



Sezonowa ocena komfortu cieplnego i zachowań adaptacyjnych użytkowników w budynkach biurowych z wentylacją naturalną i mechaniczną – badania terenowe

Seasonal assessment of thermal comfort and occupants' adaptive behaviours in naturally and mechanically ventilated office buildings – a field study



Dr inż. Aleksandra Lipczyńska

ORCID ID: [0000-0001-6033-9557](https://orcid.org/0000-0001-6033-9557)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska

aleksandra.lipczynska@polsl.pl



Mgr inż. Mirella Fuhrmann

ORCID ID: [0009-0001-1271-7119](https://orcid.org/0009-0001-1271-7119)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska



Dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-4742-5263](https://orcid.org/0000-0002-4742-5263)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska



Mgr inż. Stanisław Kocik

ORCID ID: [0009-0002-5391-9750](https://orcid.org/0009-0002-5391-9750)

Wydział Inżynierii Środowiska

i Energetyki

Politechnika Śląska



Dr hab. inż. Krzysztof Grygierek, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0002-7049-1939](https://orcid.org/0000-0002-7049-1939)

Wydział Budownictwa

Politechnika Śląska

Słowa kluczowe: komfort cieplny, wentylacja naturalna, wentylacja mechaniczna, działania adaptacyjne, budynki biurowe

Streszczenie

Celem pracy była ocena sezonowych różnic w odczuwanym komforcie cieplnym oraz w zachowaniach użytkowników dwóch budynków biurowych zlokalizowanych w Gliwicach, różniących się strategią wentylacji: naturalną i mechaniczną. Badania terenowe prowadzono w czterech porach roku w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Analiza bazowała na pomiarach temperatury powietrza i wilgotności względnej w strefie przebywania użytkowników oraz cyklicznie realizowanych badaniach ankietowych, obejmujących ocenę odczucia cieplnego (TSV), akceptowalności cieplnej (TACC), izolacyjności odzieży oraz działań adaptacyjnych. Zależność TSV od temperatury powietrza analizowano z wykorzystaniem modeli liniowych i nieliniowych, w tym metod wygładzania lokalnego oraz modeli rozszerzonych o zmienne środowiskowe i behawioralne. W obu budynkach wzrost temperatury powietrza powodował wzrost oceny TSV, jednak sama temperatura wyjaśniała jedynie niewielką część zmienności odpowiedzi użytkowników. Temperatury neutralne wyznaczone z regresji linio-

Keywords: thermal comfort, natural ventilation, mechanical ventilation, adaptive behaviour, office buildings

Abstract

The aim of this study was to assess seasonal differences in perceived thermal comfort and occupants' adaptive behaviours in two office buildings with different ventilation strategies: natural and mechanical ventilation. Field measurements were conducted across four seasons under real operating conditions. The analysis was based on indoor air temperature and relative humidity measured at workstations, together with repeated occupant surveys covering thermal sensation vote (TSV), thermal acceptability (TACC), clothing insulation and adaptive actions. The relationship between TSV and air temperature was analysed using linear and nonlinear models, including local smoothing methods, as well as models extended to include environmental and behavioural variables. In both buildings, increasing indoor air temperature was associated with higher TSV values. However, air temperature alone explained only a limited part of the variability in occupants' responses. Neutral temperatures estimated from linear regression were approximately 21.1°C in the naturally

wej wyniosły około 21,1°C w budynku z wentylacją naturalną oraz 22,1°C w budynku z wentylacją mechaniczną. Największe różnice między obiektami dotyczyły sposobu adaptacji. W budynku z wentylacją naturalną częściej wykorzystywano otwieranie okien i osłony przeciwsłoneczne, natomiast w budynku z wentylacją mechaniczną – osobiste systemy kształtowania środowiska, szczególnie latem. Adaptacja przez odzież miała głównie charakter sezonowy. Wyniki wskazują, że ocena komfortu cieplnego w biurach powinna uwzględniać nie tylko parametry powietrza, lecz także akceptowalność warunków, lokalne możliwości regulacji oraz rzeczywiste zachowania użytkowników. W praktyce wspiera to stosowanie rozwiązań hybrydowych typu mixed-mode.

ventilated building and 22.1°C in the mechanically ventilated building. The main differences between the buildings were related to adaptive behaviour. In the naturally ventilated building, occupants more frequently used window opening and solar shading, whereas in the mechanically ventilated building – personal environmental control systems, especially in summer. Clothing adaptation was mainly seasonal rather than a frequent daily response. The results indicate that thermal comfort assessment in offices should not rely solely on air temperature. Thermal acceptability, local control opportunities and actual adaptive behaviours should also be considered. From a practical perspective, the findings support hybrid mixed-mode strategies combining stable HVAC operation with user-accessible local control.

Wstęp

Zapewnienie odpowiednich warunków cieplnych w budynkach biurowych jest jednym z podstawowych zadań projektowania i eksploatacji instalacji ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC). W praktyce nie chodzi jednak wyłącznie o utrzymanie zadanej temperatury powietrza. Na ocenę komfortu wpływają również inne parametry środowiska takie jak wilgotność, prędkość przepływu powietrza, temperatura przegród, nasłonecznienie, jakość powietrza wewnętrznego, a także sposób użytkowania pomieszczeń. Coraz większego znaczenia nabierają również koszty eksploatacyjne oraz zużycie energii, zwłaszcza w warunkach rosnących wymagań dotyczących efektywności energetycznej budynków (Khoshbakht i in., 2023; Zagreus i in., 2004).

Przez wiele lat podstawą oceny komfortu cieplnego był model równowagi cieplnej opracowany przez P.O. Fangera (Fanger, 1970), wykorzystujący wskaźniki PMV (przewidywana średnia ocena, z ang. *Predicted Mean Vote*) oraz PPD (przewidywany odsetek niezadowolonych, z ang. *Predicted Percentage of Dissatisfied*), opisany w normie PN-EN ISO 7730 (PN, 2026). Model ten pozwala w uporządkowany sposób powiązać parametry środowiska wewnętrznego, aktywność użytkownika oraz izolacyjność odzieży z przewidywaną oceną komfortu cieplnego. Jest to nadal przydatne narzędzie w projektowaniu i ocenie instalacji HVAC, zwłaszcza w budynkach o stabilnych warunkach wewnętrznych. Jego ograniczeniem jest jednak założenie, że użytkownik pozostaje w dużej mierze biernym odbiorcą warunków panujących w pomieszczeniu, a jego oczekiwania cieplne są względnie stałe i takie same dla każdego (ASHRAE, 2023; de Dear i in., 2013; Wang i in., 2018).

