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

dr inż. Anna Dominika Bochenek[1)*)]
ORCID: 0000-0003-3396-2006
dr hab. inż. Katarzyna Klemm[1)]
ORCID: 0000-0001-8518-4328
dr inż. Konrad Witczak[1)]
ORCID: 0000-0002-1946-5030

Assessment of the effectiveness of green roofs as a climate change adaptation strategy

Ocena efektywności dachu zielonego jako strategii adaptacyjnej do zmian klimatu

DOI: 10.15199/33.2026.10.04

Abstract. This article presents an analysis of the impact of selected adaptation solutions, including green roofs, on the thermal comfort of occupants of a room located on the top floor of a residential building. Calculations were performed using dynamic simulation in the DesignBuilder/EnergyPlus environment. Indoor operating temperature was adopted as the primary indicator for assessing thermal comfort. Additionally, the results were evaluated against adaptive thermal comfort criteria in accordance with the EN 16798-1:2019 standard. The research conducted indicated that roof insulation (U = 0,15 W/(m²K)) had greatest impact on improving thermal conditions in the room. The use of a green roof without additional insulation led to limited improvement in thermal conditions in the living spaces.

Key words: building structures; roof structure; green roof; thermal conditions; adaptive comfort

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych rozwiązań adaptacyjnych, w tym dachów zielonych, na komfort cieplny użytkowników pomieszczenia zlokalizowanego na ostatniej kondygnacji budynku mieszkalnego. Obliczenia wykonano metodą symulacji dynamicznej w środowisku DesignBuilder/EnergyPlus. Jako podstawowy wskaźnik oceny komfortu cieplnego przyjęto temperaturę operacyjną w pomieszczeniu. Dodatkowo wyniki odniesiono do kryteriów adaptacyjnego komfortu cieplnego zgodnie z podejściem EN 16798-1:2019. Przeprowadzone badania wykazały, że największy wpływ na poprawę warunków cieplnych w pomieszczeniu miało docieplenie dachu (U = 0,15 W/(m²K)). Zastosowanie dachu zielonego bez dodatkowej izolacji prowadziło do ograniczonej poprawy warunków cieplnych w pomieszczeniach mieszkalnych.

Słowa kluczowe: obiekty budowlane; konstrukcja dachu; dach zielony; warunki cieplne; komfort adaptacyjny

Climate change currently represents one of the most significant development challenges for modern cities, directly affecting residents' quality of life, the state of the environment, and the functioning of technical infrastructure [1]. Particularly vulnerable are the compact, historical developments of post-industrial cities, characterized by a high degree of surface development, limited share of biologically active areas and the intensification of the urban heat island phenomenon [2, 3].

Adaptation measures implemented in post-industrial cities undergoing revitalization processes, such as Łódź, are of particular importance. The current trend of "returning to the center" is increasing the intensity of use of historic city center districts, which are often not adapted to modern climate threats [4]. As outdoor air temperatures rise and heatwaves intensify, not only does outdoor comfort deteriorate, but the risk of indoor overheating also increases. This applies primarily to rooms located on the top floors, where the roof partition separates the interior from the outside environment [5].

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Adress for correspondence:
anna.bochenek@p.lodz.pl

Zmiany klimatyczne stanowią obecnie jedno z najważniejszych wyzwań rozwojowych współczesnych miast, wpływając bezpośrednio na jakość życia mieszkańców, stan środowiska oraz funkcjonowanie infrastruktury technicznej [1]. Szczególnie narażona jest zwarta, historyczna zabudowa miast poprzemysłowych, charakteryzująca się wysokim stopniem zabudowy powierzchni, ograniczonym udziałem terenów biologicznie czynnych oraz intensyfikacją zjawiska miejskiej wyspy ciepła [2, 3].

Szczególnego znaczenia nabierają działania adaptacyjne realizowane w miastach poprzemysłowych podlegających procesom rewitalizacji, takich jak Łódź. Obserwowany współcześnie trend „powrotu do centrum" powoduje zwiększenie intensywności użytkowania historycznych dzielnic śródmiejskich, które często nie są przystosowane do współczesnych zagrożeń klimatycznych [4]. W warunkach wzrostu temperatury powietrza zewnętrznego i nasilania fal upałów pogorszeniu ulega nie tylko komfort zewnętrzny, ale również zwiększa się ryzyko przegrzewania pomieszczeń. Dotyczy to przede wszystkim pomieszczeń zlokalizowanych na ostatnich kondygnacjach, gdzie przegroda dachowa oddziela wnętrze od środowiska zewnętrznego [5].

