

dr inż. Anna Dudzińska¹⁾
ORCID: 0000-0003-1349-6108

Efektywność nocnej wentylacji w ograniczaniu przegrzewania pasywnej hali sportowej w Krakowie

Efficiency of night ventilation in limiting the overheating of passive sports hall in Cracow

DOI: 10.15199/33.2021.01.01

Streszczenie. Okres letni jest szczególnie trudny do zagwarantowania odpowiednich warunków mikroklimatycznych w obiektach sportowych. Zysk od wewnętrznych źródeł ciepła oraz szczelna obudowa w połączeniu z wysoką temperaturą zewnętrzną mogą łatwo doprowadzić do przegrzania i zachwiania równowagi cieplnej organizmu. W artykule zwrócono uwagę na wpływ przewietrzania nocnego na komfort termiczny w pasywnym budynku hali sportowej. Bazując na badaniach doświadczalnych warunków termicznych w hali, utworzono model obiektu w programie Design Builder. Przez analizy symulacyjne rozpatrywano w programie warunki termiczne, jakie powstają w różnych wariantach wentylacji naturalnej i mechanicznej. Symulacje przeprowadzono dla okresu od 01.05. do 30.06. Zaprezentowane w artykule wyniki mają na celu pokazanie, iż przewietrzanie naturalne w obiekcie o dużej kubaturze jest najskuteczniejszym i najprostszym sposobem ograniczania przegrzewania latem.

Słowa kluczowe: nocna wentylacja; pasywna hala sportowa; Design Builder; komfort cieplny; przegrzewanie.

Abstract. It is especially difficult to provide optimal microclimatic conditions in sports facilities during summer time. The internal heat gains and an airtight building insulation, combined with high external temperature can easily lead to overheating and upsetting of the body's thermal balance. This article focuses primarily on the effect of the natural night ventilation on the thermal comfort in a passive sports hall building. Based on experimental studies of thermal conditions in the hall, a simulation model was made using the Design Builder program. Through simulation analysis, the program considered thermal conditions that arise in various scenarios of natural and mechanical ventilation. The simulation was performed from 01th May to 30th June. Results presented in this article show that the natural ventilation in a large volume building is the most effective and the easiest way to reduce overheating in summer.

Keywords: night ventilation; passive sports hall; Design Builder; thermal comfort; overheating.

Globalne ocieplenie i nasilające się w ciągu ostatnich lat ekstremalne zjawiska pogodowe dotyczą w sposób pośredni lub bezpośredni wszystkich gałęzi naszego życia. W sektorze budownictwa konieczne stało się wdrażanie rozwiązań pozwalających na projektowanie i eksploatację efektywnych energetycznie i ekologicznych budynków, z jednoczesnym zapewnieniem odpowiedniej jakości środowiska wewnętrznego. Obiekty sportowe o specyficznych wymaganiach mikroklimatycznych, ze względu na temperaturę eksploatacji oraz aktywność fizyczną użytkowników, są pod tym względem dużym wyzwaniem dla inwestorów oraz zarządzających. Dodatkowe kryterium małego zużycia energii, w wyjątkowo szczelnych i dobrze zaizolowanych budynkach, powoduje często przegrzewanie wnętrza, a w efekcie dyskomfort użytkowników.

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej; adudzińska@pk.edu.pl

Jednym ze sposobów usunięcia energii nagromadzonej w pojemnych przegródach budynku i zredukowania temperatury wewnętrznej jest **wentylowanie nocne budynku**. Wówczas minimalizowane są koszty związane z energią na chłodzenie mechaniczne, a obniżona temperatura pojemnych przegród może pomóc w uzyskaniu komfortu cieplnego podczas następnego gorącego dnia [3, 5, 6, 10]. Skuteczność wentylacji nocnej zależy od lokalnych parametrów klimatycznych, pojemności cieplnej budynku oraz konwekcyjnego przemieszczania ciepła pomiędzy powietrzem wentylacyjnym a masą termiczną, a także parametrów technicznych instalacji wentylacyjnej [4, 11].