Doświadczenia eksploatacyjne oraz wyniki badań terenowych pokazują, że rzeczywiste odczucia użytkowników są bardziej złożone, i takie podejście jest niewystarczające, zwłaszcza w obliczu rozwoju budownictwa spersonalizowanego i ukierunkowanego na potrzeby użytkownika (ang. *precision-comfort approach*) (Wang i in., 2018). Osoby pracujące w biurach reagują na zmiany warunków cieplnych w różny sposób: otwierają lub zamykają okna, zmieniają odzież, korzystają z żaluzji i rolet albo z urządzeń umożliwiających lokalną regulację warunków w bezpośrednim otoczeniu stanowiska pracy. W budynkach, w których użytkownicy mają możliwość wpływania na swoje najbliższe otoczenie, często akceptują szerszy zakres temperatury niż wynikałoby to z klasycznej oceny

PMV/PPD. Zjawisko to opisuje teoria komfortu adaptacyjnego (ASHRAE, 2023; PKN, 2019), rozwijana na podstawie wielu badań terenowych (Brager i in., 2004; de Dear & Brager, 2002; de Dear i in., 2013; Gupta & Howard, 2019; Nicol & Humphreys, 2002; Rawal i in., 2022). Podejście adaptacyjne zakłada, że komfort cieplny jest wynikiem wzajemnego oddziaływania człowieka, budynku i instalacji. Użytkownik nie jest więc wyłącznie odbiorcą warunków wewnętrznych, lecz aktywnie na nie reaguje. Adaptacja może mieć charakter behawioralny (np. przez zmianę odzieży, otwarcie okna lub użycie osłony przeciwsłonecznej), fizjologiczny (związany z przyzwyczajaniem organizmu do warunków sezonowych, tzw. aklimatyzacją) oraz psychologiczny (wynikający z oczekiwań wobec danego typu budynku).

Jak wykazali Graham & Parkinson (2021), satysfakcja z warunków panujących w pomieszczeniu w istotnym stopniu zależy nie tylko od parametrów fizycznych, ale również od subiektywnego poczucia kontroli nad środowiskiem wewnętrznym (ang. *occupant-centric control*). Użytkownicy zwykle lepiej oceniają warunki cieplne wtedy, gdy mają możliwość ich lokalnej regulacji, nawet jeśli parametry fizyczne nie są idealne (Graham & Parkinson, 2021; Kim, Schiavon, i in., 2018; Kim, Zhou, i in., 2018). Szczególne znaczenie mają w tym kontekście rozwiązania umożliwiające użytkownikom lokalną regulację warunków w ich bezpośrednim otoczeniu, w tym osobiste systemy kształtowania środowiska PECS (ang. *Personal Environmental Control Systems*). Do tych systemów zalicza się m.in. urządzenia służące do miejscowego ogrzewania, chłodzenia, wentylacji lub regulacji innych parametrów mikrośrodowiska na stanowiskach pracy (Fuhrmann i in., 2025; Khovalyg i in., 2025).

W warunkach Europy Środkowej, w tym w Polsce, zagadnienie to staje się szczególnie ważne. Budynki muszą być przygotowane zarówno na okresy niskich temperatur zewnętrznych, jak i na coraz częstsze epizody wysokich temperatur latem. Wzrost liczby dni upalnych, intensyfikacja miejskiej wyspy ciepła oraz duże zyski ciepła od nasłonecznienia i wyposażenia biurowego zwiększają ryzyko przegrzewania pomieszczeń (Graham & Parkinson, 2021; Lamsal i in., 2023). Dotyczy to zwłaszcza budynków z wentylacją naturalną, w których skuteczność chłodzenia nocnego lub przewietrzania zależy od warunków zewnętrznych, organizacji pracy oraz zachowań użytkowników. Przegrzewanie pomieszczeń biurowych obniża koncentrację i samopoczucie użytkowników oraz w dłuższym

okresie prowadzi do wzrostu ich wymagań w zakresie chłodzenia (Khoshbakht i in., 2023; Liu i in., 2013).

Z drugiej strony pełna klimatyzacja i mechaniczna kontrola środowiska wewnętrznego nie zawsze rozwiązują kwestie prawidłowego utrzymania komfortowych warunków mikroklimatu. W budynkach mechanicznie wentylowanych i klimatyzowanych możliwe jest precyzyjne utrzymywanie parametrów powietrza, ale wiąże się to z większym zużyciem energii, kosztami eksploatacji oraz koniecznością prawidłowej regulacji i serwisowania instalacji. Niewłaściwa eksploatacja systemów HVAC może prowadzić do niezadowolenia użytkowników, skarg na przeciągi, zbyt niską lub zbyt wysoką temperaturę, a w niektórych przypadkach także do problemów z jakością powietrza wewnętrznego (Frontczak i in., 2011; Zagreus i in., 2004).

Z tego względu coraz większe zainteresowanie budzą rozwiązania hybrydowe, określane jako systemy typu mixed-mode. Łączą one możliwość wykorzystania wentylacji naturalnej z okresowym lub wspomagającym działaniem systemów mechanicznych (Khoshbakht i in., 2023; Rupp i in., 2025; Rupp i in., 2022). Takie podejście może ograniczać zużycie energii, a jednocześnie zapewniać większą elastyczność w działaniu budynku. Warunkiem skuteczności tych rozwiązań jest jednak właściwe rozpoznanie rzeczywistych zachowań użytkowników. W praktyce projektowej nie wystarczy przyjąć, że okna, osłony przeciwsłoneczne lub lokalne urządzenia wspomagające PECS będą używane zgodnie z założeniami projektanta. Należy sprawdzić, jak są one wykorzystywane w codziennej eksploatacji i jaki mają wpływ na komfort oraz zużycie energii (Shrestha i in., 2025).

