Original research paper (Oryginalny artykuł naukowy)
MATERIAŁY BUDOWLANE SCIENCE
materialybudowlane.info.pl/science

dr inż. Marcin Zygmunt[1)*)]
ORCID: 0000-0003-1304-8591
dr inż. Marek Jabłoński[1)]
ORCID: 0000-0001-5865-868X
dr inż. Piotr Konca[1)]
ORCID: 0000-0002-5415-5169
dr inż. Iwona Szer
ORCID: 0000-0002-7069-6950
dr hab. inż. Jacek Szer, prof. uczelni[1)]
ORCID: 0000-0002-7830-2952
prof. dr hab. inż. Dariusz Gawin[1)]
ORCID: 0000-0002-8240-4425

The comprehensive technical and energy performance assessment process of buildings within the design and implementation cycle

Kompleksowy proces oceny charakterystyki techniczno-energetycznej budynków w cyklu projektowo-wdrożeniowym

DOI: 10.15199/33.2026.10.08

Abstract. This paper presents a review of the comprehensive process for assessing the technical and energy performance of buildings within the design and implementation cycle. The proposed methodology is based on three key research pillars: 1) laboratory analysis of the physical properties of the used materials, 2) advanced numerical simulations of the entire building, and 3) final in-situ validation on a completed prototype. The effectiveness of this multicriterial approach is discussed using the example of an innovative, portable mobile house. The results demonstrate that only the synergy of laboratory analyses, computer simulations, and real-condition measurements enables reliable verification of workmanship quality, optimization of building systems, and ensures an optimal energy standard for buildings, particularly for unconventional structures. The present study bridges the research gap regarding the in-situ verification of the actual technical and energy performance of a specific building class (portable houses), where achieving adequate envelope airtightness is a critical implementation challenge.

Keywords: building energy performance: heat and mass transfer; energy modeling and optimization; building assessment; building and material measurements.

Streszczenie. Artykuł stanowi przegląd kompleksowego procesu oceny charakterystyki techniczno-energetycznej budynków w cyklu projektowo-wdrożeniowym. Zaprezentowana metodyka opiera się na trzech kluczowych filarach badawczych: 1) laboratoryjnej analizie właściwości fizycznych materiałów; 2) zaawansowanych symulacjach numerycznych całego obiektu oraz 3) końcowej walidacji in situ na wybudowanym prototypie. Skuteczność tego wieloaspektowego podejścia omówiono na przykładzie innowacyjnego, rozkładanego domu mobilnego. Wyniki badań wykazują, że jedynie synergia analiz laboratoryjnych, symulacji komputerowych i pomiarów w warunkach rzeczywistych pozwala na rzetelną weryfikację jakości wykonawstwa, optymalizację systemów instalacyjnych oraz zapewnienie optymalnego standardu energetycznego budynków, szczególnie nietypowych obiektów kubaturowych. Artykuł wypełnia lukę badawczą dotyczącą weryfikacji rzeczywistej charakterystyki techniczno-energetycznej szczególnej kategorii budynków, tj. domów mobilnych, w przypadku których zapewnienie szczelności stanowi kluczowe wyzwanie wdrożeniowe.

Słowa kluczowe: charakterystyka energetyczna budynków; wymiana ciepła i masy; modelowanie i optymalizacja energetyczna; ocena techniczna budynków; pomiary budynków i materiałów.

Modern construction has at its disposal advanced technologies and design methods that enable the production of durable, energy-efficient, and environmentally friendly buildings [1]. Increasing demands regarding the quality of the indoor environment, in which people spend, on average, up to 90% of their time [2], mean that user comfort is becoming an evaluation criterion alongside a building's structural and energy parameters. Despite the widespread availability of modern solutions, their actual potential often remains unexploited. Both newly designed buildings and those undergoing thermal retrofitting are subject to the risk of errors arising during the design, construction, and operational phases [3]. This can result in reduced structural durability, high operating costs, or inade-

Współczesne budownictwo dysponuje zaawansowanymi technologiami i metodami projektowania, które umożliwiają wznoszenie obiektów trwałych, efektywnych energetycznie i przyjaznych środowisku [1]. Zwiększające się wymagania dotyczące jakości środowiska wewnętrznego, w którym człowiek spędza przeciętnie do 90% czasu [2], sprawiają, że komfort użytkowników staje się równorzędnym kryterium oceny budynku obok jego parametrów konstrukcyjnych i energetycznych. Mimo powszechnej dostępności nowoczesnych rozwiązań ich rzeczywisty potencjał pozostaje często niewykorzystany. Zarówno obiekty nowo projektowane, jak i poddawane termomodernizacji, obarczone są ryzykiem błędów pojawiających się na etapie projektowym, wykonawczym i użytkowym [3]. Skutkować to może zmniejszoną trwałością konstrukcji, dużymi kosztami eksploatacji lub niewystarczającą jakością mikroklimatu wewnętrznego. W obliczu zwiększających się kosztów energii i zaostrzających się

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Correspondence address: maricin.zygmunt@p.lodz.pl

quate indoor microclimate quality. Facing rising energy costs and increasingly stringent building standards, not only construction methods but also verification methods are becoming critical [4]. These methods allow for the assessment of a building's actual quality both in the pre-construction phase (ex-ante) and after completion (ex-post). Comprehensive technical and energy diagnostics, covering both existing and newly designed buildings, are therefore essential for meeting up-to-date construction quality standards [5].

A special category of buildings, in which these challenges are even more visible, consists of mobile buildings with a foldable structure that allows the entire building to be transported by road. The essence of such solutions lies primarily in the implementation-oriented nature of the innovation: the development of a procedure for folding and unfolding the building in a manner that ensures repeatable technical and energy performance after each assembly. It is crucial to ensure the airtightness of assembly joints after the structure has been unfolded, which directly affects energy consumption, the proper functioning of building systems, and the quality of the indoor microclimate. Studies of container buildings indicate that the assembly joints between panels are the main source of air infiltration and thermal bridges, and that sealing them significantly improves energy efficiency [6]. Furthermore, in the field of research on modular building envelope components, there is a lack of consistent terminology and standardized methods for evaluating the hygrothermal parameters of such solutions [7]. A similar gap exists regarding transportable structures, designed primarily for humanitarian aid, where existing analyses focus mainly on the process of their folding and unfolding, neglecting the verification of their actual technical and energy performance under operational conditions [8].

The literature lacks comprehensive analyses combining laboratory tests, numerical simulations, and in situ validation of foldable residential buildings intended for repeated assembly. The aim of this study is to evaluate the research methodology and to verify whether an innovative mobile home achieves technical and energy performance comparable to that of traditional single-family housing. This issue is gaining significance given the growing popularity of modular structures and the lack of standards and regulations for assessing their quality after assembly at the target site. The scientific value of this study lies in the integration of an innovative research subject with classical analytical and measurement methods, referenced to the normative requirements for norms applied for standard buildings.

Description of the analyzed mobile home

The examined building is a residential house designed to be folded for transport (Figure 1a). This technology was developed as part of a research and development project funded under the POIR program (in Polish: *Program Operacyjny Inteligentny Rozwój*) 2014-2020, project number 01.01.01-00-0935/19, titled "Mobilny, rozkładany obiekt budowlany MODEA-PACO". This innovative mobile home is a single-story residential building constructed using timber-frame

norm budowlanych kluczowego znaczenia nabierają nie tylko metody wykonawcze, ale także metody weryfikacyjne [4]. Pozwalają one ocenić rzeczywistą jakość obiektu zarówno w fazie przedrealizacyjnej (*ex ante*), jak i powykonawczej (*ex post*). Kompleksowa diagnostyka techniczno-energetyczna, obejmująca zarówno obiekty istniejące, jak i nowo projektowane, stanowi zatem warunek konieczny do spełnienia współczesnych standardów jakości budownictwa [5].

Szczególną kategorię obiektów budowlanych, w której wymienione wyzwania nabierają dodatkowego wymiaru, stanowią budynki mobilne o konstrukcji rozkładanej, umożliwiającej transport drogowy całego obiektu. Istotą tego typu rozwiązań jest przede wszystkim wdrożeniowy charakter innowacji, a więc opracowanie procedury składania i rozkładania budynku w sposób zapewniający powtarzalną jakość techniczno-energetyczną po każdym montażu. Kluczowe jest zapewnienie szczelności powietrznej połączeń montażowych po rozłożeniu konstrukcji, co bezpośrednio wpływa na zużycie energii, poprawność działania instalacji oraz jakość mikroklimatu wewnętrznego. Znajduje to potwierdzenie w literaturze przedmiotu. Badania budynków kontenerowych wskazują, że to połączenia montażowe paneli stanowią główne źródło infiltracji powietrza i mostków termicznych, a ich uszczelnienie istotnie poprawia efektywność energetyczną [6]. Ponadto w obszarze badawczym przegród modułowych brakuje spójnej terminologii i jednolitych metod oceny parametrów cieplno-wilgotnościowych tego typu rozwiązań [7]. Podobna luka dotyczy obiektów transportowalnych, projektowanych przede wszystkim z myślą o pomocy humanitarnej, gdzie dotychczasowe analizy koncentrują się głównie na procesie ich składania/rozkładania, pomijając weryfikację rzeczywistej charakterystyki techniczno-energetycznej w warunkach eksploatacyjnych [8].