Zaprezentowane w artykule wyniki badań umożliwiają ocenę, która z metod chłodzenia nocnego jest najskuteczniejszą i najprostszym sposobem ograniczania przegrzewania latem w niskoenergetycznym obiekcie sportowym o dużej kubaturze [2].

Badania mikroklimatu w pasywnej hali sportowej

W ramach przeprowadzonych badań doświadczalnych wykonano pomiary komfortu cieplnego hali sportowej Uniwersytetu Rolniczego (UR) w Krakowie, zrealizowanej w pasywnym standardzie energetycznym. Obiekt o powierzchni zabudowy 1776,2 m² ma wielofunkcyjną arenę sportową z trybunami na ok. 156 osób oraz zaplecze szatniowo-sanitarne z pomieszczeniami towarzyszącymi. Współczynnik przenikania ciepła przegród nieprzezroczystych wynosi 0,087 ÷ 0,1 W/m²K, a przezroczystych zewnętrznych 0,8 W/m²K [9]. W hali sportowej Uniwersytetu Rolniczego potwierdzono próbą ciśnieniową, zgodnie z normą PN-EN ISO 9972:2015-10, dużą szczelność przegród zewnętrznych na przenikanie powietrza i uzyskano wynik $n_{50} = 0,3 \text{ h}^{-1}$ [8]. W obiekcie tym zaprojektowano i zrealizowano system mechanicznej wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła o maksymalnej spraw-

ności na poziomie 85%, a w celu zabezpieczenia przed nadmiernymi zyskami solarnymi zastosowano rolety zewnętrznie sterowane elektrycznie.

Pomiary w obiekcie wykonano dwukrotnie, za każdym razem w lecie, podczas największego obciążenia termicznego: pierwsze w okresie 7 – 10 sierpnia 2013 r., drugie w okresie 20 – 24 maja 2014 r., kiedy temperatura na zewnątrz wynosiła powyżej 30°C. W przypadku pierwszej serii pomiarów hala była wyłączona z użytkowania, dlatego nie używano wentylacji mechanicznej ani naturalnej i nie otwierano okien. W tym sensie zbadane warunki nie są miarodajne podczas normalnego trybu funkcjonowania tego budynku, ale charakteryzują naturalne (niezakłócone działaniem instalacji) izolacyjne i pojemnościowe właściwości obudowy. Drugą serię pomiarów realizowano w warunkach zgodnych z przeznaczeniem obiektu sportowego, który był użytkowany przez cały okres badań (zajęcia sportowe na sali). Wentylację mechaniczną włączono jednak tylko w drugim dniu pomiarów, co godzinę na 15 – 30 min, jeżeli na sali odbywały się zajęcia. Otwieranie i zamykanie okien w trakcie badań realizowano ręcznie, w godzinach użytkowania obiektu 8.00 – 22.00.

W projekcie technicznym hali Uniwersytetu Rolniczego przewidywano stosowanie naturalnego systemu nocnego przewietrzania wnętrza przez uchylanie okien na przeciwległych ścianach areny sportowej i intensywne chłodzenie budynku nocą powietrzem zewnętrznym. Podczas przeprowadzanych w hali badań mikroklimatu nie korzystano jednak z tego rozwiązania. Wybrane parametry charakteryzujące środowisko wewnętrzne w hali przedstawiono w tabeli 1.

Uśrednione wartości wskaźnika PMV w przypadku obu serii pomiarów mieściły się poza granicami komfortu cieplnego Fanger'a $-0,5 < PMV < +0,5$ (tabela 1). Podczas drugiej serii pomiarów, kiedy hala była normalnie użytkowana, wartość wskaźnika przewidywanej oceny średniej PMV nie zmniejszyła się nigdy poniżej 1,6, a jego graniczna wartość przekroczyła 3,0.

