1,355.25
Annual indicator of final energy demand for heating and ventilation / Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$E_{K,H}$	kWh/m ² · year / kWh/m ² · rok	106.16

Energia końcowa – stan po termomodernizacji. Obliczenia zapotrzebowania budynku na energię końcową w stanie po termomodernizacji w poszczególnych wariantach wykonano, wykorzystując wzory 2–4. W tabeli 9 zamieszczono wyniki obliczeń własnych dotyczące budynku WBLŻ.

Wskaźniki energetyczne.

W tabeli 10 zestawiono uzyskane w poszczególnych wariantach, wyniki obliczeń efektów energetycznych i wartości wskaźników energetycznych po przeprowadzeniu proponowanych usprawnień termomodernizacyjnych.

Koszty realizacji robót budowlanych. Zestawienie kosztów robót proponowanych usprawnień w danym wariancie rozpatrywanego budynku WBLŻ i wskaźników kosztów sporządzono na podstawie kosztorysów oraz uzyskanych wyników obliczeń dotyczących oszczędności energii. Koszty zawierają podatek VAT od materiałów i usług 8%. W tabeli 11 podano wyniki obliczeń w odniesieniu do oszczędności energii użytkowej z tabeli 10. Wskaźnik kosztów [zł/GJ]

Table 9. Final energy demand after thermal upgrading, according to the variant of improvements

Tabela 9. Zapotrzebowanie na energię końcową po termomodernizacji w poszczególnych wariantach

Specification / Wyszczególnienie	Designation / Oznaczenie	Unit / Jednostka	Variant / Wariant			
			W1	W3 and W4 / W3 i W4	W2	W5 and W6 / W5 i W6
Annual demand for final energy for heating and ventilation / Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$Q_{K,H}$	kWh/year / kWh/rok	244,149	196,364	245,422	197,593
		GJ/year / GJ/rok	878.94	706.91	883.51	711.34
Annual indicator of final energy demand for heating and ventilation / Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	EK_H	kWh/m ² · year / kWh/m ² · rok	69.50	55.89	69.86	56.24
Reduction in annual demand for final energy for heating and ventilation / Spadek rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$\Delta Q_{K,H}$	kWh/year / kWh/rok	132,310	180,095	131,037	178,866
		GJ/year / GJ/rok	476.31	648.34	471.74	643.91
		%	35.10	47.80	34.80	47.50
Reduction in the annual useful energy demand indicator for heating and ventilation / Zmniejszenie wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	ΔEK_H	kWh/m ² · year / kWh/m ² · rok	37.66	51.26	37.30	50.91
		%	35.10	47.80	34.80	47.50

Table 10. Summary of energy effects and indicators

Tabela 10. Zestawienie efektów i wskaźników energetycznych

Variant designation / Oznaczenie wariantu usprawnień W_i	Useful energy savings for heating and ventilation / Oszczędność energii użytkowej do ogrzewania i wentylacji [GJ/year] / [GJ/rok]	Final energy savings for heating and ventilation / Oszczędność energii końcowej do ogrzewania i wentylacji [GJ/year] / [GJ/rok]	Reduction in building energy demand for heating and ventilation / Zmniejszenie zapotrzebowania budynku na energię do ogrzewania i wentylacji [%]	Annual useful energy demand for heating and ventilation indicator – EU_H / Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji – EU_H [kWh/m ² · year] / [kWh/m ² · rok]	Annual final energy demand for heating and ventilation indicator – EK_H / Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania i wentylacji – EK_H [kWh/m ² · year] / [kWh/m ² · rok]
W1	351.04	476.31	35.10	51.22	69.50
W2	347.67	471.74	34.80	51.49	69.86
W3 and W4 / W3 i W4	477.83	648.34	47.80	41.19	55.89
W5 and W6 / W5 i W6	474.56	643.91	47.50	41.45	56.24