W literaturze brakuje kompleksowych analiz łączących badania laboratoryjne, symulacje numeryczne i walidację in situ rozkładanych budynków mieszkalnych, przeznaczonych do wielokrotnego montażu. Celem pracy jest ocena metodyki badawczej oraz weryfikacja, czy innowacyjny dom mobilny osiąga parametry techniczno-energetyczne porównywalne z tradycyjnym budownictwem jednorodzinnym. Zagadnienie to nabiera znaczenia wobec coraz większej popularności obiektów modułowych i braku standardów oceny ich jakości po zmontowaniu w miejscu docelowym. Wartość naukowa pracy polega na integracji nowatorskiego przedmiotu badań z klasycznymi metodami analityczno-pomiarowymi, odniesionymi do normatywnych wymagań dotyczących standardowych budynków.

Opis analizowanego domu mobilnego

Analizowanym budynkiem jest parterowy dom mieszkalny z funkcją umożliwiającą złożenie go do transportu (rysunek 1a). Przedmiotowa technologia została opracowana w ramach projektu badawczo-rozwojowego finansowanego z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR) na lata 2014–2020 o numerze 01.01.01-00-0935/19 pt. „Mobilny, rozkładany obiekt budowlany MODEA-PACO". Innowacyjny dom mobilny jest jednokondygnacyjnym budynkiem mieszkalnym w technologii drewnianej szkieletowej, posadowionym na specjalnie przy-

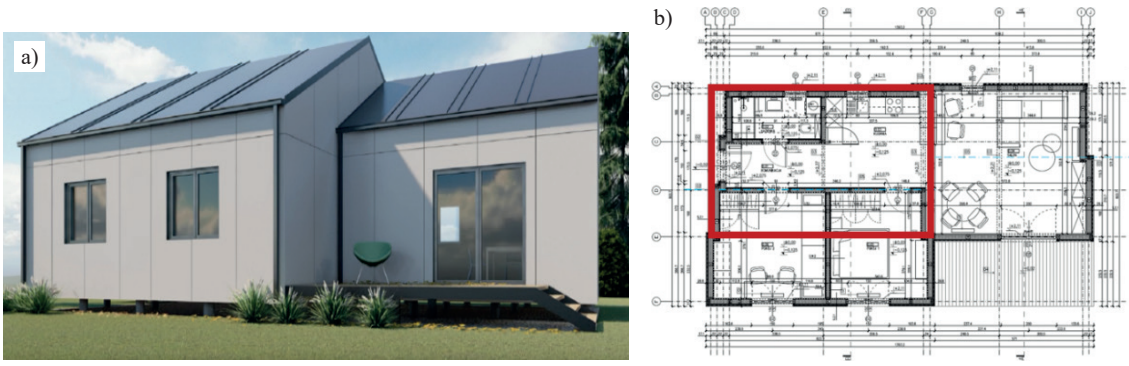


Fig. 1. The analyzed mobile home: a) 3D visualization of the building; b) usable floor plan indicating the area after folding (red line)
Rys. 1. Analizowany dom mobilny: a) wizualizacja budynku; b) rzut powierzchni użytkowej z zaznaczeniem powierzchni po złożeniu (czerwona linia)

technology, set on a specially prepared platform, without a basement, and featuring a separate, non-habitable attic. The built-up area is 98.62 m^2; the roof, based on timber rafter framing (with a total area of 116.26 m^2), is a gable roof with a 30° slope. The building has a variable total height: 4.86 m in the first section and 5.53 m in the second. The total usable floor area is 78.33 m^2, with a volume of 201.31 m^3 and a clear height of the usable zone of 2.57 m. The windows and doors comprise an entrance door (2.32 m^2) and triple-glazed PVC windows with a total area of 10.76 m^2, located by default on the north (3.90 m^2) and south (6.86 m^2) facades. When folded, the building occupies only 38.31 m^2, within a rectangular outline measuring 6.71 × 5.71 m (Figure 1b).

The building envelope components were designed in accordance with the technical documentation provided; the building was constructed using prefabricated sandwich panels with a PUR core (with the thermal conductivity coefficient λ of 0.032 W/mK). The reference values of the heat transfer coefficients (U) range from 0.11 to 0.13 W/m^{2}K. The building systems include mechanical supply and exhaust ventilation with heat recovery using in-wall heat recovery units, heating and cooling by means of wall-mounted air conditioners (electric radiant heaters in the bathroom, without air conditioning), and electric instantaneous domestic hot water heaters. The building is powered exclusively by electricity. The key design and construction challenge for this type of structure is ensuring the airtightness of the assembly joints between prefabricated panels each time the building is unfolded, which directly affects energy consumption, the proper functioning of the ventilation system, and the quality of the indoor microclimate. Despite its mobile nature, the examined building meets the requirements of Polish building regulations for single-family residential buildings according to the applicable Technical Conditions (WT2021) [9].

Scope of the analysis

The analyses covered three research pillars: laboratory testing of the physical properties of materials used, advanced numerical simulations of the prototype building, and in situ validation. The analyses performed are presented in two parts: the numerical part presented in subsection 3.1 and the measurement part shown in subsection 3.2 (in-

gotowanym podeście, bez podpiwniczenia, z wyodrębnionym poddaszem nieużytkowym. Powierzchnia zabudowy wynosi 98,62 m^2, dach o konstrukcji opartej na drewnianej więźbie krokwiowej (o łącznej powierzchni 116,26 m^2) jest dwuspadowy o nachyleniu 30°. Budynek ma zmienną wysokość całkowitą: w pierwszej części 4,86 m, a w drugiej 5,53 m. Całkowita powierzchnia użytkowa wynosi 78,33 m^2 o kubaturze 201,31 m^3 i wysokości w świetle strefy użytkowej 2,57 m. Stolarka otworowa obejmuje drzwi wejściowe (2,32 m^2) oraz okna trójszybowe PVC o łącznej powierzchni 10,76 m^2; domyślnie zlokalizowane na elewacjach północnej (3,90 m^2) i południowej (6,86 m^2). Po złożeniu budynek zajmuje jedynie 38,31 m^2, na obrysie prostokąta o wymiarach 6,71 m na 5,71 m (rysunek 1b).

Przegrody budowlane przyjęto zgodnie z udostępnioną dokumentacją techniczną; budynek wykonano z prefabrykowanych paneli warstwowych z rdzeniem PUR (o wartości współczynnika λ 0,032 W/mK). Referencyjne wartości współczynników przenikania ciepła (U) wynoszą 0,11–0,13 W/m^{2}K. Instalacje obejmują mechaniczną wentylację nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła realizowaną przy użyciu rekuperatorów wewnątrzściennych, ogrzewanie i chłodzenie za pomocą klimatyzatorów ściennych (w łazience promienniki elektryczne, bez klimatyzacji) oraz elektryczne przepływowe podgrzewacze ciepłej wody użytkowej. Budynek zasilany jest wyłącznie energią elektryczną. Kluczowym wyzwaniem projektowym i wykonawczym tego typu konstrukcji jest zapewnienie szczelności powietrznej połączeń montażowych między prefabrykowanymi panelami po każdorazowym rozłożeniu budynku, co bezpośrednio przekłada się na zużycie energii, poprawność działania instalacji wentylacyjnej oraz jakość mikroklimatu wewnętrznego. Pomimo mobilnego charakteru obiektu spełnia on wymagania polskich przepisów budowlanych dotyczących jednorodzinnych budynków mieszkalnych wg obowiązujących Warunków Technicznych (WT2021) [9].

Zakres analizy

Analizy dotyczą trzech filarów badawczych: laboratoryjnej analizy właściwości fizycznych materiałów; zaawansowanych symulacji numerycznych obiektu oraz walidacji in situ. Wykonane analizy przedstawiono w dwóch częściach: część numeryczna sekcja 3.1 oraz część pomiarowa sekcja 3.2, wyszczególniając poszczególne badania. Wszystkie badania zo-

cluding the specification of the individual tests executed). All tests were conducted to comprehensively evaluate the technical and energy performance of the mobile home prototype.

Numerical part – energy efficiency assessment using advanced computer simulations. The numerical model of the analyzed mobile home was developed in Design Builder using the Energy Plus calculation model [10]. The input data (based on the building's technical documentation and in situ measurement results) included the thermal parameters of the building envelope components, the characteristics of the HVAC system (nominal heating and cooling capacities, airflow rates, fan efficiency), and the air infiltration rate determined using the Blower Door method. The parameters of the lighting system were adopted based on measurements, individually for each occupancy zone. The developed model was validated using the available measurement data, after which it was considered sufficiently accurate for further analyses. The use of *white-box modeling* [11] as the primary method is justified by its comprehensiveness and the ability to obtain detailed time-series results (e.g., with hourly resolution) while maintaining full control over the input parameters [12]. The simulation file of the validated model was exported to the IDF (*Input Data Format*) and used for parametric calculations, performed automatically using a custom script written in *Python*. A total of 6,600 simulations were conducted with an hourly calculation time step, varying the following parameters:

- outdoor climate conditions: 3 locations, Gdansk, Lodz, and Cracow (designated G, L, and K, respectively), with 2 EPW (*Energy Plus Weather*) files per location; the files used were compiled using historical data from the 1970–2000 period [13] and current data defined based on the 2001–2020 database [14] (denoted OLD and NEW, respectively);
- building orientation: 4 variants, rotated in 90° increments;
- thickness of thermal insulation of the exterior envelope components: 11 variants (in 1 cm increments) of additional layer thickness;
- *setpoint* temperatures for heating (18–22°C) and cooling (24–28°C), with 5 variants each (in 1°C increments).