Niekorzystny mikroklimat w hali nie był spowodowany jedynie wysoką temperaturą powietrza zewnętrznego, ale

Tabela 1. Średnie zmierzone wartości parametrów środowiska wewnętrznego w hali UR

Table 1. Average values of parameters of the internal environment UR hall's

Parametry środowiskowe	I pomiary	II pomiary
Temperatura powietrza wewnętrznego [°C]	27,94	24,12
Wilgotność powietrza wewnętrznego [%]	58,28	50,85
Temperatura promieniowania [°C]	28,77	24,30
PMV [-]	1,14	2,26
PPD [%]	33,15	84,18

wynikał także ze sposobu eksploatacji obiektu w czasie pomiarów. Wentylacja mechaniczna użytkowana w niewielkim stopniu oraz brak chłodzenia nocnego doprowadziły do skumulowania nadmiaru energii w budynku.

Przy użyciu programu do symulacji Design Builder podjęto próbę sprawdzenia, czy intensywne chłodzenie nocne pozwoli na uzyskanie komfortu cieplnego lub przynajmniej znaczne ograniczenie przegrzewania.

Analizy symulacyjne w programie Design Builder

Założenia do symulacji. W programie Design Builder utworzono model badanej hali sportowej (rysunek 1). Walidację modelu wykonano, oceniając zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów temperatury powietrza wewnętrznego w analizowanej hali w drugim okresie pomiarowym. Uzyskany współczynnik korelacji r_{xy} wynoszący 0,94 oznacza w analizie statystycznej bardzo wysoką zależność. W związku z tym przyjęto, że wykonany w programie Design Builder model

pasywnej hali sportowej może posłużyć do prowadzenia dalszych analiz.

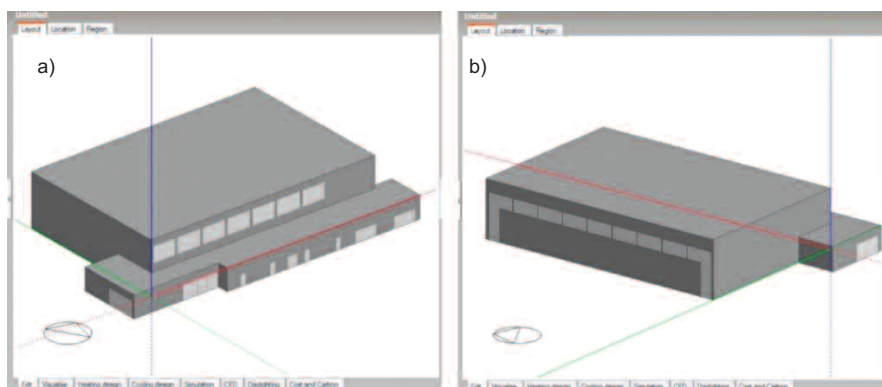
Symulacje przeprowadzono tylko w okresie od 01.05. do 30.06. Nie uwzględniono pozostałych miesięcy letnich ze względu na okres wakacyjny w tym obiekcie, podczas którego nie jest użytkowany. Założono energię metaboliczną ćwiczącego studenta na poziomie 300 W/osobę. W przypadku analizowanego okresu letniego wprowadzono wartość oporu cieplnego odzieży odpowiadającą lekkiemu ubraniu sportowemu (0,3 clo).

Kierując się rzeczywistym sposobem użytkowania hali, przyjęto podczas pomiarów, że rolety na elewacji południowo-wschodniej są opuszczane, gdy natężenie promieniowania słonecznego przekroczy wartość 100 W/m², a po stronie północno-zachodniej żaluzje są odsłonięte przez cały okres symulacji. Wymagane natężenie oświetlenia w hali przyjęto zgodnie z PN-EN 12464-1:2012 [7] na poziomie 400 luxów. Doświetlenie sztuczne włączane jest automatycznie, jeżeli w godzinach użytkowania sali naturalne oświetlenie jest niedostateczne. Zakładany sposób wykorzystania hali w trakcie tygodnia przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Sposób użytkowania hali sportowej Uniwersytetu Rolniczego przyjęty do symulacji