Pomijanie zachowań użytkowników prowadzi do pogłębiania tzw. luki eksploatacyjnej (ang. *performance gap*), w której założenia projektowe istotnie odbiegają od rzeczywistego zużycia energii oraz satysfakcji użytkowników (Dennis, 2017; Lamsal i in., 2023; Rupp i in., 2025). Budynek spełniający wymagania projektowe może być oceniany negatywnie, jeśli użytkownicy nie mają możliwości reagowania na zmienne warunki lub jeśli sposób działania instalacji nie odpowiada ich oczekiwaniom. Z tego powodu istotne są całoroczne badania terenowe prowadzone w rzeczywistych budynkach biurowych. Pomiary in situ, połączone z regularnym zbieraniem opinii użytkowników, pozwalają uchwycić sezonową zmienność warunków cieplnych oraz sposoby adaptacji użytkowników. Jest to szczególnie ważne w klimacie umiarkowanym przejściowym, w którym w ciągu roku występują duże różnice temperatury zewnętrznej, nasłonecznienia i sposobu użytkowania instalacji (Khoshbakht i in., 2023; Rijal i in., 2019). W porównaniu z krótkotrwałymi pomiarami lub samymi symulacjami komputerowymi, długookresowy monitoring daje pełniejszy obraz rzeczywistego funkcjonowania budynku i oczekiwań stawianych przez użytkowników.

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki badań nad komfortem cieplnym przeprowadzonych w dwóch budynkach biurowych zlokalizowanych w Gliwicach. Porównano odczucia cieplne pracowników oraz ich zachowania adaptacyjne w budynku z wentylacją naturalną (Budynek A), oraz w nowoczesnym biurowcu z wentylacją mechaniczną i klimatyzacją (Budynek B). Okres badawczy uwzględnił cztery sezony pomiarowe, co pozwoliło na precyzyjne

uchwycenie sezonowej zmienności takich parametrów jak izolacyjność odzieży, częstotliwość i motywacja operowania oknami oraz skala wykorzystania osobistych systemów wspomagających PECS. Celem pracy było określenie, w jaki sposób rodzaj wentylacji i dostępny zakres kontroli nad środowiskiem wewnętrznym wpływają na komfort cieplny oraz zachowania użytkowników biur. Uzyskane wyniki mogą być przydatne dla projektantów i zarządców budynków biurowych przy doborze strategii wentylacji, chłodzenia i lokalnej regulacji warunków cieplnych. Wnioski z badań wskazują również, że ocena komfortu w budynkach biurowych powinna uwzględniać nie tylko parametry techniczne instalacji, lecz także rzeczywisty sposób korzystania z budynku przez jego użytkowników. Ma to istotne znaczenie przy projektowaniu obiektów energooszczędnych, odpornych na zmiany klimatu i jednocześnie zapewniających wysoki poziom satysfakcji pracowników.

Metodologia

Badania miały charakter terenowy i długoterminowy. Przeprowadzono je w dwóch użytkowanych budynkach biurowych zlokalizowanych w tym samym obszarze miejskim w Gliwicach. Dobór obiektów z tej samej lokalizacji pozwolił ograniczyć wpływ różnic klimatu zewnętrznego a jednocześnie umożliwił porównanie budynków o odmiennej strategii kształtowania środowiska wewnętrznego.

Analizą objęto cztery pory roku: wiosnę, lato, jesień i zimą. W każdej porze prowadzono dwutygodniową kampanię pomiarową, podczas której zbierano jednocześnie dane środowiskowe i ankietowe. Badania obejmowały łącznie 82 dni pomiarowe: 46 dni w budynku A oraz 36 dni w budynku B. W badaniu uczestniczyło łącznie 30 stałych użytkowników biur, wykonujących rutynowe zadania biurowe. W budynku A udział wzięło 11 osób, natomiast w budynku B 19 osób. Uczestnicy dobrowolnie przekazywali informacje o swoich odczuciach cieplnych i działaniach adaptacyjnych podczas normalnej pracy.

Podstawą oceny komfortu cieplnego była deklarowana przez użytkowników ocena odczucia cieplnego (TSV, ang. *Thermal Sensation Vote*). Zastosowanie wskaźnika TSV pozwoliło analizować rzeczywistą, subiektywną percepcję warunków środowiska wewnętrznego oraz powiązać ją z działaniami adaptacyjnymi podejmowanymi przez użytkowników.

W badaniach przyjęto trzy główne założenia. Po pierwsze, założono jednorodny charakter aktywności użytkowników, ponieważ uczestnicy wykonywali typową pracę biurową, odpowiadającą aktywności metabolicznej około 1,2 met. Po drugie, przyjęto, że nie wystąpiły istotne zakłócenia eksploatacyjne w okresie badań, takie jak awarie systemów HVAC lub nietypowe przerwy w funkcjonowaniu instalacji. Po trzecie, należy uwzględnić ograniczony zakres sezonowy pomiarów, ponieważ każda kampania obejmowała wybrany okres w danej porze roku. Może to wpływać na możliwość pełnego uogólnienia wyników na cały rok eksploatacji budynków, jednak pozwala porównać reakcje użytkowników w reprezentatywnych warunkach sezonowych.

Opis budynków objętych badaniami i aparatury pomiarowej

Budynek A był obiektem z wentylacją naturalną, z centralnym systemem ogrzewania i lokalną regulacją, bez aktywnego systemu chłodzenia. W okresie letnim środowisko tego budynku można więc traktować jako typu *free-running*, w którym istotną rolę w regulacji warunków cieplnych odgrywają działania użytkowników, takie jak otwieranie okien, stosowanie osłon przeciwsłonecznych czy korzystanie z urządzeń osobistych. Z kolei, budynek B był wyposażony w system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej z sekcją chłodzenia. W tym przypadku warunki wewnętrzne były w większym stopniu kształtowane przez centralnie sterowany system HVAC, a bezpośredni wpływ użytkowników na parametry środowiska był bardziej ograniczony.

Do analizy wybrano łącznie 17 pomieszczeń biurowych, różniących się kubaturą, orientacją względem stron świata oraz stopniem przeszkleń. Kryterium doboru stanowiła możliwość prowadzenia równoległych pomiarów środowiskowych i badań ankietowych użytkowników.