Energy efficiency was assessed based on the annual energy demand for heating, cooling, and the building's total energy demand (Figure 2a-c). The discrepancy between simulated and actual energy consumption of buildings is a phenomenon widely described in the literature [15], and its main causes are primarily linked to the impact of occupants on building operation [16], excluding random factors such as variations in weather conditions.

Simulation-based analysis of indoor environmental quality: thermal comfort, visual comfort, and air quality. The assessment of indoor environmental quality was conducted alongside the energy efficiency analysis. Thermal comfort was evaluated based on the PMV index, determined according to *Fanger's* model [17]. The number of discomfort hours (Figure 2d) was determined in accordance with ASHRAE Standard 55, and the results were

stały wykonane w celu kompleksowej oceny charakterystyki techniczno-energetycznej prototypu domu mobilnego.

Część numeryczna – ocena efektywności energetycznej przy użyciu zaawansowanych symulacji komputerowych. Model numeryczny analizowanego domu mobilnego opracowano w środowisku *DesignBuilder,* wykorzystując silnik obliczeniowy *EnergyPlus* [10]. Dane wejściowe (przyjęte na podstawie dokumentacji technicznej obiektu oraz wyników pomiarów in situ) obejmowały parametry cieplne przegród budowlanych, charakterystykę systemu HVAC (nominalne moce grzewcze i chłodnicze, przepływy powietrza, sprawność wentylatorów) oraz współczynnik infiltracji powietrza wyznaczony metodą Blower Door. Parametry systemu oświetlenia przyjęto na podstawie pomiarów, indywidualnie w przypadku każdej strefy użytkowej. Opracowany model poddano walidacji z wykorzystaniem dostępnych danych pomiarowych, po której uznano go za dostatecznie dokładny do dalszych analiz. Zastosowanie modelowania numerycznego typu *white-box modeling* [11], jako metody głównej uzasadnione jest jej kompleksowością oraz możliwością uzyskania szczegółowych wyników rozkładów czasowych (np. o godzinowej gradacji) przy jednoczesnej pełnej kontroli nad parametrami wejściowymi [12]. Plik symulacyjny zwalidowanego modelu wyeksportowano do formatu IDF (*Input Data Format*) i wykorzystano do obliczeń parametrycznych, realizowanych automatycznie za pomocą autorskiego skryptu opracowanego w języku *Python*. Łącznie przeprowadzono 6600 symulacji, z godzinowym krokiem obliczeniowym zmiennych:

- warunki klimatu zewnętrznego: 3 lokalizacje, Gdańsk, Łódź i Kraków (oznaczane odpowiednio G, L oraz K) po 2 pliki EPW (*EnergyPlus Weather*) na lokalizację; wykorzystano pliki opracowane z zastosowaniem następujących danych historycznych 1970–2000 [13] oraz aktualnych 2001–2020 [14] (oznaczane odpowiednio OLD oraz NEW);
- zorientowanie budynku: 4 warianty, obrót co 90°;
- grubość izolacji termicznej przegród zewnętrznych: 11 wariantów (przyrost co 1 cm) dodatkowej grubości warstwy;
- temperatura nastaw (tzw. *set-point*) zadanych do ogrzewania (18–22°C) i chłodzenia (24–28°C), po 5 wariantów każda (zmienność co 1°C).

Efektywność energetyczna oceniana była w przypadku rocznego zapotrzebowania na energię do celów ogrzewania, chłodzenia oraz łącznego zapotrzebowania energetycznego budynku (rysunek 2a-c). Rozbieżność między symulowanym a rzeczywistym zużyciem energii budynków jest zjawiskiem powszechnie opisywanym w literaturze [15], a jej głównych przyczyn upatruje się przede wszystkim we wpływie użytkowników na eksploatację obiektu [16], z wyłączeniem czynników o charakterze losowym, takich jak zmienność warunków atmosferycznych.

Symulacyjna analiza jakości środowiska wewnętrznego z uwzględnieniem komfortu termicznego i oświetleniowego oraz jakości powietrza. Ocenę jakości środowiska wewnętrznego przeprowadzono jednocześnie z analizą efektywności energetycznej. Komfort termiczny oceniono na podstawie wskaźnika PMV, wyznaczonego zgodnie z modelem *Fangera* [17]. Liczbę godzin dyskomfortu (rysunek 2d)

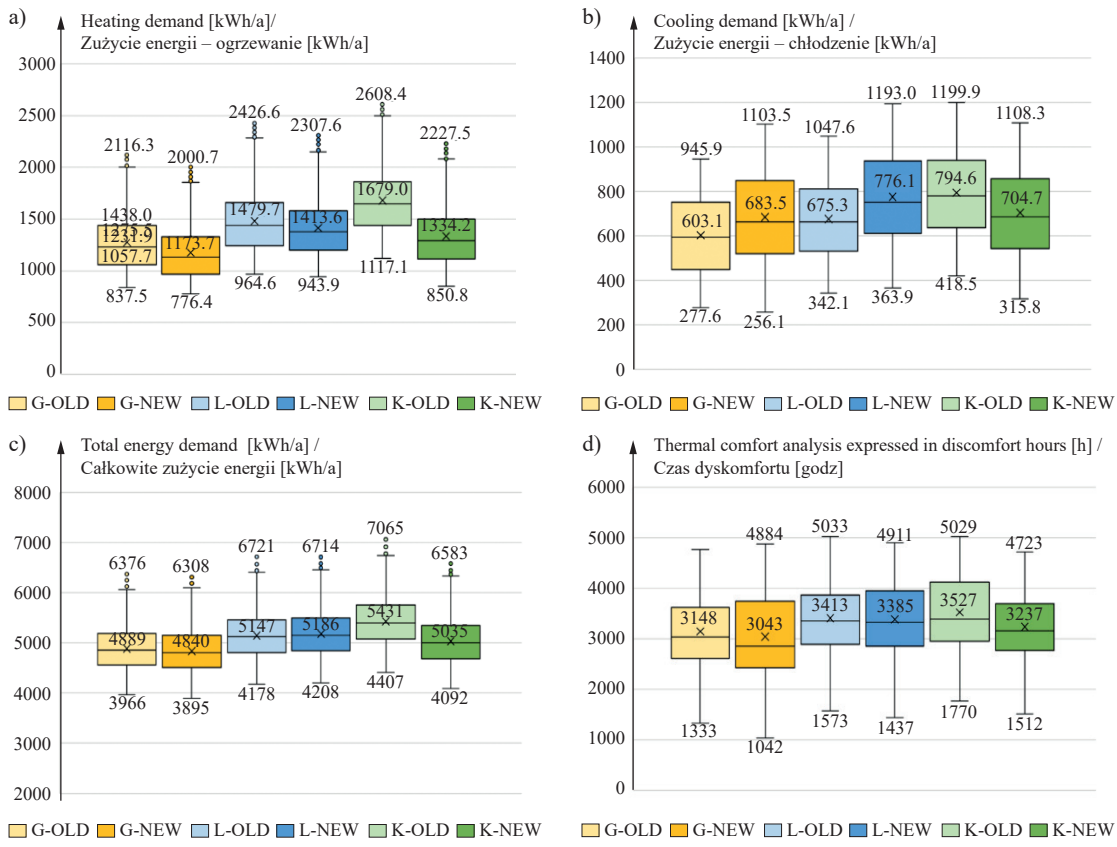


Fig. 2. Numerical analysis results for parametric EnergyPlus simulations: a) heating demand; b) cooling demand; c) total energy demand; d) thermal comfort analysis expressed in discomfort hours

Rys. 2. Wyniki analizy numerycznej parametrycznych symulacji EnergyPlus: a) zapotrzebowanie na ogrzewanie; b) zapotrzebowanie na chłodzenie; c) całkowite zapotrzebowanie na energię; d) analiza komfortu termicznego wyrażona w godzinach dyskomfortu

compared with the requirements of ISO 7730. The model incorporated detailed hourly schedules for all occupied zones to reflect variations in occupant behavior. The specified schedules defined occupant presence, a coefficient describing metabolic activity (distinguishing between daytime activity and sleep, 1.00 and 0.80 met, respectively), and variable thermal resistance of clothing depending on the time of day and year (winter: 1.00 clo, summer: 0.60 clo, and nighttime: 1.50 clo). The results of the parametric simulations are presented in Figure 3.