Dach jest szczególnie narażony na oddziaływanie promieniowania słonecznego. W okresie letnim jego powierzchnia może ulegać znacznemu nagrzewaniu, co wpływa na tempera-

The roof is particularly exposed to solar radiation. During the summer, its surface can heat up significantly, which affects the temperature of the internal surfaces of building partitions, the mean radiant temperature, and the operating temperature within the room [6]. Therefore, the assessment of the effects of roof modernization should not be limited solely to an analysis of the heat transfer coefficient (U-value) but should also take into account dynamic thermal conditions within the rooms [7]. One possible solution to limit the impact of external conditions is the use of a green roof [8]. The vegetation and substrate layer can influence the thermal balance of the partition by shading the surface, increasing the heat capacity, retaining moisture and evapotranspiration [9]. At the same time, in the case of modernized buildings, it is necessary to meet the current requirements regarding thermal insulation of partitions [10].

Scope of analysis

The location and meteorological data pertained to the Metropolitan Area of Łódź. Research was carried out on the impact of adaptation strategies, including green roofs, on the thermal comfort of users of a residential room located on the top floor of a building located in the city center, in a compact, historical development. The internal dimensions of the model room were 512 cm (north and south sides) and 423 cm (east and west sides), with a height of 280 cm. It was assumed that it was exposed to significant influence of external conditions through the roof partition. Four roof construction variants were considered in the calculations (table 1).

For the LF base variant, a roof with a total thickness of 32 cm and a heat transfer coefficient U = 0,54 W/(m²K) was adopted. The GR variant included the addition of a layer of greenery and substrate, while maintaining the U-value of the base partition, and the RTR2021 variant included the addition of 22 cm of thermal insulation, which allowed to obtain U = 0,15 W/(m²K). The RTR2021/GR variant combined the thermal insulation layer with the green roof system (figure 1, table 2).

The green roof was represented in the dynamic model as a layer influencing the thermal balance of the building envelope (table 3). Shortwave and longwave radiation exchange, convection, evapotranspiration, and heat storage and conduction within the substrate were taken into account. The adopted parameters correspond to an extensive green roof with relatively low vegetation and a substrate layer of 15 cm thick.

Table 1. Characteristics of the analyzed roof variants
Tabela 1. Charakterystyka analizowanych wariantów dachu

Variant/ Wariant	Total thickness [cm]/ Grubość całkowita [cm]	Coefficient U [W/(m²K)]/ Współczynnik U [W/(m²K)]	Description/Opis
LF	32	0.54	basic variant – roof over the top floor/ wariant bazowy – dach nad ostatnią kondygnacją
GR	62	0.54	base roof with a green roof layer/ dach bazowy z warstwą dachu zielonego
RTR2021	54	0.15	insulated roof to meet technical requirements/ dach docieplony do poziomu wymagań technicznych
RTR2021/GR	84	0.15	insulated roof with an additional green roof layer/ dach docieplony z dodatkową warstwą dachu zielonego

turę wewnętrznych powierzchni przegród, średnią temperaturę promieniowania oraz temperaturę operacyjną w pomieszczeniu [6]. Z tego względu ocena skutków modernizacji dachu nie powinna ograniczać się wyłącznie do analizy współczynnika przenikania ciepła U, lecz uwzględniać również dynamiczne warunki cieplne wewnątrz pomieszczeń [7]. Jednym z możliwych rozwiązań ograniczających oddziaływanie warunków zewnętrznych jest zastosowanie dachu zielonego [8]. Warstwa roślinności i substratu może wpływać na bilans cieplny przegrody przez zacienienie powierzchni, zwiększenie pojemności cieplnej, retencję wilgoci oraz ewapotranspirację [9]. Jednocześnie w przypadku budynków modernizowanych konieczne jest spełnienie aktualnych wymagań dotyczących izolacyjności cieplnej przegród [10].