W pomieszczeniach biurowych prowadzono ciągły monitoring temperatury powietrza (T_a) oraz wilgotności względnej (RH). Pomiary wykonywano przy użyciu rejestratorów HOBO UX100-003 (Onset Computer Corporation, USA), o dokładności $\pm 0,2^\circ\text{C}$ dla temperatury i $\pm 3,5\%$ RH dla wilgotności względnej. Rejestratory umieszczono bezpośrednio przy stanowiskach pracy użytkowników, na wysokości około 0,6 m, odpowiadającej strefie tułowia osoby siedzącej. Dane rejestrowano w interwale 5 minut, a następnie przypisano do ankiet na podstawie czasu ich wypełnienia.

Ankiety

Uczestnicy wypełniali dwa typy kwestionariuszy: ankietę ogólną oraz powtarzaną ankietę dzienną. Uczestnicy otrzymywali automatyczne powiadomienia e-mail z prośbą o wypełnienie krótkiej, zanonimizowanej анкiety. Odpowiedzi były powiązane z unikalnym identyfikatorem użytkownika, co umożliwiło analizę powtarzalnych odpowiedzi tej samej osoby w różnych warunkach.

Ankieta ogólna była wypełniana jednorazowo na początku udziału w badaniu i obejmowała podstawowe dane demograficzne oraz antropometryczne, takie jak wiek, wzrost i masa ciała. Dane te pozwalały scharakteryzować grupę badawczą oraz uzupełnić interpretację indywidualnych różnic w ocenach komfortu cieplnego.

Ankieta dzienna była wypełniana trzy razy dziennie, o godzinie 8:00, 11:00 i 14:00, podczas przebywania uczestników w pomieszczeniach biurowych. Kwestionariusz obejmował ocenę ogólnego odczucia cieplnego całego ciała. Odczucie ciepłe oceniano za pomocą wskaźnika TSV zgodnie z siedmiostopniową skalą ASHRAE (2023). Skala ta obejmuje wartości od -3 do +3, gdzie: -3 oznacza „zimno”, -2 „chłodno”, -1 „lekko chłodno”, 0 „neutralnie”, +1 „lekko ciepło”, +2 „ciepło”, a +3 „gorąco”.

W ankiecie oceniano również akceptowalność cieplną TACC (ang. *Thermal Acceptability*), stosując siedmiostopniową skalę od -3 do +3, gdzie: -3 – bardzo nieakceptowalne, -2 – nieakceptowalne, -1 – lekko nieakceptowalne, 0 – neutralne, +1 – lekko akceptowalne, +2 – akceptowalne, +3 – bardzo akceptowalne. Na podstawie odpowiedzi

TACC w dalszej analizie wyznaczono dwa wskaźniki: poziom akceptowalności cieplnej, określony jako udział głosów TACC ≥ 1 , oraz poziom braku dyskomfortu, określony jako udział głosów TACC ≥ 0 .

Uczestnicy dokumentowali także aktualny ubiór oraz ewentualne modyfikacje odzieży dokonane od czasu poprzedniej ankiet. Na podstawie deklarowanych elementów garderoby oszacowano izolacyjność odzieży w jednostkach clo zgodnie z podejściem stosowanym w ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2023). Kwestionariusz obejmował również informacje o stanie elementów regulacji środowiska w bezpośrednim otoczeniu stanowiska pracy. Uczestnicy wskazywali stan otwarcia okna: zamknięte, uchylone lub otwarte; stan ochrony przeciwsłonecznej: brak osłony, częściowe zacienienie lub pełne zacienienie; oraz korzystanie z osobistych systemów wspomagających regulację środowiska cieplnego PECS, takich jak wentylator, grzejnik lub klimatyzator lokalny.

Analiza statystyczna

Analizę rozpoczęto od statystyk opisowych oraz porównań w układzie budynek-pora roku. Wyniki dla temperatury, wilgotności, TSV, TACC i izolacyjności odzieży przedstawiono m.in. za pomocą wykresów pudełkowych. Wykres pudełkowy pozwala praktycznie ocenić nie tylko wartość typową, ale też zmienność danych: linia wewnątrz pudełka oznacza medianę, pudełko obejmuje środkowe 50% wyników, a wąsy i punkty odstające pokazują rozrzut oraz obserwacje nietypowe. Na wykresach wartość średnią oznaczono białym rombem. Z punktu widzenia eksploatacji budynków szerokie pudełko lub liczne wartości odstające mogą wskazywać na zróżnicowanie warunków lokalnych albo na grupę użytkowników doświadczających warunków odbiegających od typowych.

Zależność oceny odczucia cieplnego od temperatury powietrza analizowano za pomocą regresji liniowej oraz wygładzania lokalnego LOESS. W tej części uwzględniono obserwacje z temperaturą $T_a \leq 30^\circ\text{C}$, aby ograniczyć wpływ wartości skrajnych. Na podstawie regresji liniowej wyznaczono temperaturę neutralną, odpowiadającą wartości TSV = 0. Dodatkowo porównano kilka modeli regresyjnych, w tym modele liniowe, wielomianowe, spline oraz modele regresji wielorakiej rozszerzone o sezon, wilgotność względną, izolacyjność odzieży, sposób wentylacji, otwarcie okien, osłony przeciwsłoneczne i stosowanie PECS.

Dopasowanie modeli oceniano na podstawie współczynnika determinacji (R^2), jego wersji skorygowanej oraz pierwiastka średniego błędu kwadratowego (RMSE). Współczynnik R^2 informuje, jaka część zmienności ocen użytkowników jest wyjaśniana przez model; im wyższa wartość, tym lepsze dopasowanie, ale sama wysoka wartość R^2 nie oznacza jeszcze, że model będzie przydatny praktycznie. Skorygowane R^2 uwzględnia liczbę zmiennych w modelu i jest szczególnie użyteczne przy porównywaniu modeli o różnej złożoności, ponieważ ogranicza sztuczną poprawę wyniku po dodaniu kolejnych zmiennych. RMSE określa przeciętny błąd predykcji modelu w jednostkach analizowanej zmiennej, czyli w tym przypadku w punktach skali TSV; niższe RMSE oznacza mniejsze przeciętne odchylenie przewidywań modelu od rzeczywistych ocen użytkowników. Za istotne statystycznie uznawano zależ-

ności spełniające warunek $p < 0,05$, co oznaczało małe prawdopodobieństwo uzyskania obserwowanego wyniku wyłącznie przypadkowo.