The lighting system was incorporated into the model using a three-stage (the so-called stepped switch) daylight control system, and its parameters were adopted based on in situ measurements. The visual comfort analysis was performed by simulation according to the multi-criteria building assessment standard LEED v4 (*Leadership in Energy and Environmental Design*), using maps of the *Daylight Factor* (DF) distribution. The indoor air quality assessment was conducted to analyze the distribution of CO_2 concentration, measured in ppm (*parts per million*), in individual rooms of the mobile home. The analysis accounted for variations in occupant behavior within the assumed hourly schedules, based on international guidelines consistent with ASHRAE 62.1.

Hygrothermal analysis. The purpose of the hygrothermal analysis (Figure 4) was to verify the design acceptability of the mobile home's envelope and structural joints in terms

wyznaczono zgodnie z normą ASHRAE 55, a uzyskane wyniki odniesiono do wymagań normy ISO 7730. W modelu przyjęto szczegółowe harmonogramy godzinowe dotyczące wszystkich stref użytkowych w celu odwzorowania zmienności zachowań mieszkańców. Zadane harmonogramy zakładały obecność użytkowników, współczynnik opisujący aktywność metaboliczną (wyszczególniając aktywność dzienną i sen – odpowiednio 1,00 i 0,80 met) oraz zmienny opór cieplny odzieży zależny od pory dnia i roku (zima: 1,00 clo; lato: 0,60 clo; pora nocna: 1,50 clo). Wyniki wykonanych symulacji parametrycznych zaprezentowano na rysunku 3.

System oświetlenia uwzględniono w modelu z zastosowaniem trójstopniowego układu sterowania światłem dziennym, a jego parametry przyjęto na podstawie pomiarów *in situ*. Analizę komfortu oświetleniowego wykonano symulacyjnie wg standardu wielokryterialnej oceny budynków LEED v.4 (*Leadership in Energy and Environmental Design*), wykorzystując mapy z rozkładem wskaźnika *Daylight Factor* (DF). Ocenę jakości powietrza wewnętrznego wykonano w celu analizy rozkładu stężenia CO_2 mierzonego w ppm (*parts per million*) w poszczególnych pomieszczeniach domu mobilnego. Analizę wykonano z uwzględnieniem zmienności zachowań mieszkańców w przyjętych harmonogramach godzinowych, bazując na wytycznych międzynarodowych zgodnych z ASHRAE 62.1.

Numeryczna analiza cieplno-wilgotnościowa. Celem analizy cieplno-wilgotnościowej (rysunek 4) była weryfikacja

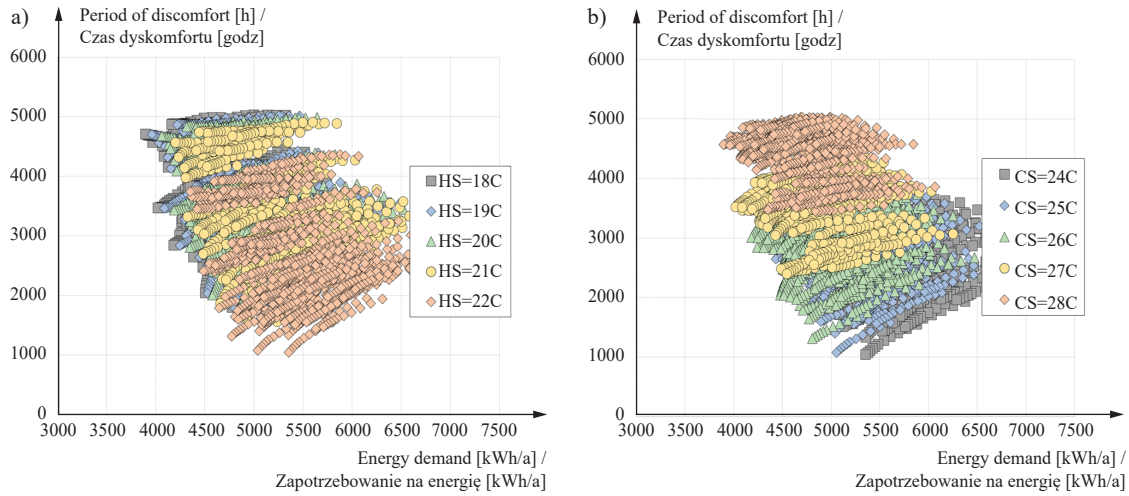


Fig. 3. Dependence of thermal comfort on energy demand for various temperature setpoint configurations: a) heating; b) cooling setpoints

Rys. 3. Zależność komfortu termicznego od zapotrzebowania na energię w przypadku różnych wariantów nastaw temperatury: a) ustawienia ogrzewania; b) ustawienia chłodzenia

of the risk of water vapor condensation, mold growth, and temperature distribution. The hygrothermal analysis was performed for the selected key details, considering:

- moisture content in envelope components and junctions,
- isotherm distribution in junctions,
- analysis of the critical surface humidity at the wall-floor connection.

The moisture transport analysis was performed using *WUFI Pro v.6.5* in accordance with the requirements of PN-EN ISO 13788. Calculations were performed for four characteristic structural details: a cross-section through the exterior wall, a cross-section through the ceiling, a cross-section through the floor, and the joint between wall panels. The modeling assumed unfavorable moisture conditions at the start of the calculations to mimic the potential deterioration of the properties of the envelope at the joints. The simulations were based on climate data for Warsaw as a representative location of Poland, covering five years with an hourly calculation time step. Indoor environmental conditions were assumed in accordance with humidity class 3, corresponding to a residential room. For

poprawności projektowej przegród i węzłów konstrukcyjnych domu mobilnego pod kątem ryzyka kondensacji pary wodnej, rozwoju grzybów pleśniowych oraz rozkładu temperatury w kluczowych detalach w zakresie:

- zawartości wilgoci w przegrodach i węzłach,
- rozkładu izoterm w węzłach,
- analizy krytycznej wilgotności powierzchni węzła ściana-podłoga.

Analizę transportu wilgoci przeprowadzono przy użyciu programu *WUFI Pro v.6.5*, zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 13788. Wykonano obliczenia dotyczące czterech charakterystycznych detali konstrukcyjnych: przekroju przez ścianę zewnętrzną, przekroju przez strop, przekroju przez podłogę oraz połączenia między panelami ściennymi. Modelowanie wykonano, przyjmując niekorzystne warunki wilgotnościowe na starcie obliczeń w celu odwzorowania potencjalnego pogorszenia właściwości przegrody w miejscach styku. Symulacje dotyczyły danych klimatycznych Warszawy jako lokalizacji reprezentatywnej Polski, okresu pięciu lat z godzinowym krokiem obliczeniowym. Warunki środowiska wewnętrznego przyjęto zgodnie z 3. klasą wilgotności odpowiadającą po-

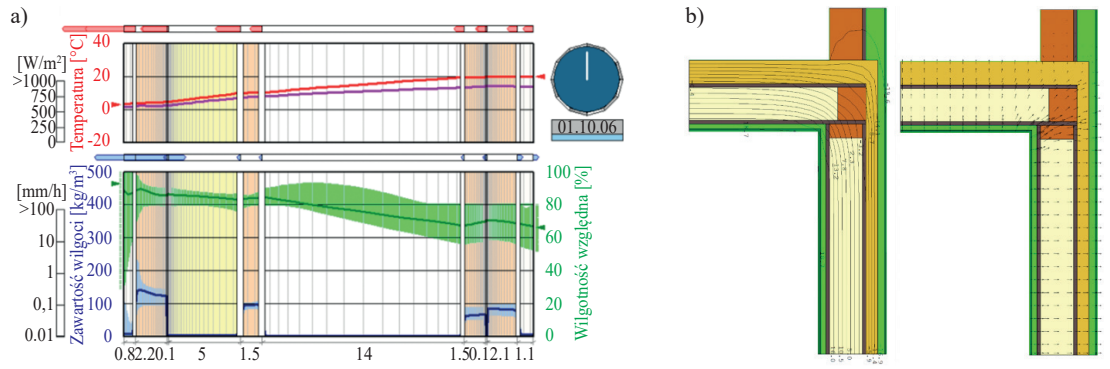


Fig. 4. Numerical hygrothermal analysis: a) temperature and humidity variation ranges for a 5-year simulation; b) isotherm distributions (left) and heat flux vectors (right) for the wall-ceiling junction

Rys. 4. Numeryczna analiza cieplno-wilgotnościowa: a) wyniki zakresu zachowania temperatury i wilgotności dotyczące symulacji pięciu lat; b) rozkłady izoterm (po lewej) oraz strumieni wektora ciepła (po prawej) dla połączenia ściany i stropu

each detail, the risk of increasing moisture content in the envelope component and the risk of mold growth were verified using a graphical method based on the distribution of isopleths relative to a reference line. The distribution of temperature and heat fluxes in the structural junctions was determined using *THERM v.7.6* software in accordance with the requirements of PN-EN 10211. The analysis covered four details analogous to the structural details evaluated in the moisture transport analysis (exterior wall corner, wall-ceiling joint, wall-floor joint, and joint between wall panels). The calculations were performed for the design outdoor temperature (–20°C) and a typical indoor temperature (20°C), considering the surface heat transfer resistances characteristic of each detail. For each junction, the isotherm distribution, heat flux density, and calculated heat transfer coefficient (U) were determined. The results were compared with the values resulting from the layered construction of the envelope components.