Table 2. Usage of the sports hall of the Agricultural University adopted for simulation

Dzień tygodnia	Godziny	Liczba osób w hali/h
Poniedziałek – piątek	8.00 – 16.00	50
	16.00 – 22.00	25
Sobota – niedziela	9.00 – 20.00	50



Rys. 1. Elewacja południowo-wschodnia (a) i północno-zachodnia (b) hali Uniwersytetu Rolniczego wygenerowana w programie Design Builder

Fig. 1. South-east façade (a) and north-west façade (b) of the Agricultural University hall generated in Design Builder

W dokumentacji projektowej budynku przyjęto poziom wykorzystania mocy centrali wentylacyjnej zależny od sposobu użytkowania hali:

- w czasie zawodów i zapelnienia trybun – 100%;
- przy wykorzystaniu 1/3 hali – 20%;
- zajęte 2 lub 3 sektory dla widzów – 40 lub 60% wydajności maksymalnej.

Wydajność maksymalna centrali odpowiada krotności wymiany powietrza w budynku równej $0,75 \text{ h}^{-1}$ (maksymalna wydajność wentylacji to $9000 \text{ m}^3/\text{h}$, a kubatura sali ok. $12\,075 \text{ m}^3$). Przyjęto, że minimalny wymagany strumień świeżego powietrza dla jednego zawodnika wynosi $30 \text{ m}^3/\text{h}$, a więc w przypadku pięćdziesięciu grających osób wymiana powietrza na poziomie $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ zaspokoi potrzeby higieniczne użytkowników. Minimalny strumień świeżego powietrza musi być zapewniany przez wentylację mechaniczną w sytuacji, kiedy w budynku nie są otwierane okna i nie ma wentylacji naturalnej. Założono, że otwieranie okien możliwe jest przez cały dzień (w tygodniu w godzinach 8.00 – 22.00, w weekend 8.00 – 20.00) po obu stronach areny (tylko 20% całkowitego otwarcia). W symulacji uzależniono jednak przewietrzanie codzienne od warunków zewnętrznych, tzn. jeżeli spełniony jest warunek $T_{\text{out}} > T_{\text{int}}$ wówczas okna zostają zamknięte (T_{out} – temperatura powietrza zewnętrznego [°C], T_{int} – temperatura powietrza wewnętrznego [°C]). Natomiast nocne naturalne przewietrzanie oznacza w symulacjach uchylenie okien (20 lub 40% otwarcia) w godzinach 23.00 – 6.00. Temperatura powietrza zewnętrznego w analizowanym dwumiesięcznym okresie spadała w nocy nawet do $+0,1^\circ\text{C}$ (06.05.). W celu uniknięcia nadmiernej wychłodzenia hali ustalono 14°C jako wartość minimalnej temperatury powietrza wewnętrznego, przy której możliwe jest uchylenie okien.

Przyjęte warianty symulacji:

■ **wariant 1** – wyjściowy, wentylacja mechaniczna wyłączona, wentylacja naturalna w ciągu dnia uzależniona od warunków zewnętrznych ($T_{\text{out}} > T_{\text{int}}$ – okna zamknięte), brak nocnego przewietrzania. Ten wariant jest zbliżony do faktycznego sposobu eksploatacji hali i traktowany jako wariant referencyjny;

■ **wariant 2** – wentylacja mechaniczna wyłączona, dzienna wentylacja naturalna uzależniona od warunków zewnętrznych ($T_{\text{out}} > T_{\text{int}}$ – okna zamknięte), zastosowano naturalne nocne przewietrzanie w godz. 23.00 – 6.00: uchylenie wszystkich okien 20%;

■ **wariant 3** – jak wariant 2, ale nocne przewietrzanie z uchyleniem okien 40%;