Działania adaptacyjne użytkowników analizowano w odniesieniu do otwierania okien, stosowania ochrony przeciwsłonecznej, modyfikacji odzieży oraz użycia PECS. Częstość występowania tych działań przedstawiono jako udziały względne w podziale na budynek i porę roku. W przypadku działań zależnych od temperatury zastosowano regresję logistyczną, wyznaczając prawdopodobieństwo wystąpienia danego działania w funkcji T_a wraz z 95% przedziałami ufności.

Wyniki

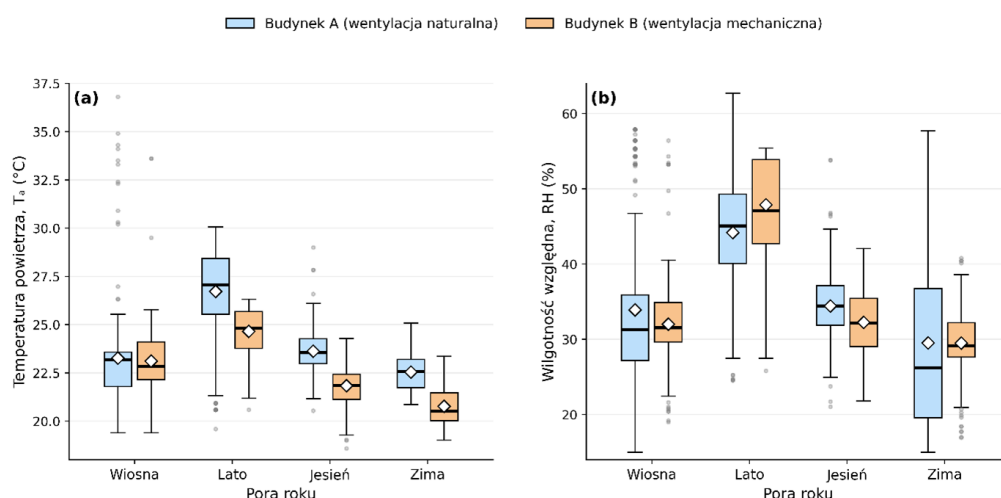
Sezonowa ocena odczuć cieplnych i akceptowalności warunków cieplnych

Analiza sezonowa parametrów środowiska wewnętrznego wykazała wyraźne zróżnicowanie temperatury powietrza i wilgotności względnej pomiędzy porami roku oraz pomiędzy badanymi budynkami (Rysunek 1). W obu obiektach najwyższe wartości temperatury powietrza występowały latem, natomiast najniższe zimą. Budynek A, wentylowany naturalnie, charakteryzował się ogólnie wyższą temperaturą powietrza niż budynek B z wentylacją mechaniczną, szczególnie w okresie letnim, jesiennym i zimowym. Latem średnia temperatura w budynku A wyniosła około 26,7°C, podczas gdy w budynku B około 24,7°C, co wskazuje, jak można było oczekiwać, na większą podatność budynku z wentylacją naturalną na wzrost temperatury w okresie ciepłym. Jednocześnie w budynku A zaobserwowano większą zmienność temperatury oraz pojedyncze wartości odstające, szczególnie wiosną, co może świadczyć o silniejszym wpływie warunków zewnętrznych, nasłonecznienia oraz sposobu użytkowania okien. Wilgotność względna również wykazywała charakter sezonowy – najwyższe wartości odnotowano latem, a najniższe zimą. W przeciwieństwie do temperatury, różnice wilgotności między budynkami nie były jednoznacz-

ne w całym roku. Latem wyższe wartości RH występowały w budynku B, natomiast w pozostałych sezonach poziomy wilgotności były bardziej zbliżone. Z punktu widzenia komfortu cieplnego i eksploatacji instalacji HVAC wyniki te wskazują, że budynek z wentylacją mechaniczną zapewniał bardziej stabilne warunki termiczne, zwłaszcza w zakresie temperatury powietrza, natomiast budynek z wentylacją naturalną był bardziej podatny na sezonowe i chwilowe wahania parametrów środowiska wewnętrznego.

Analiza sezonowej zmienności ocen użytkowników wykazała różnice zarówno między porami roku, jak i między badanymi budynkami. Na Rysunku 2 przedstawiono rozkład ocen odczucia cieplnego (TSV) oraz akceptowalności cieplnej (TACC). W przypadku TSV w obu budynkach wartości koncentrowały się głównie w pobliżu zakresu neutralnego, jednak w budynku A, z wentylacją naturalną, widoczne były wyższe wartości TSV w okresie letnim i jesiennym, co wskazuje na częstsze odczuwanie warunków jako cieplejszych. Zimą w obu budynkach wartości TSV przesunęły się w kierunku niższych ocen, szczególnie w budynku B z wentylacją mechaniczną. Rozkład ocen TACC wskazuje, że akceptowalność cieplna była zróżnicowana sezonowo. W budynku B najwyższe wartości TACC obserwowano wiosną i latem, natomiast zimą nastąpiło wyraźne obniżenie ocen. W budynku A korzystniejsze wartości TACC występowały przede wszystkim jesienią i zimą, co sugeruje lepsze dopasowanie warunków cieplnych do oczekiwań użytkowników w chłodniejszych okresach roku.

Uzupełnieniem tej analizy jest Rysunek 3, na którym przedstawiono procentowy udział głosów spełniających przyjęte kryteria akceptowalności cieplnej i braku dyskomfortu. Akceptowalność cieplną określono jako udział głosów $TACC \geq 1$, natomiast brak dyskomfortu jako udział głosów $TACC \geq 0$. Wyniki potwierdzają obserwacje z rozkładów pudełkowych. W budynku A najwyższy poziom akceptowalności cieplnej wystąpił jesienią i wyniósł 52,8%, natomiast najwyższy poziom braku dyskomfortu odnotowano jesienią i zimą, odpowiednio 84,0% oraz



Rysunek 1. Sezonowa zmienność temperatury powietrza (a) oraz wilgotności względnej powietrza (b) w budynkach A i B. Wykresy pudełkowe przedstawiają rozkład wyników w podziale na pory roku; linia wewnątrz pudełka oznacza medianę, a biały romb wartość średnią. Źródło: opracowanie własne

Figure 1. Seasonal variation in indoor air temperature (a) and relative humidity (b) in buildings A and B. The boxplots show the distribution of measurements by season; the line within each box indicates the median, while the white diamond denotes the mean. Source: authors' own study

82,6%. W budynku B najwyższą akceptowalność cieplną oraz najwyższy poziom braku dyskomfortu uzyskano latem, odpowiednio 50,6% i 88,0%. Najmniej korzystne wyniki w budynku B wystąpiły zimą, kiedy akceptowalność cieplna spadła do 26,3%, a brak dyskomfortu do 62,4%. Oznacza to, że budynek z wentylacją mechaniczną zapewniał użytkownikom korzystniejsze warunki, głównie w okresie ciepłym, podczas gdy budynek z wentylacją naturalną osiągał lepsze wyniki pod względem ograniczenia dyskomfortu w okresie jesienno-zimowym.