The analysis of the critical surface moisture content at the junction of the exterior wall and the floor using *WUFI 2D* software supplements the one-dimensional calculations for individual envelope components with the geometric impact of the junction. This junction was selected due to its sensitivity to ground moisture in foundation variants other than the one assumed in the documentation. The calculations covered one year with an hourly time step, using the same climatic data and humidity class as in the moisture transport analysis, to verify the risk of condensation at the analyzed junction.

Measurements part. Laboratory tests were conducted at the accredited laboratory of the Department of Building Materials Physics and Sustainable Design at the Faculty of Civil Engineering, Architecture, and Environmental Engineering, Lodz University of Technology. The purpose of the laboratory tests (LT) was to verify the properties of materials and components against the values declared by the manufacturers, while field tests (FT) were performed on the prototype to evaluate the adopted design solutions under real-world conditions. Field tests of the prototype were carried out inside a production hall (at an air temperature of approx. 5°C). This approach ensured quasi-steady-state ambient conditions by isolating the test object from the effects of precipitation and fluctuations in wind speed.

Study of the thermal properties of materials and envelope components (LT). The objective was to determine the actual thermal parameters of the materials used in the envelope components of the mobile home and to compare them with catalog and standard values, which served as input data for the described numerical model. The laboratory tests of thermal properties covered five selected construction materials used in the envelope components of the analyzed mobile home: PUR foam, XPS (Styrodur), PURENIT panels, OSB panels, and structural wood. Measurements of the thermal conductivity coefficient (λ) were performed in accordance with the applicable requirements of PN-EN 12667, using a *LASERCOMP FOX 314* measuring device with a measurement accuracy of ±1% over a temperature range from –20°C to +75°C. The measure-

mieszczeniu mieszkalnemu. W przypadku każdego detalu weryfikowano ryzyko zwiększania zawilgocenia przegrody oraz ryzyko rozwoju grzybów pleśniowych metodą graficzną opartą na rozkładzie izoplet względem linii odniesienia. Rozkład temperatury i strumieni ciepła w węzłach konstrukcyjnych wyznaczono przy użyciu programu *THERM v.7.6*, zgodnie z wymaganiami PN-EN 10211. Analizą objęto cztery detale analogicznie do detali konstrukcyjnych ocenianych w przypadku analizy transportu wilgoci (naroże ściany zewnętrznej, połączenie ściana-strop, połączenie ściana-podłoga oraz połączenie między panelami ściennymi). Obliczenia wykonano w przypadku projektowej temperatury zewnętrznej (–20°C) i typowej temperatury wewnętrznej (20°C), z uwzględnieniem oporów przejmowania ciepła charakterystycznych dla każdego detalu. W przypadku każdego węzła wyznaczono rozkład izoterm, gęstość strumienia ciepła oraz obliczeniową wartość współczynnika przenikania ciepła (U), którą porównano z wartościami wynikającymi z warstwowej budowy przegród.

Analiza krytycznej wilgotności powierzchni połączenia ściany zewnętrznej z podłogą przy użyciu programu *WUFI 2D* uzupełnia jednowymiarowe obliczenia dla poszczególnych przegród o dwuwymiarowy efekt geometryczny węzła. Połączenie to wybrano ze względu na jego szczególną wrażliwość na oddziaływanie wilgoci gruntowej w wariantach posadowienia innych niż przyjęty w dokumentacji projektowej. Obliczenia dotyczyły rocznego okresu z godzinowym krokiem czasowym z uwzględnieniem tych samych danych klimatycznych i klasy wilgotności co w analizie transportu wilgoci, w celu weryfikacji ryzyka kondensacji w analizowanym węźle.

Część pomiarowa. Badania laboratoryjne zostały wykonane w akredytowanym laboratorium Katedry Fizyki Materiałów Budowlanych i Budownictwa Zrównoważonego na Wydziale Budownictwa Politechniki Łódzkiej. Celem badań laboratoryjnych (BL) była weryfikacja właściwości materiałów i komponentów w odniesieniu do wartości deklarowanych przez producentów, natomiast badania terenowe (BT) przeprowadzono na prototypie w celu oceny przyjętych rozwiązań projektowych w warunkach rzeczywistych. Badania terenowe prototypu zrealizowano wewnątrz hali produkcyjnej (w temperaturze powietrza ok. 5°C). Rozwiązanie to zapewniło quasi-ustalone warunki otoczenia, izolując badany obiekt od wpływu opadów atmosferycznych oraz wahań prędkości wiatru.

Badanie właściwości cieplnych materiałów oraz przegród (BL). Celem badania było wyznaczenie rzeczywistych parametrów cieplnych materiałów, zastosowanych w przegrodach domu mobilnego i porównanie ich z wartościami katalogowymi oraz normowymi, stanowiącymi dane wejściowe do opisanego modelu numerycznego. Badania właściwości cieplnych w warunkach laboratoryjnych dotyczyły pięciu wybranych materiałów konstrukcyjnych zastosowanych w przegrodach analizowanego domu mobilnego: pianki PUR; styroduru XPS; płyty PURENIT; płyty OSB oraz drewna konstrukcyjnego. Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła λ zrealizowano wg obowiązujących wymagań PN-EN 12667, przy użyciu aparatu pomiarowego *LASERCOMP FOX 314*, o dokładności pomiarowej ±1% w zakresie temperatury

ments were performed on samples measuring 300×300 mm (thickness depending on the material).

The thermal resistance (R) and U-value of the exterior wall were determined using the calibrated and guarded hot box method with the UNI-MORS apparatus, in accordance with the standard methodology specified in PN-EN ISO 8990. A test was performed on a wall model with a metering area of 1.69 m^2 (dimensions 239.5 × 153.0 × 33.0 cm). Measurements were taken for four values of the temperature difference (ΔT) between the two sides of the wall: 20, 30, 40, and 50°C.

Testing of water vapor permeability and heat capacity (LT). The objective of the test was to determine the hygrothermal properties of the materials used in the envelope components of the examined mobile home. Resistance to water vapor transport, which serves as input data for the analysis of the risk of interstitial condensation in the numerical analysis, was examined. The water vapor permeability of five building materials (two samples with a diameter of 200 mm for each material) was determined using the so-called cup method, in accordance with the requirements of PN-EN ISO 12572. The test was done using a *Weiss-Voetsch C1000* test chamber (temperature range –40°C to +180°C; relative humidity control 30–95%) at temperature of 23°C and relative humidity of 50/93%. For each material, the following parameters were determined: density of water vapor flow rate (g), water vapor permeance (W), water vapor resistance (Z), water vapor permeability (δ), water vapor resistance factor (μ), and water vapor diffusion-equivalent air layer thickness (s_d). The volumetric heat capacity (C_p) and specific heat (c_p) were determined according to the standard method PN-EN 12667, using a portable *ISOMET 2104* device.

Strength tests (LT). The purpose of the test was to verify the mechanical properties of the materials forming the load-bearing frame of the mobile home in accordance with the requirements of the relevant strength classes. The mechanical property tests covered structural wood and OSB panels. Timber specimens (measuring 300×30×30 mm) were tested in accordance with PN-EN 408 +A1 for bending strength, tensile strength parallel to the grain, and compressive strength parallel to the grain. The tests were done on an *INSTRON 3384* testing machine at a constant crosshead speed, with the maximum load reached after 300±120 s. OSB panels (measuring 200×200×15 mm) were evaluated for bending strength, tensile strength perpendicular to the plane of the panel, and compressive strength parallel to the plane of the panel, in accordance with the requirements of PN-EN 13986 +A1 and PN-EN 310. Two specimens were used in each test; the moisture content of the wood during testing was 7±1%.

Thermal imaging tests (FT). A thermal imaging test was performed to verify the workmanship quality of the building's exterior envelope, with particular attention to the location of potential thermal bridges of increased local heat transfer through the building envelope resulting from material or geometric discontinuities or structural defects. The inspection was conducted on March 10-11, 2022, in

od –20°C do +75°C. Wykonano je na próbkach o wymiarach 300×300 mm (grubość zależna od materiału).

Opór cieplny (R) i współczynnik U przegrody zewnętrznej wyznaczono metodą kalibrowanej i osłoniętej skrzynki grzejnej w aparaturze *UNI-MORS*, zgodnie z przyjętą metodyką normową wg PN-EN ISO 8990. Wykonano badanie makiety ściany o powierzchni pola pomiarowego 1,69 m^2 (wymiary 239,5×153,0×33,0 cm). Pomiary prowadzono w przypadku czterech wartości różnicy temperatury (ΔT) pomiędzy stronami przegrody dla 20, 30, 40 i 50°C.