■ **wariant 4** – wentylacja mechaniczna włączona w dzień w godz. 9.00 – 16.00 na 20% wartości maksymalnej, okna uchylone w czasie 8.00 – 9.00 oraz 16.00 – 22.00 po obu stronach areny, przy jednoczesnym warunku: $T_{\text{out}} > T_{\text{int}}$ – okna zamknięte, brak nocnego przewietrzania;

■ **wariant 5** – wentylacja mechaniczna włączona w dzień w godz. 9.00 – 16.00 na 20% wartości maksymalnej, okna uchylone w okresie 8.00 – 9.00 oraz 16.00 – 22.00 po obu stronach areny, przy spełnieniu warunku $T_{\text{out}} > T_{\text{int}}$ – okna zamknięte, zastosowano naturalne nocne przewietrzanie w godz. 23.00 – 6.00: uchylenie wszystkich okien 40%.

Wyniki symulacji

W tabeli 3 zestawiono obliczone wartości niektórych parametrów środowiskowych w hali sportowej uzyskane podczas symulacji przyjętych w przypadku pięciu wariantów użytkowania budynku (uwzględniono temperaturę powietrza wewnętrznego oraz średnie arytmetyczne wartości temperatury promieniowania w hali).

W obowiązujących w Polsce przepisach budowlanych nie ma jednoznacznych wytycznych dotyczących zakresu temperatury komfortu cieplnego w obiektach sportowych. W związku z tym przy-

jęłam własne wymagania na podstawie założonego poziomu metabolizmu oraz izolacyjności odzieży i przy użyciu algorytmu sformułowanego przez Fangera. W przypadku aktywnych użytkowników komfortowa temperatura powietrza wewnętrznego w hali wynosi latem $14 - 18^\circ\text{C}$. Natomiast średnia temperatura powietrza wewnątrz w przyjętym dwumiesięcznym okresie analizy wynosi w przypadku wszystkich wariantów $17,0 - 21,6^\circ\text{C}$, a w przypadku wariantów 2, 3 i 5 mieści się w przedziale $17,0 - 17,6^\circ\text{C}$. Biorąc pod uwagę średnią i najwyższą wartość temperatury wynoszącą $27,3^\circ\text{C}$, najgorzej wypada wariant 4. Niekorzystnie wysoka wartość temperatury powietrza wewnętrznego występuje też w wariantcie 1, najbardziej zbliżonym do rzeczywistego użytkowania hali. Różnica średniej wartości temperatury powietrza pomiędzy najlepszym wariantem 3 a najbardziej niekorzystnym 4 wynosi $4,6^\circ$.

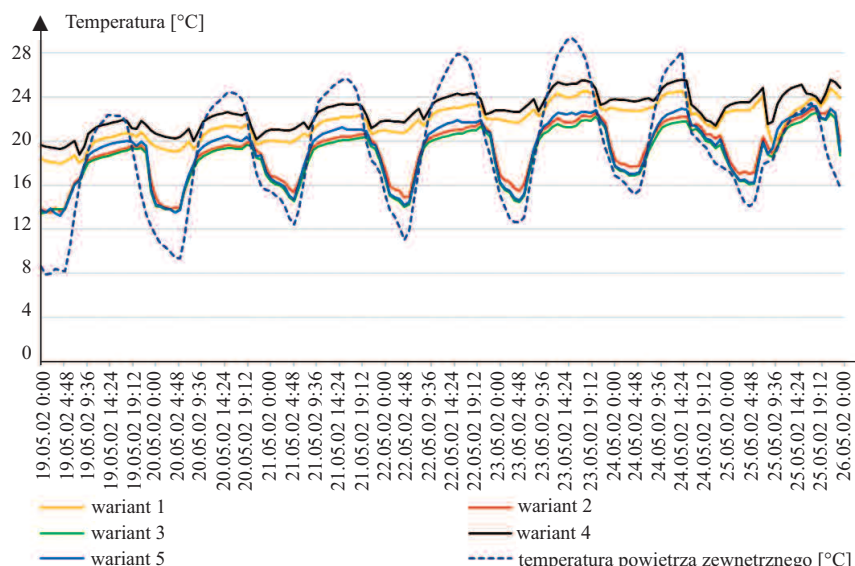
W przypadku temperatury promieniowania, największa średnia wartość w całym dwumiesięcznym okresie występuje w wariantcie 4 z włączoną wentylacją mechaniczną, ale bez przewietrzania nocnego i wynosi $22,3^\circ\text{C}$. Najmniejsza średnia wartość temperatury promieniowania ($18,3^\circ\text{C}$) występuje w opcji 3, gdzie nie stosuje się mechanicznego wentylowania w dzień, a w nocy okna są uchylane. Uśredniona wilgotność powietrza wewnętrznego w przypadku wszystkich wariantów nie przekroczyła zalecanej progowej wartości 70%.