Zestawienie Rysunków 2 i 3 pokazuje, że neutral-

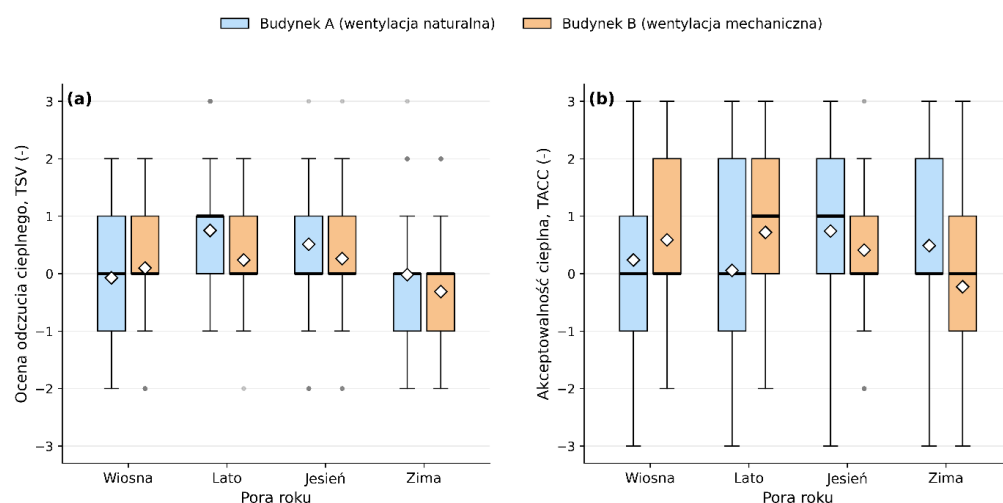
na wartość mediany TSV nie zawsze oznacza wysoki poziom akceptowalności warunków cieplnych. Przykładowo, w niektórych sezonach mediana odczucia cieplnego była bliska 0, ale udział głosów wskazujących na pełniejszą akceptację, czyli $TACC \geq 1$, pozostawał stosunkowo niski. Oznacza to, że użytkownicy mogli nie odczuwać warunków jako wyraźnie ciepłych lub chłodnych, ale jednocześnie nie zawsze oceniali je jako satysfakcjonujące. Dlatego równoległa analiza TSV, TACC oraz udziału głosów spełniających kryteria akceptowalności daje pełniejszy obraz jakości środowiska wewnętrznego niż sama analiza median lub wartości średnich.

Z punktu widzenia projektantów i osób odpowiedzialnych za eksploatację budynków szczególnie istotna jest relacja między medianą, rozstępem międzykwartylowym IQR (ang. *Interquartile Range*), długością wąsów oraz udziałem użytkowników deklaruujących akceptowalność

lub brak dyskomfortu. Mediana pokazuje typową ocenę użytkowników, IQR informuje o zgodności opinii większości badanych, a długość wąsów i wartości odstające wskazują na ryzyko występowania lokalnych lub indywidualnych problemów z komfortem. Z kolei wskaźniki z Rysunku 3 pokazują, jakie odsetki użytkowników rzeczywiście oceniają warunki jako akceptowalne lub przynajmniej niedyskomfortowe. W praktyce oznacza to, że nawet przy medianie TSV równej 0, czyli przy neutralnej ocenie typowego użytkownika, budynek może wymagać korekt eksploatacyjnych, jeżeli IQR jest szeroki, występują liczne oceny skrajne lub udział głosów akceptowalnych jest niski.

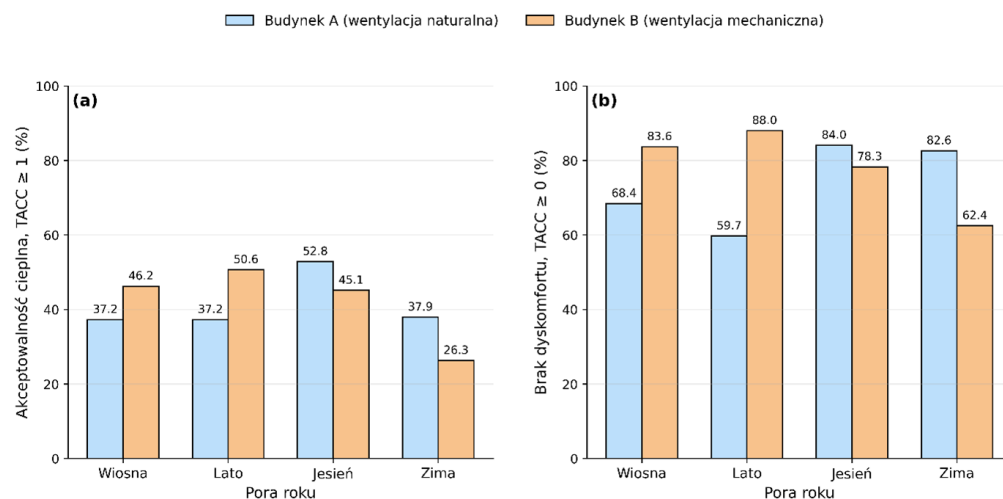
Wyniki przedstawione na Rysunkach 2 i 3 wskazują, że w budynku z wentylacją mechaniczną korzystniejsze oceny użytkowników występowały głównie w okresie ciepłym, co można wiązać ze skuteczniejszą stabilizacją warunków

środowiska wewnętrznego przez system HVAC. Z kolei w budynku z wentylacją naturalną lepsze wyniki pod względem braku dyskomfortu zaobserwowano jesienią i zimą, natomiast latem widoczne było większe ryzyko przegrzewania i pogorszenia odbioru warunków. Z tej przyczyny przy projektowaniu i modernizacji biur warto analizować nie tylko wartości średnie lub mediany, lecz także rozrzut odpowiedzi użytkowników oraz procentowy udział głosów wskazujących na akceptowalność i brak dyskomfortu. To właśnie połączenie tych miar pozwala ocenić, czy komfort jest doświadczeniem większości użytkowników, czy tylko wynikiem uśrednienia bardzo różnych ocen.