Badanie paroprzepuszczalności i pojemności cieplnej (BL). Celem badania było określenie właściwości higrotermicznych materiałów przegród domu mobilnego, a przede wszystkim ich odporności na transport pary wodnej, stanowiących dane wejściowe do analizy ryzyka kondensacji międzywarstwowej w analizie numerycznej.

Paroprzepuszczalność pięciu materiałów budowlanych (po dwie próbki o średnicy 200 mm w przypadku każdego materiału) wyznaczono przy użyciu tzw. metody kubkowej, zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 12572. Badanie wykonano przy użyciu komory badawczej *Weiss-Voetsch C1000* (zakres temperatury –40°C do +180°C; regulacja wilgotności względnej 30–95%) w temperaturze 23°C i wilgotności 50/93%. W przypadku każdego materiału wyznaczono: gęstość strumienia pary wodnej (g); przepuszczalność pary wodnej (W); opór pary wodnej (Z); współczynnik przenoszenia pary wodnej (δ), współczynnik oporu dyfuzyjnego (μ) oraz opór dyfuzyjny względny (S_d). Objętościową pojemność cieplną (C_p) oraz ciepło właściwe (c_p) wyznaczono wg metody normowej PN-EN 12667, przy użyciu przenośnego aparatu *ISOMET 2104*.

Badania wytrzymałościowe (BL). Celem badania była weryfikacja właściwości mechanicznych materiałów tworzących szkielet nośny domu mobilnego pod kątem spełnienia wymagań odpowiednich klas wytrzymałościowych. Badania właściwości mechanicznych dotyczyły drewna konstrukcyjnego i płyt OSB. Próbki drewna (o wymiarach 300×30×30 mm) zbadano zgodnie z PN-EN 408+A1 pod względem wytrzymałości na zginanie, rozciąganie wzdłuż włókien oraz ściskanie wzdłuż włókien. Badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej *INSTRON 3384* przy stałej prędkości przesuwu głowicy i obciążeniu maksymalnym po 300±120 s. Płyty OSB (o wymiarach 200×200×15 mm) zbadano pod względem wytrzymałości na zginanie, rozciąganie prostopadłe do płaszczyzny płyty oraz ściskanie równoległe do płaszczyzny, zgodnie z wymaganiami normowymi PN-EN 13986 +A1 i PN-EN 310. We wszystkich badaniach zastosowano po dwie próbki; wilgotność drewna podczas badań wynosiła 7±1%.

Badania termowizyjne (BT). Badanie termowizyjne przeprowadzono w celu weryfikacji jakości wykonania obudowy zewnętrznej budynku, ze szczególnym uwzględnieniem lokalizacji potencjalnych mostków termicznych – miejsc o podwyższonym lokalnym przenikaniu ciepła przez przegrodę, wynikających z nieciągłości materiałowych/geometrycznych lub wad konstrukcyjnych. Badanie przeprowadzono 10–11.03.2022 r., zgodnie z PN-EN 13187, przy użyciu kamery termowizyjnej *FLIR ThermaCAM P640*. Warunki meteorologiczne podczas badania były korzystne i zgodne z wymaganiami normy. Ana-

accordance with PN-EN 13187, using a *FLIR ThermaCAM P640* thermal imaging camera. Weather conditions during the inspection were favorable and met the requirements of the standard. The analysis covered thermograms of external surfaces (facade with a window, corners, recess) and internal surfaces (corners, wall-to-floor junctions, entrance door) generated using *FLIR Tool Software*. The thermal imaging inspection was supplemented with a smoke test using a portable synthetic smoke generator to detect localized leaks in the building envelope.

Building airtightness tests (FT). The airtightness was checked with the fan pressurization method in accordance with PN-EN 13829 and PN-EN ISO 9972. Equipment with a fan capable of a flow rate of up to 14,100 m^3/h was used. Measurements were conducted for both pressurization and depressurization, generating a pressure difference of 50 Pa in the building under analysis. Before the actual measurements, a zero-airflow calibration test was performed with the equipment switched off. The purpose of the test was to determine the airtightness of the building envelope and to calculate the airtightness index (n_{50}), which served as one of the input values for the described numerical model.

Acoustic tests of envelope components (LT). Acoustic tests were conducted to verify the sound insulation of the mobile home's exterior wall in terms of compliance with national requirements for residential buildings [18]. These tests were performed in specialized reverberation chambers in accordance with PN-EN ISO 10140-2 and PN-EN ISO 10140-5, using a specialized measurement setup. The measurement equipment consisted of an acoustic analyzer, an omnidirectional sound source, a power amplifier, and *Qualifier software*. The tests covered three samples of a sandwich wall of identical construction, each with an area of 1.8 m^2. Sound insulation measurements were conducted in the frequency range of 50–5,000 Hz in one-third-octave bands. The following were determined: the weighted sound reduction index R_w, the spectrum adaptation terms C and C_{tr}, and the evaluation indices $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$, in accordance with the requirements of PN-EN ISO 717-1, and the obtained values were compared with the national requirements for exterior walls of residential buildings specified in PN-B-02151-3.

Illuminance test (FT). The purpose of the test was to verify the correctness of the mobile home's lighting system design with respect to the recommended illuminance values for activities performed in residential buildings. Illuminance measurements follow the applicable requirements of PN-EN 12464-1 and PN-EN 12464-2, using a lux meter with an *LP-1* measuring probe (resolution 0.10 lx, photodiode compliant with the CIE curve). Measurements were taken on a horizontal plane at a height of 0.85 m above floor level, within designated measurement areas set back 0.50 m from the inner edges of the walls. For each room, an individual measurement grid was defined, the density of which depended on the room's dimensions and the mounting height of the luminaires.

The microclimate study (FT). Testing was carried out in accordance with the requirements of PN-EN ISO 7730, using *Fanger's* model [17]. The purpose of the study was to

lizą objęto termogramy powierzchni zewnętrznych (elewacja z oknem, naroża, wnęka) i wewnętrznych (naroża, połączenie ścian z podłogą, drzwi wejściowe) wygenerowane przy użyciu oprogramowania *FLIR Tool Software*. Badanie termowizyjne uzupełniono próbą zadymiania z zastosowaniem przenośnej wytwornicy dymu syntetycznego w celu lokalnej detekcji nieszczelności obudowy.

Badania szczelności powietrznej budynku (BT) wykonano metodą ciśnieniową z użyciem wentylatora, zgodnie z normami PN-EN 13829 i PN-EN ISO 9972. Zastosowano aparaturę z wentylatorem o wydajności do 14100 m^3/h. Pomiar przeprowadzono w przypadku próby nadciśnienia i podciśnienia, wywołując różnicę ciśnienia 50 Pa w analizowanym budynku. Przed właściwymi pomiarami wykonano próbę odczytu zerowego przepływu powietrza przy wyłączonej aparaturze. Celem badania było określenie szczelności obudowy budynku i wyznaczenie wskaźnika szczelności (n_{50}), który stanowił jedną z wartości wejściowych do opisanego modelu numerycznego.

Badania akustyczne przegród (BL) przeprowadzono w celu weryfikacji izolacyjności akustycznej przegrody zewnętrznej domu mobilnego pod kątem spełnienia wymagań krajowych dotyczących budynków mieszkalnych [18]. Wykonano je w komorach pogłosowych, zgodnie z normami PN-EN ISO 10140-2 i PN-EN ISO 10140-5, przy użyciu specjalistycznego zestawu pomiarowego. Aparaturę pomiarową stanowiły: analizator akustyczny; wszechkierunkowe źródło dźwięku; wzmacniacz mocy oraz oprogramowanie *Qualifier*. Badaniami objęto trzy próbki ściany warstwowej o identycznej budowie, o powierzchni 1,8 m^2 każda. Pomiary izolacyjności prowadzono w zakresie częstotliwości 50–5000 Hz w pasmach tercjowych (1/3 oktawy). Wyznaczono wskaźniki izolacyjności akustycznej właściwej R_w, widmowe wskaźniki adaptacyjne C i C_{tr} oraz wskaźniki oceny $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$, zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 717-1, a uzyskane wartości odniesiono do wymagań krajowych dotyczących przegród zewnętrznych budynków mieszkalnych opisanych w PN-B 02151-3.

Badanie natężenia oświetlenia (BT). Celem badania była weryfikacja poprawności projektu systemu oświetlenia domu mobilnego w odniesieniu do zalecanych wartości natężenia oświetlenia w przypadku czynności wykonywanych w budynkach mieszkalnych. Pomiary natężenia oświetlenia przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi wymaganiami normowymi PN-EN 12464-1 i PN-EN 12464-2, przy użyciu luksomierza z głowicą pomiarową *LP-1* (rozdzielczość 0,1 lx, fotodioda zgodna z krzywą CIE). Pomiary wykonano na płaszczyźnie poziomej na wysokości 0,85 m nad poziomem podłogi, w wyznaczonych obszarach pomiarowych z odsunięciem 0,50 m od krawędzi wewnętrznej ścian. W przypadku każdego pomieszczenia wyznaczono indywidualną siatkę pomiarową, której gęstość zależała od wymiarów pomieszczenia i wysokości zawieszenia opraw oświetleniowych.