Zakres analizy

Lokalizacja oraz dane meteorologiczne dotyczyły Strefy Wielkomiejskiej Łodzi. Przeprowadzono badania wpływu strategii adaptacyjnych, w tym dachów zielonych, na komfort cieplny użytkowników pomieszczenia mieszkalnego, zlokalizowanego na ostatniej kondygnacji budynku mieszczącego się w śródmiejskiej, zwartej, historycznej zabudowie miasta. Wymiary wewnętrzne modelowego pomieszczenia wynosiły 512 cm (strona północna i południowa) oraz 423 cm (strona wschodnia oraz zachodnia), a wysokość 280 cm. Przyjęto, że jest ono narażone na istotny wpływ warunków zewnętrznych przez przegrodę dachową. W obliczeniach uwzględniono cztery warianty konstrukcji dachu (tabela 1).

W przypadku wariantu bazowego LF przyjęto dach o całkowitej grubości 32 cm i współczynniku przenikania ciepła U = 0,54 W/(m²K). Wariant GR obejmował dodanie warstwy zieleni i substratu, z zachowaniem współczynnika U przegrody bazowej, a wariant RTR2021 dodanie 22 cm izolacji cieplnej, co pozwoliło uzyskać U = 0,15 W/(m²K). Wariant RTR2021/GR łączył warstwę izolacji cieplnej z układem dachu zielonego (rysunek 1, tabela 2).

Zielony dach odwzorowano w modelu dynamicznym, jako warstwę oddziałującą na bilans cieplny przegrody (tabela 3). Uwzględniono wymianę promieniowania krótkofalowego i długofalowego, konwekcję, ewapotranspirację oraz magazynowanie i przewodzenie ciepła w substracie. Przyjęte parametry odpowiadają ekstensywnemu zielonemu dachowi z relatywnie niską roślinnością i warstwą substratu grubości 15 cm.

Calculation method

Calculations were performed using the dynamic simulation method in the Design-Builder software [11], utilizing the EnergyPlus engine [12]. A residential room located directly beneath the roof partition was analyzed. For each roof design variant, identical room geometry, usage profile, internal heat gains, ventilation parameters, and weather data were implemented. To ensure model stability, simulations were initiated on June 1. The roof design was a variable subject to modification across different variants. The primary result of the calculations was the operating temperature within the room. It is a more representative indicator of thermal comfort than air temperature, as it also takes into account the thermal effect of the surfaces of building partitions [13]. This is of particular importance for rooms on the top floor, as the heating of the roof affects the ceiling surface temperature and, consequently, the mean radiant temperature experienced by the user [14].

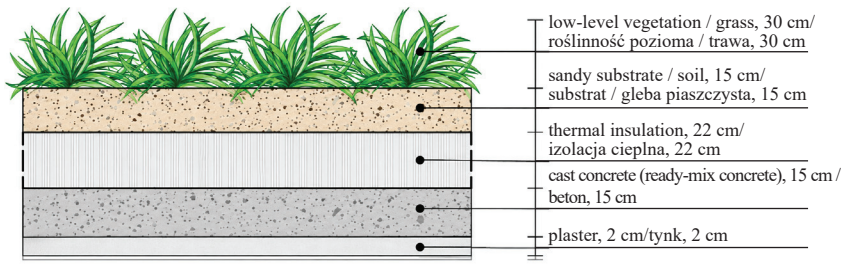


Fig. 1. Green roof structure – RTR 2021/GR variant *Fig. author*
Rys. 1. Konstrukcja dachu zielonego – wariant RTR2021/GR *Rys. autorka*

Table 2. Layer arrangement in the RTR2021/GR variant *Own study*
Tabela 2. Układ warstw w wariancie RTR2021/GR *Opracowanie autorzy*

Layer/Warstwa	Thickness [cm]/ Grubość [cm]
Low-level vegetation/grass/ Roślinność pozioma/trawa	30
Sandy substrate/soil/ Substrat/gleba piaszczysta	15
Thermal insulation/ Izolacja cieplna	22
Cast concrete (ready-mixed concrete)/ Beton lany (towarowy)	15
Plaster/Tynk	2

Adaptive approach to thermal comfort assessment

The assessment of adaptive thermal comfort was carried out in accordance with the approach used in EN 16798–1:2019 for buildings without mechanical cooling [15]. The adaptive method assumes that users' thermal sensations depend not only on the instantaneous indoor temperature but also on outdoor conditions, to which users gradually adapt. During periods of warm weather, the acceptable indoor temperature level may therefore be higher than during cooler periods. The analysis assumed that the assessment concerns summer conditions – the warmest day of a Typical Meteorological Year (06/07/2021) – and the risk of overheating, therefore special attention was paid to exceeding the upper limits of the comfort category. De-