Table 11. Summary of costs and cost indicators

Tabela 11. Zestawienie kosztów i wskaźników kosztowych

Variant designation / Oznaczenie wariantu usprawnień W_i	Total gross cost of construction works / Koszty całkowite brutto robót budowlanych [PLN] / [zł]	Cost indicator per 1 m ² of heated floor area / Wskaźnik kosztów całkowitych robót na 1 m ² powierzchni ogrzewanej budynku [PLN/m ²] / [zł/m ²]	Cost indicator per unit of saved useful energy / Wskaźnik kosztów całkowitych na jednostkę zaoszczędzonej energii użytkowej [PLN/GJ] / [zł/GJ]	Cost indicator per unit of saved final energy / Wskaźnik kosztów całkowitych na jednostkę zaoszczędzonej energii końcowej [PLN/GJ] / [zł/GJ]
W1	1,101,720	313	3,138	2,313
W2	2,009,630	572	5,780	4,260
W3	1,935,520	550	4,051	2,985
W4	1,860,060	529	3,893	2,869
W5	2,843,430	809	5,992	4,416
W6	2,767,970	788	5,833	4,299

analysis does not consider the durability of the equipment and materials used for thermal modernisation. The thermal modernisation cost indicator is also provided per 1 m² of heated usable floor area.

Discussion of research results

The description of comprehensive deep thermal modernisation measures is considered optimal in terms of both scope and costs [19]. Their implementation undoubtedly delivers economic, environmental, and social benefits [19÷21]. However, previous improvements were generally not combined with modifications to the natural (gravitational) ventilation system. The analysis of the authors' research results confirmed that thermal modernisation measures limited to improving the thermal insulation of building envelope components (variants W1÷W2) resulted in a reduction of the building's annual heating demand (useful and final energy) by approximately 35%. In contrast, variants W3÷W6, which incorporated supply and exhaust ventilation with heat recovery, achieved an additional 12% reduction in energy demand. This contributed to expanding the knowledge base on reducing thermal energy consumption in existing buildings constructed using the WBLŻ system.

It was further found that the proposed reduction in thermal transmittance coefficients of the building envelope components decreases the design heating load of the building (power demand) by approximately 21% (variants W1 and W2). By replacing the natural ventilation system with a supply and exhaust ventilation system incorporating heat recovery, the level of energy savings increased by an additional 5%. The total cost indicator for construction works per unit of conditioned floor area [m²] is highly variable, ranging from PLN 313 to PLN 809. This directly results from the adopted variant, i.e., the scope and type of the considered construction works.

The total cost indicator for construction works per unit of saved useful energy amounts to PLN 3,138–5,992/GJ, while for final energy it ranges from PLN 2,313–4,416/GJ. Variant W1, which involves the smallest scope of interventions, exhibits the lowest cost indicators, whereas variant W5, which includes the removal of wall insulation and external joinery, installation of prefabricated walls in a timber frame, and replacement of the natural ventilation system with a centralised supply and exhaust mechanical ventilation system with heat recovery in each dwelling, shows the highest cost indicators. It was assumed in the study that the ventilation air flow rate and heat recovery efficiency remain unchanged. As a result, it was found that the solution involving the installation of individual supply and exhaust mechanical ventilation systems with heat recovery in each room of a dwelling is 3–4% less expensive.

The removal of the existing wall insulation and external joinery significantly increases the total costs of modernisation works. This is evidenced by the comparison of unit cost indicators between variant W1 and W2 (approximately 80%), variant W3 and W5 (approximately 47%), and variant W4 and

obliczono jako iloraz tych wartości. W analizie nie uwzględniano trwałości urządzeń i materiałów użytych do termomodernizacji. Wskaźnik kosztów termomodernizacji podano również w odniesieniu do 1 m² ogrzewanej powierzchni użytkowej.