Badanie mikroklimatu (BT) przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 7730, stosując model *Fangera* [17]. Celem badania była weryfikacja warunków środowiska wewnętrznego w kontekście komfortu termicznego użytkowników w warunkach rzeczywistych, stanowiąca uzupełnienie opisanej analizy numerycznej. Pomiary niezbędnych

verify indoor environmental conditions in terms of users' thermal comfort under real-world conditions, supplementing the numerical analysis (see subsection 3.1). Measurements of the necessary environmental parameters (air temperature, radiant temperature, air velocity, and humidity) were taken using specialized equipment, with software used to calculate the PMV (*Predicted Mean Vote*) index. The analysis was run over one hour with three-minute measurement intervals, and the duration of comfort conditions in the individual categories was determined in accordance with the adopted method. The evaluation covered three building occupancy scenarios: s1) warm clothing (1.20 clo) and relaxed activity (0.80 met); s2) light clothing (0.70 clo) and low activity (1.00 met); s3) light clothing (0.70 clo) and moderate activity (1.20 met). All of the building's technical systems operated in accordance with standard use: reference ventilation airflow rate, heating on with a *setpoint* of 22°C, and lighting on. The results of the in situ thermal comfort analysis and those obtained from the numerical analysis are identical when the parameters required to determine the PMV index are the same. The study yielded mean PMV values of –0.45, –0.67, and –0.16 for s1, s2, and s3, respectively, compared with –0.43, –0.62, and –0.14 from the numerical simulations.

Results and discussion

The purpose of the numerical and laboratory analyses was to classify the examined building, its components, and the technologies and materials used in terms of design and technical correctness. The results confirm that a building with a foldable structure can achieve technical and energy performance parameters comparable to, and in many aspects better than, those of single-family buildings of traditional construction.

Laboratory tests of the building materials used confirm their quality, indicating, above all, thermal properties that are better than those declared by the manufacturers. This indicates the proper selection of reliable suppliers of building materials, allowing for the achievement of above-average thermal performance of the exterior envelope components (U-value approx. 0.11 W/m^{2}K), fulfilling the requirements of WT2021 [9]. The remarkably high quality of the materials used is also confirmed by the results of the strength tests. The analyzed envelope components also provide adequate acoustic insulation: the exterior walls meet national requirements for residential buildings ($R'_{A,1}$ = 39 dB, $R'_{A,2}$ = 35 dB).

The numerical hygrothermal analysis, performed using specialized computer software, revealed no risk of interlayer condensation or mold growth in any of the analyzed structural details, and also confirmed that the critical surface humidity was not exceeded, provided that the junctions are correctly designed. The results of the numerical hygrothermal analysis are consistent with the conclusions of a systematic review of modular envelope technologies, which emphasized that properly designed prefabricated envelope components can achieve hygrothermal performance comparable to those of traditional buildings, provided that the details are carefully designed [7].

parametrów środowiskowych (temperatury powietrza, temperatury promieniowej, prędkości ruchu powietrza i wilgotności) wykonano przy użyciu specjalistycznej aparatury, z zastosowaniem oprogramowania do wyznaczenia wartości wskaźnika PMV (*Predicted Mean Vote*). Badanie prowadzono przez okres jednej godziny z trzyminutowym krokiem pomiarowym, a czas zapewnienia warunków komfortowych poszczególnych kategorii wyznaczono zgodnie z przyjętą metodą. Ocena dotyczyła trzech scenariuszy użytkowania budynku: s1) ciepły ubiór (1,20 clo) i aktywność relaksująca (0,80 met); s2) lekki ubiór (0,70 clo) i mała aktywność (1,00 met), s3) lekki ubiór (0,70 clo) i średnia aktywność (1,20 met). Wszystkie instalacje techniczne budynku działały zgodnie ze standardowym sposobem użytkowania: referencyjny strumień wentylacji, włączone ogrzewanie z nastawą *set-point* 22°C, włączone oświetlenie. Wyniki analizy komfortu termicznego in situ oraz otrzymane z analizy numerycznej są tożsame w przypadku jednakowych wartości parametrów wymaganych do wyznaczenia wskaźnika PMV. Z badania uzyskano wartości średnie wskaźnika PMV wynoszące –0,45, –0,67 i –0,16 odpowiednio dla s1, s2 i s3, względem –0,43, –0,62 i –0,14 z symulacji numerycznych.

Wyniki i dyskusja – analiza krytyczna

Celem przeprowadzonych analiz numerycznych i laboratoryjnych była klasyfikacja ocenianego budynku, jego komponentów oraz użytych technologii i materiałów w kontekście poprawności projektowej i technicznej. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość osiągnięcia przez budynek, o konstrukcji rozkładanej, parametrów techniczno-energetycznych porównywalnych, a w wielu aspektach lepszych, niż w przypadku jednorodzinnych budynków o konstrukcji tradycyjnej.

Badania laboratoryjne sprawdzające zastosowane materiały budowlane potwierdzają ich jakość, wskazując przede wszystkim na lepsze właściwości cieplne niż deklarowane przez producentów. Wskazuje to na prawidłowy dobór rzetelnych dostawców materiałów budowlanych, jak również pozwala osiągnąć nadprzeciętne parametry cieplne przegród zewnętrznych ($U \approx$ 0,11 W/m^{2}K), które z zapasem spełniają wymagania WT2021. Bardzo dobrą jakość użytych materiałów potwierdzają również wyniki badań wytrzymałościowych. Analizowane przegrody zapewniają również odpowiednią izolacyjność akustyczną – przegrody zewnętrzne spełniają wymagania krajowe dotyczące budynków mieszkalnych ($R'_{A,1}$ = 39 dB, $R'_{A,2}$ = 35 dB).

Numeryczna analiza cieplno-wilgotnościowa, wykonana przy użyciu specjalistycznego oprogramowania komputerowego, nie wykazała ryzyka kondensacji międzywarstwowej ani rozwoju grzybów pleśniowych w żadnym z analizowanych detali konstrukcyjnych, a także potwierdziła brak przekroczenia krytycznej wilgotności powierzchniowej przy zachowaniu poprawności projektowej węzłów. Uzyskane wyniki numerycznej analizy cieplno-wilgotnościowej są zgodne z wnioskami systematycznego przeglądu technologii przegród modułowych, w którym podkreślono, że poprawnie zaprojektowane przegrody prefabrykowane mogą osiągać parametry higrotermiczne porównywalne z przegrodami budynków tradycyjnych, pod warunkiem starannego opracowania detali konstrukcyjnych w miejscach łączeń [7].

parable to that of the envelope components of traditional buildings, provided that the structural details at the joints are carefully developed [7].

The high level of airtightness was confirmed via on-site testing (n_{50}=0.76 h^{-1}), significantly surpassing the requirements for buildings with mechanical ventilation ($n_{50} \leq 1.50$ h^{-1}) and placing the analyzed building close to the passive house standard ($n_{50} \leq 0.60$ h^{-1}). This result confirms that the technology used in the analyzed mobile home for joining sandwich panels, together with the adopted assembly procedure following the unfolding of the structure, effectively reduces the risk of air leakage typical of foldable and transportable structures. A risk identified in literature as the main technical barrier to such solutions [8] was therefore invalidated.

The energy efficiency analysis based on parametric simulations revealed a significant range of annual energy demand depending on the assumed operating conditions and design data: from 3894 kWh/a (optimal insulation, lowest setpoints, optimal building orientation) to 7065 kWh/a (no additional insulation, extreme temperature setpoints, and unfavorable orientation). The results clearly indicate that, with the default configuration of the envelope components, the building is characterized by high energy efficiency. Further improvements are also possible in terms of both energy consumption and occupants' thermal comfort. Occupant behavior remains a key factor shaping actual energy consumption, while numerical analyses make it possible to assess the range of expected variations in energy demand [19]. Optimal thermal comfort conditions were achieved at heating and cooling setpoints of 22°C and 24°C, respectively, at which the number of discomfort hours was 1042 h (approx. 15% of the occupancy period). The analyzed building was designed to ensure adequate air quality and sufficient visual comfort.

Summary

The comprehensive process for assessing technical and energy performance presented in this article confirms the validity of an all-around verification approach that simultaneously incorporates laboratory testing of materials, advanced numerical simulations, and in situ measurements. The methodology used also allows a foldable building to be evaluated against criteria typically applied to permanent residential buildings, which confirms its universal nature. The broad scope of the assessment, which utilizes numerical analyses, allows for the identification of areas where changes in operational parameters can yield measurable energy benefits while maintaining the required user comfort. Such optimization would not be possible using only a standard, simplified design assessment. Only the synergy of numerical analyses and actual measurements allows for a reliable identification of both the strengths of the design and the areas requiring further optimization.