Rysunek 2 przedstawia rozkład temperatury powietrza w hali w przypadku wybranego upalnego tygodnia i analizowanych pięciu wariantów. Największa różnica pomiędzy wykresami (ok. $7,7^\circ$) występuje we wczesnych godzi-

Tabela 3. Wartość temperatury powietrza wewnętrznego, temperatury promieniowania oraz wilgotności powietrza wewnętrznego w przypadku dwumiesięcznego okresu analizy i pięciu przyjętych wariantów symulacji

Table 3. Values for indoor air temperature, radiation temperature and indoor air humidity for the two-month analysis period and the five adopted simulation variants

Warianty	Temperatura powietrza wewnętrznego t_a [°C]		Temperatura promieniowania t_r [°C]	Wilgotność powietrza wewnętrznego RH [%]
	wartość średnia	wartość największa	wartość średnia	wartość średnia
Wariant 1	19,9	26,3	20,8	59,9
Wariant 2	17,5	24,0	18,7	67,9
Wariant 3	17,0	23,5	18,3	69,8
Wariant 4	21,6	27,3	22,3	55,8
Wariant 5	17,6	23,8	18,7	68,8



Rys. 2. Rozkład temperatury powietrza wewnętrznego w okresie 19.05 – 25.05

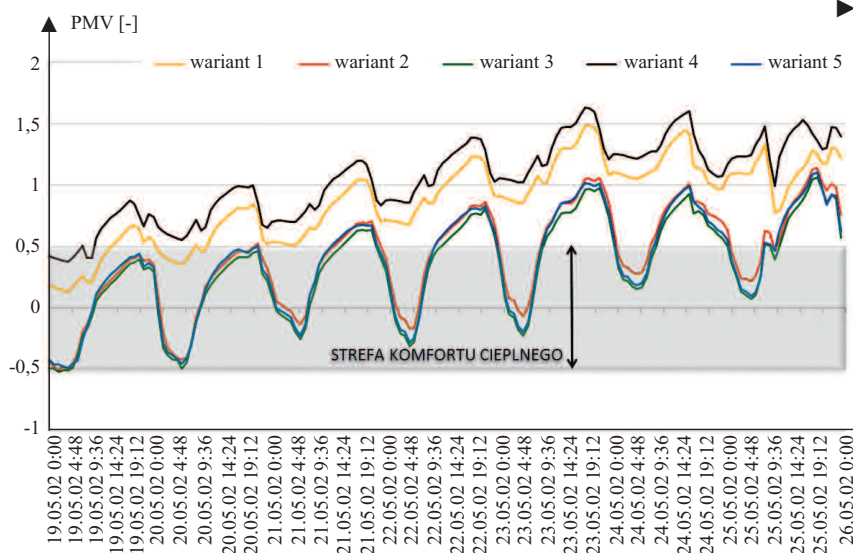
Fig. 2. Distribution of indoor air temperature for the 19.05 – 25.05