Dyskusja wyników badań

Opis działań kompleksowej głębokiej termomodernizacji ma charakter optymalny co do zakresu i kosztów [19]. Ich realizacja przynosi niewątpliwie korzyści ekonomiczne, środowiskowe i społeczne [19÷21]. Dotychczasowe usprawnienia nie były jednak zwykle łączone ze zmianą grawitacyjnego systemu wentylacji. Analiza autorskich wyników badań potwierdziła, że efektem usprawnień termomodernizacyjnych, obejmujących jedynie poprawę izolacyjności cieplnej przegród budowlanych (warianty W1÷W2), jest zmniejszenie rocznego zapotrzebowania budynku na ciepło do ogrzewania (energia użytkowa i końcowa) o ok. 35%. Z kolei w wariantach W3÷W6, uwzględniających wentylację nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła, uzyskano zmniejszenie zapotrzebowania na energię o dodatkowe 12%, co umożliwiło uzupełnienie wiedzy dotyczącej zmniejszenia zużycia energii cieplnej w eksploatowanym budynku wykonanym w systemie WBLŻ.

Ponadto stwierdzono, że zaproponowane ograniczenie współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych zmniejsza projektowe obciążenie cieplne budynku (zapotrzebowanie na moc) o ok. 21% (wariant W1 i W2), a dzięki zastąpieniu wentylacji grawitacyjnej systemem nawiewno-wywiewnym z odzyskiem ciepła poziom oszczędności zwiększył się o dalsze 5%.

Wskaźnik kosztów całkowitych robót budowlanych w przeliczeniu na jednostkę powierzchni o regulowanej temperaturze [m²] jest bardzo zróżnicowany i wynosi 313–809 zł. Wynika to bezpośrednio z przyjętego wariantu, czyli zakresu i rodzaju rozpatrywanych robót budowlanych.

Wskaźnik kosztów całkowitych robót budowlanych w przeliczeniu na jednostkę zaoszczędzonej energii użytkowej wynosi 3138–5992 zł/GJ, natomiast w odniesieniu do energii końcowej 2313–4416 zł/GJ. Najniższymi wskaźnikami kosztowymi charakteryzuje się wariant W1 o najmniejszym zakresie działań, a najwyższymi wariant W5, w zakres którego wchodzi działania obejmujące demontaż izolacji ścian i stolarki zewnętrznej oraz montaż ścian prefabrykowanych w szkieletie drewnianym i wymianę wentylacji grawitacyjnej na centralny system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła w każdym lokalu. W opracowaniu założono, że nie ulega zmianie wielkość powietrza strumienia wentylacyjnego i sprawność odzysku ciepła (jest na tym samym poziomie). W efekcie stwierdzono, że rozwiązanie z zastosowaniem systemu indywidualnej wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła, w każdym pomieszczeniu danego lokalu mieszkalnego, jest tańsze o 3–4%.

Demontaż warstwy izolacji ścian i stolarki zewnętrznej znacznie podnosi całkowite koszty robót modernizacyjnych, co wynika z porównania wskaźników jednostkowych w wariantach W1 ze wskaźnikami wariantu W2 (ok. 80%), wariantu W3 z wariantem W5 (ok. 47%), a także wariantu W4

W6 (approximately 49%). Nevertheless, such measures could contribute to achieving the EnerPHit standard (thermal energy consumption $\leq 25 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{year}$).

The adopted methodology enabled the determination of two key indicators for the investor: the thermal modernisation cost indicator per 1 m^2 of conditioned floor area, and the cost indicator per unit of saved energy. The former facilitates the estimation of investment costs for thermal modernisation in other buildings constructed using the same technology. The latter provides an approximation of the investment costs required to achieve specific energy performance improvements. Based on these indicators, and taking into account energy rates and charges, it is possible to make a preliminary assessment of the cost-effectiveness of the proposed thermal modernisation measures.

Conclusions

1. The proposed method has addressed a research gap concerning the determination of energy savings in existing buildings constructed from large-panel elements using the WBLŻ system. This gap relates to the combination of typical thermal modernisation measures (improving the thermal insulation of external partitions) with the potential modification of ventilation systems (from natural to mechanical).