Metoda obliczeń

Obliczenia wykonano metodą symulacji dynamicznej w programie DesignBuilder [11] z wykorzystaniem silnika EnergyPlus [12]. Analizie poddano pomieszczenie mieszkalne zlokalizowane bezpośrednio pod przegrodą dachową. W przypadku każdego wariantu konstrukcji dachu przyjęto identyczną geometrię pomieszczenia, taki sam profil użytkowania, ten sam zysk wewnętrzny, parametry wentylacji oraz dane pogodowe. W celu zapewnienia stabilizacji modelu, symulacje rozpoczynano 1 czerwca. Rozwiązanie dachu było zmienną ulegającą modyfikacjom w różnych wariantach. Podstawowym wynikiem obliczeń była temperatura operacyjna w pomieszczeniu. Jest ona bardziej reprezentatywnym wskaźnikiem komfortu cieplnego niż temperatura powietrza, ponieważ uwzględnia również oddziaływanie cieplne powierzchni przegród [13]. W przypadku pomieszczeń ostatniej kondygnacji ma to szczególne znaczenie, gdyż nagrzewanie dachu wpływa na temperaturę powierzchni sufitu, a przez to na średnią temperaturę promieniowania odczuwaną przez użytkownika [14].

Table 3. Green roof model
Tabela 3. Model dachu zielonego

Parameter/Parametr	Height/ Wartość
Plant height/Wysokość roślin	30 cm
Leaf Area Index/ Wskaźnik powierzchni liści	1,5
Leaf reflectivity/ Refleksyjność liści	0,22
Leaf emissivity/ Emisyjność liści	0,95
Minimal stomatal resistance/ Minimalny opór szparkowy	180 s/m
Maximum volumetric water content at saturation/ Maksymalna wilgotność objętościowa przy nasyceniu	0,44
Minimum residual moisture/ Minimalna wilgotność resztkowa	0,01
Initial volumetric water content/ Początkowa wilgotność objętościowa	0,15

Podejście adaptacyjne do oceny komfortu cieplnego

Ocena adaptacyjnego komfortu cieplnego została przeprowadzona zgodnie z podejściem stosowanym w EN 16798-1:2019 dotyczącym budynków bez mechanicznego chłodzenia [15]. Metoda adaptacyjna zakłada, że odczucia cieplne użytkowników nie zależą wyłącznie od chwilowej temperatury w pomieszczeniu, lecz również od warunków zewnętrznych, do których użytkownicy stopniowo się adaptują. W okresie ciepłej pogody akceptowalny poziom temperatury wewnętrznej może

termining adaptive comfort requires two basic sets of hourly data: indoor operating temperature and outdoor temperature. The operating temperature is the result of the thermal zone simulation, while the outside temperature comes from the weather file used in the calculations. Based on the outside temperature, a running mean outside temperature is calculated, which forms the basis for determining the comfort temperature.

The running mean outdoor temperature θrm describes the thermal history of outdoor conditions preceding the analyzed day. Unlike a simple arithmetic mean, greater weight is assigned to the days immediately preceding the analyzed period, and less weight to earlier days. As a result, the θrm index better reflects the process of user adaptation to current weather conditions.

The following relationship was used in the calculations:

$$\theta comf = 0{,}33 \times \theta rm + 18{,}8$$

where:

θcomf – adaptive comfort temperature, θrm – running mean outdoor temperature. In the case of the analyzed day, it was assumed θrm = 24,17°C, what it yielded θcomf = 26,78°C.

The operating temperature results were compared with the limits of three comfort categories. Category I corresponds to a high level of expectations regarding the indoor environment, category II standard conditions, category III to acceptable conditions but with a reduced level of comfort. The following ranges were adopted in the analysis: category I – θcomf ± 2°C, category II – θcomf ± 3°C, category III – θcomf ± 4°C.

In the case of θcomf = 26,78°C, the upper category limit was respectively: 28,78°C – category I, 29,78°C – category II and 30,78°C – category III. Each hourly value of operating temperature was assigned to one of the following classes: category I, outside category I but within category II, outside category II but within category III, or above category III. The last group was treated as an indicator of room overheating.