nach rannych. W wariantach 1 oraz 4 nie stosuje się przewietrzania nocnego. W efekcie wykresy tych wariantów znajdują się znacznie wyżej na osi temperatury w porównaniu z pozostałymi trzema przypadkami. Zakładając przedział temperatury powietrza warunków komfortowych 14 – 18°C, warunki termiczne we wnętrzu hali, zarówno w przypadku wariantu 1 (wykres żółty), jak wariantu 4 (wykres szary), praktycznie w całym tygodniowym przebiegu znajdują się poza tą strefą. Najniższe wartości temperatury obserwuje się w wariantie 3, w którym wentylacja mechaniczna jest wyłączona podczas dnia, a w nocy uchyla się okna na 40% całkowitego otwarcia. Różnica w ciągu dnia, to ok. 0,6° w porównaniu z wariantem 2 (uchylenie okien w nocy 20%) oraz 3,9° z najgorszą opcją 4 (wykres szary).

Najbardziej miarodajnym sposobem oceny warunków cieplnych w pomieszczeniu jest wskaźnik przewidywanej oceny średniej PMV, który w sposób syntetyczny łączy wszystkie formy wymiany ciepła ludzkiego organizmu z otoczeniem. Największa liczba godzin w przedziale komfortu cieplnego (-0,5 ≤ PMV ≤ 0,5), wynosząca 979 h, występuje w przypadku wariantu 3, tj. z wyłączoną wentylacją mechaniczną, ale z zastosowaniem naturalnego chłodzenia nocą 40% (tabela 4). Wszystkie przypadki, w których stosuje się z przewietrzanie nocne, czyli warianty 2, 3

oraz 5, są korzystniejsze od dwóch pozostałych. Różnica liczby godzin, spełniających kryteria komfortu cieplnego, wynosi pomiędzy poszczególnymi wariantami 306 – 539 (tabela 4), co przekłada się na 13 – 22 komfortowych dni więcej w trakcie dwumiesięcznego okresu.

W wariantie 4, kiedy korzysta się w ciągu dnia z mechanicznego wentylowania, ale w nocy okna nie są uchylane, występuje najmniej godzin odpowiadających warunkom komfortu cieplnego. Napływ ciepłej masy powietrza w dzień oraz brak możliwości schłodzenia obiektu w nocy sprawiają, że przez 30%



Rys. 3. Rozkład wskaźnika przewidywanej oceny średniej PMV w tygodniu 19.05 – 25.05

Fig. 3. Distribution of PMV index for the week 19.05 – 25.05

Tabela 4. Godzinowy rozkład wskaźnika PMV w przyjętych wariantach symulacji

Table 4. Hourly distribution of the PMV index for the adopted simulation variants

Warianty	Liczba godzin w przedziale komfortu cieplnego -0,5 < PMV < +0,5	Liczba godzin o wskaźniku PMV > 0,5
Wariant 1	673	791
Wariant 2	949	405
Wariant 3	979	324
Wariant 4	440	1024
Wariant 5	963	403

całego okresu panują w hali warunki, w których przekroczona jest wartość graniczna PMV = 0,5. Brakiem odpowiednich warunków mikroklimatycznych charakteryzuje się także wariant 1, w którym jedynie przez 673 h spośród 1464 h panują warunki komfortu termicznego, co stanowi 54% całego okresu.

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład wartości wskaźnika przewidywanej oceny średniej w wybranym tygodniu z analizowanego okresu dwumiesięcznego. Wykresy w przypadku wariantów 1 i 4, gdy nie stosuje się naturalnego nocnego chłodzenia budynku, znajdują się zauważalnie powyżej pozostałych. Natomiast warianty z zastosowaniem przewietrzania nocnego, tj. 2 i 3 oraz 5, mają przebieg wskaźnika PMV zdecydowanie bliższy strefie komfortu. Różnica wartości wskaźnika przewidywanej oceny średniej PMV pomiędzy tymi wariantami a najgorszym wariantem