Rysunek 2. Sezonowa zmienność oceny odczucia cieplnego (TSV) oraz akceptowalności cieplnej (TACC) w budynkach A i B: (a) rozkład głosów odczucia cieplnego użytkowników w skali ASHRAE od -3 do +3, (b) rozkład ocen akceptowalności cieplnej w siedmiostopniowej skali od -3 do +3. Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Seasonal variation in thermal sensation vote (TSV) and thermal acceptability (TACC) in buildings A and B: (a) the distribution of occupants' thermal sensation votes on the ASHRAE scale from -3 to +3, (b) the distribution of thermal acceptability ratings on a seven-point scale from -3 to +3. Source: authors' own study



Rysunek 3. Sezonowa zmienność poziomu akceptowalności cieplnej (a) oraz braku dyskomfortu cieplnego (b) w budynkach A i B. Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Seasonal variation in the level of thermal acceptability (a) and absence of thermal discomfort (b) in buildings A and B. Source: authors' own study

Zależność odczucia cieplnego od temperatury powietrza i ograniczenia modeli regresyjnych

Na Rysunku 4 przedstawiono zależność oceny odczucia cieplnego użytkowników, wyrażonej wskaźnikiem TSV, od temperatury powietrza wewnętrznego T_a w budynkach A i B. Analizę wykonano dla obserwacji, w których $T_a \leq 30^\circ\text{C}$, aby ograniczyć wpływ pojedynczych skrajnych wartości temperatury na przebieg dopasowania. W pierwszym etapie zastosowano regresję liniową, która pozwala ocenić ogólną

ny kierunek zmian odczucia ciepłego wraz ze wzrostem temperatury powietrza. W obu budynkach zależność była dodatnia, co oznacza, że wraz ze wzrostem T_a użytkownicy częściej oceniali warunki jako cieplejsze. Nachylenia prostych regresji były bardzo zbliżone, co wskazuje na podobną średnią wrażliwość użytkowników obu budynków na zmianę temperatury powietrza. W obu przypadkach zależność była istotna statystycznie ($p < 0,001$), jednak wartości współczynnika determinacji były relatywnie niskie: $R^2 = 0,068$ dla budynku A oraz $R^2 = 0,062$ dla budynku B. Wskazuje to, że sama temperatura powietrza wyjaśnia

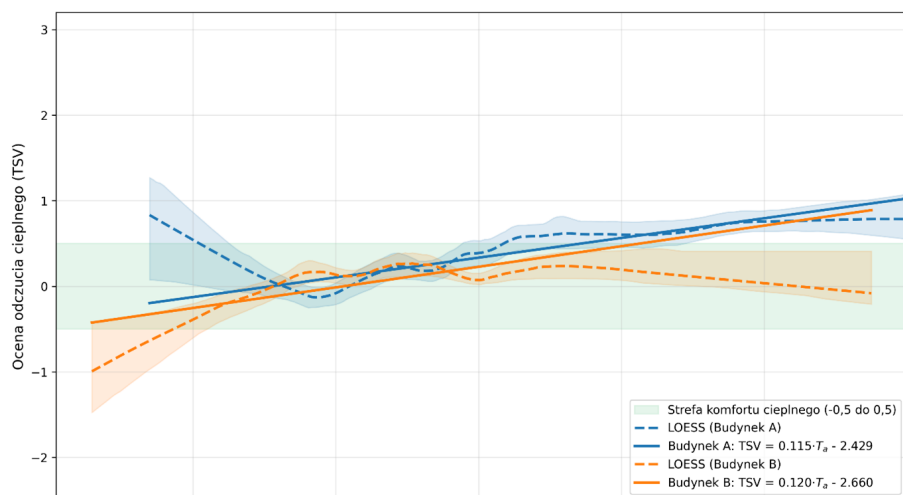
jedynie niewielką część zmienności subiektywnych ocen cieplnych. Na podstawie dopasowanych linii wyznaczono również temperatury neutralne, czyli wartości $T_{a,n}$ przy których przewidywana ocena TSV odpowiada odczuciu neutralnemu. Wyniosły one około $21,1^\circ\text{C}$ dla budynku A oraz $22,1^\circ\text{C}$ dla budynku B. Oznacza to, że w budynku z wentylacją mechaniczną neutralne odczucie ciepłe osiągano przy temperaturze o około 1°C wyższej niż w budynku z wentylacją naturalną.

Regresja liniowa dobrze pokazuje ogólny trend, ale zakłada stałe tempo wzrostu TSV w całym analizowanym

zakresie temperatury. Z tej przyczyny na Rysunku 4 przedstawiono również dopasowanie LOESS. Jest to lokalna metoda wygładzania danych, która nie narzuca z góry prostoliniowego przebiegu zależności, lecz pokazuje empiryczny trend w kolejnych zakresach temperatury. Dzięki temu można zauważyć, czy reakcja użytkowników na wzrost temperatury była podobna w całym zakresie pomiarowym, czy też zmieniała się lokalnie. W analizowanych danych przebieg LOESS wskazuje, że zależność TSV od T_a nie była idealnie liniowa. W budynku A krzywa LOESS, mimo lokalnych wahań, generalnie rosła wraz ze wzrostem temperatury, pozostając zgodna z kierunkiem regresji liniowej. W budynku B widoczne było natomiast lokalne wypłaszczenie przebiegu, a przy wyższych temperaturach nawet lekkie obniżenie wartości TSV. Może to oznaczać, że w określonych warunkach wzrost temperatury nie prowadził bezpośrednio do proporcjonalnego wzrostu odczucia ciepła, co może być związane z działaniem instalacji, sezonowością, zmianą odzieży lub reakcjami użytkowników na warunki panujące w pomieszczeniu.

Aby sprawdzić, czy zależność TSV od temperatury można opisać lepiej niż prostą regresją liniową, porównano kilka wariantów modeli regresyjnych (Tabela 1). Uwzględniono modele liniowe, wielomianowe, modele z funkcją spline oraz modele rozszerzone o dodatkowe zmienne, takie jak sezon, wilgotność względna, izolacyjność odzieży, sposób wentylacji i elementy regulacji środowiska (PECS) przez użytkowników.