Operating temperature

The highest temperature values occurred in the LF baseline variant (figure 2, table 4). The addition of a green roof in the GR variant resulted in a slight reduction in operating temperature. A significant improvement was achieved after insulating the roof under the RTR2021 scenario. The lowest operating temperature values occurred in the RTR2021/GR variant. The average operating temperature in the LF variant was 31,44°C, while in the GR variant it decreased to 31,13°C, which means a reduction of 0,31°C. The RTR2021 variant reduced the average operating temperature to 29,65°C – a decrease of 1,79°C compared to the baseline variant. The lowest average temperature was obtained in the RTR2021/GR variant – 29,60°C, which corresponds to a reduction of 1,84°C compared to LF.

The results indicate that the use of a green roof on an uninsulated partition improves thermal conditions, but the effect is moderate. The greatest impact was achieved by improving the roof's thermal insulation. Adding a green roof to the already insulated partition brought a further, but small, improvement.

być zatem wyższy niż w okresach chłodniejszych. W analizie przyjęto, że ocena dotyczy warunków letnich – najcieplejszego dnia Typowego Roku Meteorologicznego (06/07/2021) – i ryzyka przegrzewania, dlatego szczególną uwagę zwrócono na przekroczenie górnych granic kategorii komfortu. Do wyznaczenia komfortu adaptacyjnego potrzebne są dwa podstawowe zbiory danych godzinowych: temperatura operacyjna wewnątrz pomieszczenia oraz temperatura zewnętrzna. Temperatura operacyjna jest wynikiem symulacji strefy cieplnej, natomiast temperatura zewnętrzna pochodzi z pliku pogodowego wykorzystanego w obliczeniach. Na podstawie temperatury zewnętrznej oblicza się średnią kroczącą temperaturę zewnętrzną, która stanowi podstawę wyznaczenia temperatury komfortu.

Średnia krocząca temperatura zewnętrzna θrm opisuje cieplną historię warunków zewnętrznych poprzedzających analizowaną dobę. W odróżnieniu od zwykłej średniej arytmetycznej większą wagę przypisuje się dniom bezpośrednio poprzedzającym analizowany okres, a mniejszą dniom wcześniejszym. Dzięki temu wskaźnik θrm lepiej odwzorowuje proces adaptacji użytkowników do aktualnych warunków pogodowych.

W obliczeniach zastosowano zależność:

$$\theta comf = 0{,}33 \times \theta rm + 18{,}8$$

gdzie:

θcomf – temperatura komfortu adaptacyjnego, θrm – średnia krocząca temperatura zewnętrzna. W przypadku analizowanej doby przyjęto θrm = 24,17°C, co dało θcomf = 26,78°C.

Wyniki temperatury operacyjnej porównano z granicami trzech kategorii komfortu. Kategoria I odpowiada wysokiemu poziomowi oczekiwań wobec środowiska wewnętrznego, kategoria II warunkom standardowym, natomiast kategoria III warunkom dopuszczalnym, ale o obniżonym poziomie komfortu. W analizie przyjęto następujące zakresy: kategoria I – θcomf ± 2°C, kategoria II – θcomf ± 3°C, kategoria III – θcomf ± 4°C.

W przypadku θcomf = 26,78°C górna granica kategorii wyniosła odpowiednio: 28,78°C – kategorii I, 29,78°C – kategorii II oraz 30,78°C – kategorii III. Każdą godzinową wartość temperatury operacyjnej przypisano do jednej z klas: w kategorii I, poza kategorią I, ale w kategorii II, poza kategorią II, ale w kategorii III albo powyżej kategorii III. Ostatnia grupa została potraktowana jako wskaźnik przegrzewania pomieszczenia.