2. The analysis, based on the results of the adopted procedure, confirmed that the implementation of supply and exhaust mechanical ventilation systems with heat recovery has a significant impact on reducing thermal energy consumption in existing buildings, which may serve as a starting point for efforts to achieve the EnerPHit standard.

3. Further research should consider variations in ventilation air flow rates and the efficiencies of specifically selected ventilation devices to determine their influence on the building's energy indicators.

4. The future research direction in the evaluation of thermal modernisation measures should include the durability of equipment and materials used in a comprehensively designed thermal modernisation process, which may contribute to scientific advancements in this field.

5. The proposed energy efficiency assessment method and the adopted procedure could also be applied to address the research gap in estimating projected energy savings, evaluating changes in the building's energy indicators, and calculating cost indicators for existing multi-family buildings constructed using other technologies, including large-panel prefabricated systems.

Received: 03.03.2025

Revised: 21.05.2025

Published: 23.07.2025

z wariantem W6 (ok. 49%), ale jednocześnie może stanowić przyczynek do uzyskania standardu EnerPHit (zużycie energii cieplnej $\leq 25 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$).

Efektem przyjętej metody było określenie inwestorowi wskaźnika kosztów termomodernizacji w odniesieniu do 1 m^2 powierzchni budynku o regulowanej temperaturze oraz wskaźnika w odniesieniu do jednostki zaoszczędzonej energii. Pierwszy umożliwi oszacowanie kosztów inwestycji termomodernizacyjnej w przypadku innych budynków wykonanych w tej technologii. Drugi przybliży poziom kosztów inwestycyjnych, jakie należy ponieść, aby uzyskać odpowiednie efekty energetyczne. Na tej podstawie, znając stawki i opłaty za energię, możliwe będzie orientacyjne określenie opłacalności działań termomodernizacyjnych.

Wnioski

1. Zaproponowana metoda pozwoliła na uzupełnienie luki badawczej, dotyczącej określenia oszczędności energii w eksploatowanych budynkach z elementów wielkowymiarowych systemu WBLŻ, wynikającej z połączenia typowych usprawnień termomodernizacyjnych (poprawa izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych), poszerzonych o ewentualną zmianę wentylacji (z grawitacyjnej na mechaniczną).

2. Analiza badań, na podstawie wyników przyjętej w opracowaniu procedury potwierdziła, że zastosowanie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła ma istotny wpływ na zmniejszenie zużycia energii cieplnej w eksploatowanym budynku, co może być początkiem starań o standard EnerPHit.

3. W dalszych badaniach należy uwzględnić zmianę strumienia powietrza wentylacyjnego i sprawności konkretnie dobie-ranych urządzeń wentylacyjnych, co umożliwi określenie ich wpływu na wskaźniki energetyczne budynku.

4. Kierunek dalszych badań, w aspekcie oceny działań termomodernizacyjnych, powinien uwzględniać trwałość urządzeń i materiałów użytych w kompleksowo zaprojektowanym procesie termomodernizacji, co może przyczynić się do rozwoju nauki w tym zakresie.

5. Zaproponowana metoda badania efektywności energetycznej i przyjęta procedura mogłyby być wykorzystane do uzupełnienia luki badawczej, jaką jest określenie prognozowanych oszczędności energii, poziomu zmian wskaźników energetycznych budynku oraz oszacowania wskaźników kosztowych w eksploatowanych budynkach wielorodzinnych, zrealizowanych w innych technologiach, m.in. w wielkopłytkowych systemach prefabrykowanych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 21.05.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literatura

[1] Główny Urząd Statystyczny, opracowanie, Warunki mieszkaniowe w Polsce w świetle wyników Narodowego Spisu Ludności i Mieszkań 2021". Dostępny w styczniu 2024 r.