The analyses conducted showed that the evaluated building meets the applicable technical and energy requirements with a clear margin. The results confirm that, despite the building's

Badanie szczelności wskazuje na dużą szczelność konstrukcji analizowanego budynku (n_{50} = 0,76 h^{-1}) istotnie przekraczającą wymagania dotyczące budynków z wentylacją mechaniczną ($n_{50} \leq 1{,}50$ h^{-1}), plasując analizowany budynek blisko standardu pasywnego ($n_{50} \leq 0{,}60$ h^{-1}). Wynik ten potwierdza, że zastosowana w analizowanym domu mobilnym technologia łączenia paneli warstwowych oraz przyjęta procedura montażu po rozłożeniu konstrukcji skutecznie ograniczają ryzyko nieszczelności typowe w przypadku obiektów rozkładanych i transportowalnych, na które wskazuje się w literaturze jako na główną barierę techniczną tego typu rozwiązań [8].

Analiza efektywności energetycznej na podstawie symulacji parametrycznych wykazała znaczną rozpiętość rocznego zapotrzebowania na energię w zależności od przyjętych założeń eksploatacyjnych i danych projektowych – od 3894 kWh/a (optymalna izolacja, minimalne nastawy, optymalne usytuowanie budynku) do 7065 kWh/a (brak dodatkowej izolacji, ekstremalne nastawy temperatur oraz niekorzystne usytuowanie). Wyniki jednoznacznie wskazują, że przy domyślnej konfiguracji przegród budynek charakteryzuje się dobrą efektywnością energetyczną. Możliwa jest też dalsza poprawa zarówno pod względem zużycia energii, jak i komfortu termicznego użytkowników. Zachowania użytkowników pozostają kluczowym czynnikiem kształtującym rzeczywiste zużycie energii, a analizy numeryczne umożliwiają ocenę zakresu spodziewanych wartości [19]. Optymalne warunki komfortu termicznego uzyskano w przypadku nastaw ogrzewania 22°C i chłodzenia 24°C, przy których liczba godzin dyskomfortu wynosiła 1042 h (ok. 15% okresu przebywania). Analizowany budynek zaprojektowano w sposób zapewniający odpowiednią jakość powietrza oraz wystarczający komfort oświetleniowy.

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule kompleksowy proces oceny charakterystyki techniczno-energetycznej potwierdza zasadność stosowania wieloaspektowego podejścia weryfikacyjnego, obejmującego równolegle badania laboratoryjne materiałów, zaawansowane symulacje numeryczne oraz pomiary in situ. Zastosowana metodyka pozwala ocenić budynek rozkładany również pod kątem kryteriów stosowanych standardowo w przypadku budynków mieszkalnych o konstrukcji stałej, co potwierdza jej uniwersalny charakter. Obszerny zakres oceny wykorzystujący analizy numeryczne pozwala wskazać obszary, w których zmiany parametrów eksploatacyjnych mogą przynieść wymierne korzyści energetyczne z zachowaniem wymaganego komfortu użytkowników. Wspomniana optymalizacja nie byłaby możliwa z zastosowaniem jedynie standardowej, uproszczonej oceny projektowej, która niestety jest wielokrotnie zaniedbywana. Jedynie synergia analiz numerycznych i pomiarów rzeczywistych pozwala na rzetelną identyfikację zarówno mocnych stron projektu, jak i obszarów wymagających optymalizacji.

Przeprowadzone analizy wykazały, że oceniany obiekt spełnia obowiązujące wymagania techniczne i energetyczne z wyraźnym zapasem. Otrzymane wyniki potwierdzają, iż mimo specyficznego przeznaczenia obiektu (dom mobilny), wykonanego w unikatowej technologii budynku mobilnego,

specific purpose (a mobile home) and its construction using unique technology, it is possible to maintain exceptionally good technical and energy performance. For non-standard structures, such as prefabricated mobile homes, where a wide range of locations, orientations, and foundation conditions is possible, comprehensive technical and energy verification is not only an option but a necessity. The presented results have significance beyond the analyzed prototype. The growing interest in prefabricated, modular, and mobile construction points to the need to develop repeatable procedures for verifying the workmanship quality of such structures after they have been assembled at the target site.

The comprehensive assessment methodology presented in this article addresses the above-mentioned need and can serve as a reference point for the implementation of further innovative structural solutions for foldable and transportable houses. The scope of analyses presented, covering the thermal, hygrothermal, and mechanical properties of materials, energy and thermal comfort simulations, thermal imaging, and airtightness, acoustic, and microclimate testing, is carried out by the Department of Building Materials Physics and Sustainable Design at Lodz University of Technology as a comprehensive research service available to both manufacturers of building systems and individual investors.

możliwe jest zachowanie bardzo dobrej charakterystyki techniczno-energetycznej. W przypadku obiektów o niestandardowym charakterze, takich jak prefabrykowane domy mobilne, gdzie możliwy jest szeroki zakres lokalizacji, orientacji i warunków posadowienia, kompleksowa weryfikacja techniczno-energetyczna stanowi nie tylko opcję, lecz jest konieczna. Przedstawione wyniki mają znaczenie wykraczające poza analizowany prototyp. Zwiększające się zainteresowanie budownictwem prefabrykowanym, modułowym i mobilnym wskazuje na potrzebę wypracowania powtarzalnych procedur weryfikacji jakości wykonania tego typu obiektów po rozłożeniu w miejscu docelowym.

Zaprezentowana w artykule kompleksowa, wieloaspektowa metodyka oceny stanowi odpowiedź na tę potrzebę i może być wykorzystywana jako punkt odniesienia przy wdrażaniu kolejnych innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych domów rozkładanych i transportowalnych. Przedstawiony zakres analiz, obejmujący właściwości cieplne, higrotermiczne i mechaniczne materiałów, symulacje energetyczne i komfortu cieplnego, termowizję, badania szczelności, akustyki oraz mikroklimatu, jest realizowany przez Katedrę Fizyki Materiałów Budowlanych i Budownictwa Zrównoważonego Politechniki Łódzkiej jako kompleksowa usługa badawcza, dostępna zarówno dla producentów systemów budowlanych, jak i inwestorów indywidualnych.

Received: 25.05.2026
Revised: 30.07.2026
Published: 21.10.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 25.05.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.07.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Shamim M. A Review of Sustainable Implications of Energy-Efficient Buildings in the Environment. Adv Civil Eng. 2025; https://doi.org/10.1155/adce/9584777.

[2] Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, Behar JV, Hern SC, Engelmann WH. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. J Expo Sci Environ Epidemiol. 2001; https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165.

[3] Alomari OM. Identification and Categorization of Building Defects. Civil Eng Archit. 2022;10(2):438–446. https://doi.org/10.13189/cea.2022.100204.

[4] Jain N, Burman E, Mumovic D, Davies M. Managing energy performance in buildings from design to operation using modelling and calibration. Build Serv Eng Res Technol. 2021; https://doi.org/10.1177/01436244211008317.

[5] Spudys P, Jurelionis A, Fokaides P. Conducting smart energy audits of buildings with the use of building information modelling. Energy Build. 2023;285, 112884. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112884.

[6] Tanyer AM, Tavukcuoglu A, Bekboliev M. Assessing the airtightness performance of container houses in relation to its effect on energy efficiency. Build Environ. 2018;134:59-73. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.026.

[7] Mohammed MA, Budaiwi IM, Al-Osta MA, Abdou AA. Thermo-Environmental Performance of Modular Building Envelope Panel Technologies: A Focused Review. Buildings. 2024;14(4):917. https://doi.org/10.3390/buildings14040917.

[8] Pérez-Valcárcel J, Aragón J, Muñiz S, Freire-Tellado M, Mosquera E. Transportable Temporary Homes with Folding Roof. Archit Eng Des Manag. 2024;20(2):337-357. https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2166009.

[9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 (ze zm.). https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20020750690.

[10] Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, Strand RK, Liesen RJ, Fisher DE, Witte MJ, Glazer J. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy Build. 2001;33(4):319-331. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6.

[11] Khan ME, Farmeena K. A comparative study of white box, black box and grey box testing techniques. Int J Adv Comput Sci Appl. 2012;3(6):12-15. http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2012.030603.

[12] Li Y, O'Neill Z, Zhang L, Chen J, DeGraw J. Grey-box modeling and application for building energy simulations – a critical review. Renew Sust Energ Rev. 2021;146:111174. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111174.

[13] EnergyPlus Weather Data. U.S. Department of Energy. https://energyplus.net/weather.

[14] Projekt TLM2000 – Typowe Lata Meteorologiczne dla Polski (dane 2001–2020). fizyka-budowli.pl; 2022. http://fizyka-budowli.pl/projekt-tlm-2000-blog/.

[15] Wilde P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: a framework for investigation. Autom Constr. 2014;41:40-49. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009.

[16] Mahdavi A, Berger C, Amin H, et al. The role of occupants in buildings' energy performance gap: myth or reality? Sustainability. 2021;13(6):3146. https://doi.org/10.3390/su13063146.

[17] Fanger PO. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.

[18] Jabłoński M, Koniorczyk M. Wpływ zmienności wybranych właściwości materiałów na parametry akustyczne układu stropowego z podłogą pływającą pod kątem dźwięków uderzeniowych. Materiały Budowlane. 2021;588(8):2–6. ISSN 0137-2971.

[19] Paone A, Bacher JP. The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: a review of the state of the art. Energies. 2018;11(4):953. https://doi.org/10.3390/en11040953.