Temperatura operacyjna

Największe wartości temperatury wystąpiły w wariancie bazowym LF (rysunek 2, tabela 4). Dodanie zielonego dachu w wariancie GR spowodowało nieznaczne obniżenie temperatury operacyjnej. Znacznie większą poprawę uzyskano po docieplenu dachu w wariancie RTR2021. Najmniejsze wartości temperatury operacyjnej wystąpiły w wariancie RTR2021/GR. Średnia temperatura operacyjna w wariancie LF wyniosła 31,44°C, a w wariancie GR zmniejszyła się do 31,13°C, co oznacza redukcję o 0,31°C. Wariant RTR2021 pozwolił ograniczyć średnią temperaturę operacyjną do 29,65°C, czyli

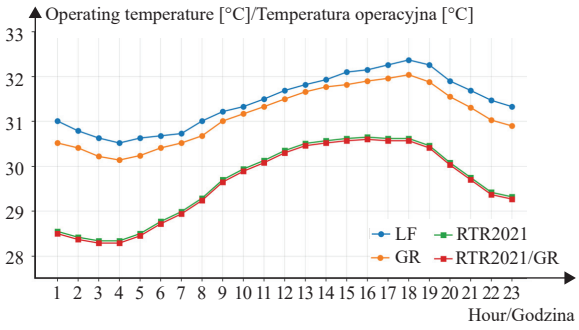


Fig. 2. The course of the operating temperature in the room for the considered variants
Rys. 2. Przebieg temperatury operacyjnej w pomieszczeniu w rozpatrywanych wariantach

Table 4. Operating temperature (T_{op}) results summary
Tabela 4. Zestawienie wyników temperatury operacyjnej (T_{op})

Variant/ Wariant	Mean: T_{op} [°C]/ Średnia: T_{op} [°C]	Minimum: T_{op} [°C]	Maximum T_{op} [°C]/ Maksimum: T_{op} [°C]	Reduction: T_{op} [°C] Redukcja: T_{op} [°C]
LF	31,44	30,52	32,37	–
GR	31,13	30,14	32,04	0,31
RTR2021	29,65	28,34	30,65	1,79
RTR2021/ GR	29,60	28,29	30,60	1,84

Assessment of adaptive thermal comfort

The LF variant, representing the base roof over the top floor, exhibited the least favorable distribution of results (figure 3). All operating temperature values exceeded the upper limit of category II, while most hours were above the upper limit of category III. This indicates that, during the analyzed day, the room was exposed to prolonged overheating, and the thermal inertia of the base building partition was insufficient to maintain conditions acceptable in terms of adaptive thermal comfort.

The GR variant shifted the data points towards a lower operating temperature, confirming the positive effect of the vegetation layer and substrate. However, this improvement was limited. A significant number of hours still exceeded the upper limit of category III; therefore, a green roof applied to an uninsulated partition should not be viewed as a standalone measure for ensuring the required level of indoor comfort.

The RTR2021 and RTR2021/GR variants yielded a different pattern of results. For these variants, the points were below the upper limit of category III, which means eliminating the largest exceedances of adaptive comfort. In practice, this means that improving roof insulation to a U-value of 0,15 W/(m²K) significantly reduces the risk of overheating in the top-floor room.

The comparison of the number of hours in each category shows that the adaptive assessment provides more useful information than the average temperature value (table 5). It makes it possible to determine not only which variant lowers the operating temperature but also whether that reduction is sufficient to shift conditions from the discomfort zone to an acceptable category. In the case analyzed, the use of a green roof improves thermal conditions but does not eliminate the risk of exceeding

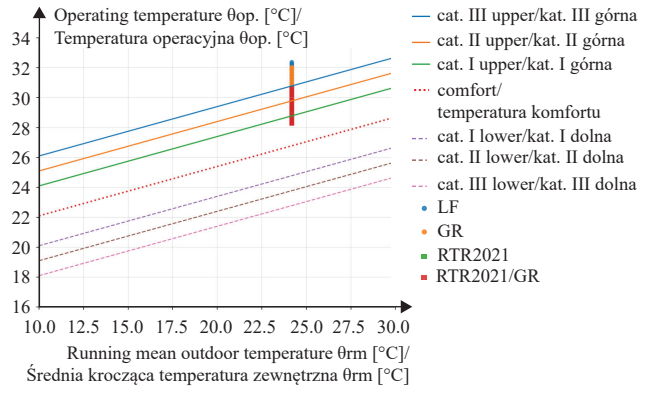


Fig. 3. Assessment of adaptive thermal comfort for the analyzed roof variants in accordance with the EN 16798-1:2019 approach
Rys. 3. Ocena adaptacyjnego komfortu cieplnego w przypadku analizowanych wariantów dachu zgodnie z podejściem EN 16798-1:2019

o 1,79°C względem wariantu bazowego. Najniższą średnią temperaturę uzyskano w wariancie RTR2021/GR – 29,60°C, co odpowiada redukcji o 1,84°C względem LF.