[2] Życzynska A, Dyś G. Efekty energetyczne i koszty termomodernizacji

przykładowych rozwiązań technicznych dla wybranych budynków wykonanych w technologii wielkopłytkowej. Opracowanie wykonane dla Polskiej Izby Budownictwa w Warszawie, sierpień 2024 r., recenzja Ostańska A, maszynopis, s. 1-163.

[3] Ustawa Prawo budowlane 7 lipca 1994, z późn. zm. art. 1.

- [4] Ostańska A. Podstawy metodologii tworzenia programów rewitalizacji dużych osiedli mieszkaniowych wzniesionych w technologii uprzemysłowionej na przykładzie osiedla im. St. Moniuszki w Lublinie, Politechnika Lubelska, Monografie Wydziału Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej Vol. 1, Wydawnictwa Uczelniane Lublin 2009.
- [5] Szulc J, Runkiewicz L, Geryło R, Możaryn T, Piekarczyk A, Wójtowicz M, Lamenta A, Mazurek A, Sieczkowski J, Strąg A, Warsicka D, Wojnowski D, Zięba W. Informacja dotycząca awarii i katastrof budowlanych w obszarze budownictwa uprzemysłowionego. ITB 2018, opracowanie powstało na podstawie analiz i badań ITB prowadzonych w ramach pracy, pt.: „Ocena bezpieczeństwa i trwałość budynków wykonanych metodami uprzemysłowionymi”.
- [6] Runkiewicz L, Szulc J, Sieczkowski J. Uprzemysłowione budownictwo mieszkaniowe. Dawne i obecne wymagania oraz oczekiwania. BUILDER 2021/09, DOI 10.5604/01.3001.0015.1957.
- [7] Praca zbiorowa, Budownictwo wielkopłytowe – Raport o stanie technicznym, <https://budowlaneabc.gov.pl> Dostępny maj 2025 r.
- [8] Ostańska A. Programowanie rewitalizacji osiedli mieszkaniowych z zastosowaniem modelu PEARS. Lublin: Polska Akademia Nauk, 2018. 169 s. ISBN 978-83-939534-4-8.
- [9] Praca zbiorowa. 10 milionów szans, czyli jak termomodernizować budynki z wielkiej płyty w Polsce – Raport Polskiej Izby Budownictwa, grudzień 2024 r.
- [10] PN-EN ISO 6946:2008 – Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [11] PN-EN 12831: Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
- [12] PN-EN 14683:2008 – Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [13] PN-EN ISO 13789:2008 – Ciepłne właściwości użytkowe budynków. Współczynniki przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację. Metoda obliczania.
- [14] PN-EN ISO 13790:2009 – Energetyczne właściwości budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.
- [15] PN-83/B-03430/Az3 2000 – Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania.
- [16] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. z 18.03.2015 r., poz. 376 z późn. zm.; Dz.U. z 4.01.2017 r., poz. 22; Dz.U. z 25.09.2019 r., poz. 1829; Dz.U. z 13.04.2023 r., poz. 697).
- [17] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie – obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu (Dz.U. z 9.06.2022 r., poz. 1225 z późn. zm. Dz.U. z 9.11.2023 r., poz. 2442; Dz.U. z 29.03.2024 r., poz. 474; Dz.U. z 14.05.2024 r., poz. 726).
- [18] Specjalistyczne oprogramowanie dedykowane sporządzaniu bilansu energetycznego budynku, tj. programu Audytor OZC 7.0 Pro firmy Sankom Sp. z o.o. z Warszawy.
- [19] Węglarz A, Zaborowski M. Strategia termomodernizacji budynków Polsce, Materiały Budowlane 2015;1:2–5.
- [20] Robakiewicz M. Ocena efektów zrealizowanych termomodernizacji, Materiały Budowlane, 2007;1:18–19.
- [21] Życzynska A. Analiza zmienności charakterystyki energetycznej na przykładzie budynku wielorodzinnego. <https://hdl.handle.net/20.500.14629/507>, Lublin 2019.