Wyniki wskazują, że zastosowanie zielonego dachu na przegrodzie niedocieplonej poprawia warunki cieplne, lecz efekt ten jest umiarkowany. Największy efekt uzyskano przez poprawę izolacyjności cieplnej dachu. Dodanie zielonego dachu do przegrody już docieplonej przyniosło dalszą, ale niewielką poprawę.

Ocena adaptacyjnego komfortu cieplnego

Wariant LF, reprezentujący dach bazowy nad ostatnią kondygnacją, charakteryzował się najmniej korzystnym rozkładem wyników (rysunek 3). Wszystkie wartości temperatury operacyjnej przekraczały górną granicę kategorii II, a większość godzin znajdowała się powyżej górnej granicy kategorii III. Oznacza to, że w analizowanej dobie pomieszczenie było narażone na długotrwałe przegrzewanie, a bezwładność cieplna przegrody bazowej nie była wystarczająca do utrzymania warunków akceptowalnych z punktu widzenia komfortu adaptacyjnego.

Wariant GR przesunął punkty w kierunku niższej temperatury operacyjnej, co potwierdza pozytywny wpływ warstwy roślinnej i substratu. Poprawa ta była jednak ograniczona. Znaczna część godzin nadal przekraczała górną granicę kategorii III, dlatego zielony dach zastosowany na przegrodzie niedocieplonej nie powinien być interpretowany jako samodzielny środek zapewniający wymagany poziom komfortu wewnętrznego.

Warianty RTR2021 i RTR2021/GR wykazały inny charakter wyników. W przypadku tych wariantów punkty znajdowały się poniżej górnej granicy kategorii III, co oznacza eliminację największych przekroczeń komfortu adapta-

Table 5. Classification of hours in terms of adaptive comfort

Own study

Tabela 5. Klasyfikacja godzin w kategoriach komfortu adaptacyjnego

Opracowanie: autorzy

Variant/ Wariant	Cat. I [h]/ Kat. I[h]	Within cat. II [h]/ Tylko kat. II [h]	Within cat. III [h]/ Tylko kat. III [h]	Above cat. III [h]/ Powyżej kat. III [h]
LF	0	0	5	18
GR	0	0	8	15
RTR2021	6	6	11	0
RTR2021/ GR	6	6	11	0

permissible comfort category limits. Only roof insulation to U = 0,15 W/(m²K) limits the operating temperature to a level within the limits of categories I-III.

It should be emphasized that the adaptive method does not assess comfort based on a single, fixed temperature threshold, such as 26°C or 28°C. Comfort limits change with external conditions and therefore with the current state of adaptation of users. Consequently, this method is particularly useful for evaluating naturally ventilated buildings or those analyzed without active cooling. When designing or modernizing buildings, the results of such an analysis can be used to compare partition variants, assess the risk of overheating, and indicate whether the proposed solution only improves the energy parameters of the partition or actually translates into conditions experienced by users.

Received: 15.06.2026
Revised: 04.08.2026
Published: 21.10.2026

cyjnego. W praktyce oznacza to, że poprawa izolacyjności dachu do poziomu U = 0,15 W/(m²K) istotnie ogranicza ryzyko przegrzewania pomieszczenia ostatniej kondygnacji.

Zestawienie liczby godzin w poszczególnych kategoriach pokazuje, że ocena adaptacyjna dostarcza informacji bardziej użytecznej niż wartość średniej temperatury (tabela 5). Pozwala bowiem określić nie tylko, który wariant obniża temperaturę operacyjną, ale także czy obniżenie to jest wystarczające do przejścia z obszaru dyskomfortu do kategorii akceptowalnych. W analizowanym przypadku zastosowanie zieleni dachowej poprawia warunki cieplne, ale nie usuwa ryzyka przekroczenia dopuszczalnych kategorii komfortu. Dopiero docieplenie dachu do U = 0,15 W/(m²K) ogranicza temperaturę operacyjną do poziomu mieszczącego się w granicach kategorii I-III.

Należy podkreślić, że metoda adaptacyjna nie ocenia komfortu na podstawie jednego stałego progu temperatury, np. 26°C lub 28°C. Granice komfortu zmieniają się wraz z warunkami zewnętrznymi, a więc z aktualnym stanem adaptacji użytkowników. Dzięki temu metoda ta jest szczególnie przydatna przy ocenie budynków wentylowanych naturalnie lub budynków analizowanych w trybie bez aktywnego chłodzenia. W przypadku projektowania lub modernizacji budynków wyniki takiej analizy mogą być wykorzystane do porównania wariantów przegród, oceny ryzyka przegrzewania oraz wskazania, czy proponowane rozwiązanie poprawia jedynie parametry energetyczne przegrody, czy faktycznie przekłada się na warunki odczuwane przez użytkowników.

Artykuł wpłynął do redakcji: 15.06.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.08.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Sekuła H, Wiejak-Roy G, Bieda A. Assessment of urban quality of life under climate change – A framework for Europe. Urban Climate 2026; https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102988

[2] Starczewski T, Rogatka K, Kukulska-Kozieł A, Noszczyk T, Cegielska K. Urban green resilience: Experience from post-industrial cities in Poland. GSF 2023; https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101560

[3] Bronder J, Kurianowicz A, Piasecka J, Krupanek J, Krzyżak J. Delimitation and Prioritization of Climate-Affected Areas Using the Example of a Post-Industrial City. Sustainability 2024; https://doi.org/10.3390/su16103957

[4] Filho WL, Tuladhar L, Li C, Balogun ALB, Kovaleva M, Abubakar IR, Azadi H, Donkor FKK. Climate change and extremes: implications on city livability and associated health risks across the globe. J. Clim. Change Strateg. Manag. 2022; https://doi.org/10.1108/IJCCSM-07-2021-0078

[5] Vourdoubas J. Review of the Benefits of Green Roofs. Int. J. Curr. Sci. Res. Rev. 2024; https://doi.org/10.47191/ijcsrr/V7-i9-48

[6] Alaa R, Elbalazi A, Ismaeel WSE. Optimal Roof Strategy for Mitigating Urban Heat Island in Hot Arid Climates: Simulation and Python-Based Multi-Criteria Decision Analysis. Urban Sci. 2025; https://doi.org/10.3390/urbansci9080310

[7] De Cristo E, Evangelisti L, Barbaro L, De Lieto Vollaro R, Asdrubali F. A Systematic Review of Green Roofs' Thermal and Energy Performance in the Mediterranean Region. Energies 2025; https://doi.org/10.3390/en18102517

[8] Dogan E, Cuomo F, Battisti L. Reviving Urban Greening in Post-Industrial Landscapes: The Case of Turin. Sustainability 2023; https://doi.org/10.3390/su151712760

[9] Mihalakakou G, Souliotis M, Papadaki M, Menounou P, Dimopoulos P, Kolokotsa D, Paravantis JA, Tsangrassoulis A, Panaras G, Giannakopoulos E, Papaefthimiou S. Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. Renew. Sustain. Energy Rev. 2023; https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306

[10] Ertop H, Atılgan A, Jakubowski T, Kocięcka J. The Benefits of Green Roofs and Possibilities for Their Application in Antalya, Turkey. Sustainability 2025; https://doi.org/10.3390/su17093949

[11] Pragati S, Shanthi Priya R, Pradeepa C, Senthil R. Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate. Sustainability 2023; https://doi.org/10.3390/ su15032006

[12] Sailor DJ. A green roof model for building energy simulation programs. Energy and Buildings 2008; https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001

[13] d'Ambrosio Alfano FR, Olesen BW, Pepe D, Palella BI. Working with Different Building Energy Performance Tools: From Input Data to Energy and Indoor Temperature Predictions. Energies 2023; https://doi.org/ 10.3390/ en16020743

[14] Mba EJ, Oforji PI, Okeke FO, Ozigbo IW, Onyia CDF, Ozigbo CA, Ezema EC, Awe FC, Nnaemeka-Okeke RC, Onyia SC. Assessment of Floor-Level Impact on Natural Ventilation and Indoor Thermal Environment in Hot–Humid Climates: A Case Study of a Mid-Rise Educational Building. Buildings 2025; https://doi.org/10.3390/buildings15050686

[15] Polski Komitet Normalizacyjny. EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6.