Porównanie modeli pokazuje, że sama zmiana kształtu zależności między TSV a temperaturą powietrza, np. przez zastosowanie wielomianu lub funkcji spline, poprawiała dopasowanie tylko nieznacznie. Współczynnik determinacji R^2 wzrastał z 0,086 dla



Rysunek 4. Zależność oceny odczucia ciepłego użytkowników (TSV) od temperatury powietrza wewnętrznego (T_a) w budynkach A i B dla obserwacji, w których $T_a \leq 30^\circ\text{C}$. Linie ciągłe przedstawiają dopasowanie regresji liniowej, natomiast linie przerywane dopasowanie LOESS. Zacieniowany na zielono obszar oznacza strefę komfortu cieplnego, przyjętą jako zakres TSV od $-0,5$ do $+0,5$. Źródło: opracowanie własne

Figure 4. Relationship between occupants' thermal sensation vote (TSV) and indoor air temperature (T_a) in buildings A and B for observations with $T_a \leq 30^\circ\text{C}$. Solid lines represent linear regression fits, while dashed lines show LOESS smoothing. The green shaded area indicates the thermal comfort zone, defined as TSV between -0.5 and $+0.5$. Source: authors' own study

Tabela 1. Zestawienie dopasowania wybranych modeli regresyjnych opisujących zależność oceny odczucia ciepłego (TSV) od temperatury powietrza wewnętrznego (T_a) oraz zmiennych opisujących warunki środowiskowe, sposób użytkowania i cechy budynku. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Summary of the goodness of fit of selected regression models describing the relationship between thermal sensation vote (TSV) and indoor air temperature (T_a), as well as variables related to indoor environmental conditions, building operation and building characteristics. Source: authors' own study area indicates the thermal comfort zone, defined as TSV between -0.5 and $+0.5$. Source: authors' own study

Model regresji	Liczba obserwacji	R^2	R^2 skoryg.	RMSE
Regresja liniowa: $T_a \times$ budynek	2034	0,086	0,084	0,936
Model kwadratowy: $T_a + T_a^2 \times$ budynek	2034	0,090	0,088	0,934
Model sześcienny: $T_a + T_a^2 + T_a^3 \times$ budynek	2034	0,095	0,092	0,931
Spline kubiczny: $T_a \times$ budynek	2034	0,097	0,093	0,930
Spline $T_a +$ budynek + sezon	2034	0,122	0,116	0,917
Spline $T_a +$ sezon + RH + CLO	1968	0,149	0,143	0,905
Model pełny: spline T_a , budynek, sezon, RH, CLO, wentylacja, otwarcie okna, osłony, PECS	1968	0,176	0,167	0,891
Model pełny z efektem użytkownika	1968	0,335	0,317	0,800

modelu liniowego do 0,097 dla modelu spline. Oznacza to, że ograniczone dopasowanie nie wynikało głównie z tego, że zależność była nieliniowa. Sama temperatura powietrza, nawet opisana bardziej elastycznym modelem, wyjaśniała jedynie niewielką część zmienności ocen użytkowników.

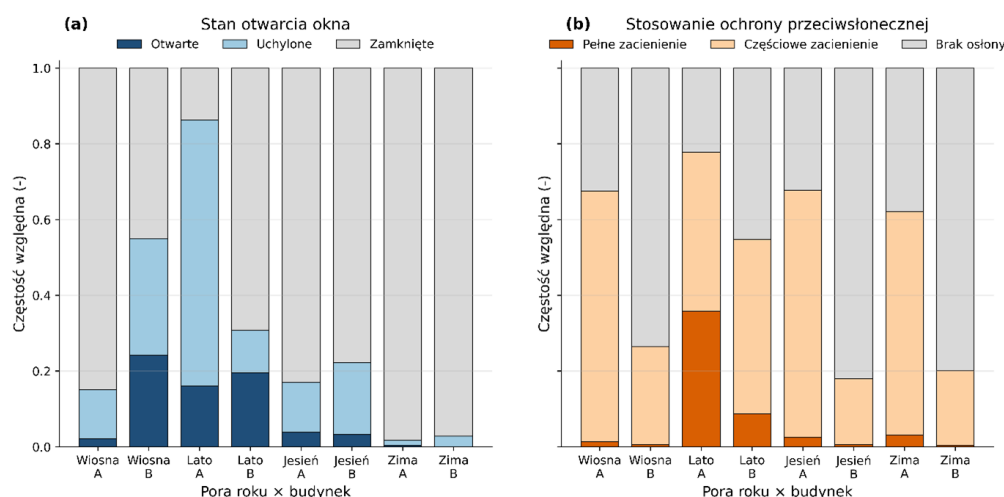
Wyraźniejszą poprawę dopasowania uzyskano dopiero po dodaniu zmiennych opisujących kontekst użytkowania budynku. Uwzględnienie sezonu zwiększyło R^2 do 0,122, a dodanie wilgotności względnej i izolacyjności odzieży do 0,149. Najlepszy model interpretowalny, obejmujący także sposób wentylacji, otwarcie okien, osłony przeciwsłoneczne oraz urządzenia osobiste PECS, osiągnął R^2 równe 0,176. Najwyższe dopasowanie uzyskano po uwzględnieniu efektu użytkownika, gdzie R^2 wzrosło do 0,335. Taki wynik wskazuje, że duże znaczenie miały różnice indywi-

dualne oraz lokalne warunki na stanowiskach pracy.

Z punktu widzenia praktyki projektowej i eksploatacyjnej wyniki te są istotne, ponieważ pokazują ograniczenia oceny komfortu cieplnego wyłącznie na podstawie temperatury powietrza. Temperatura jest parametrem podstawowym i łatwo mierzalnym, ale nie opisuje w pełni odczuć użytkowników. Na ocenę TSV wpływają również sezon, wilgotność, ubiór, sposób działania instalacji, możliwość regulacji środowiska oraz indywidualna tolerancja ciepła. Dlatego nawet przy podobnej temperaturze powietrza użytkownicy mogą różnie oceniać warunki, a przy neutralnej wartości TSV część osób może nadal zgłaszać ograniczoną akceptowalność lub dyskomfort.

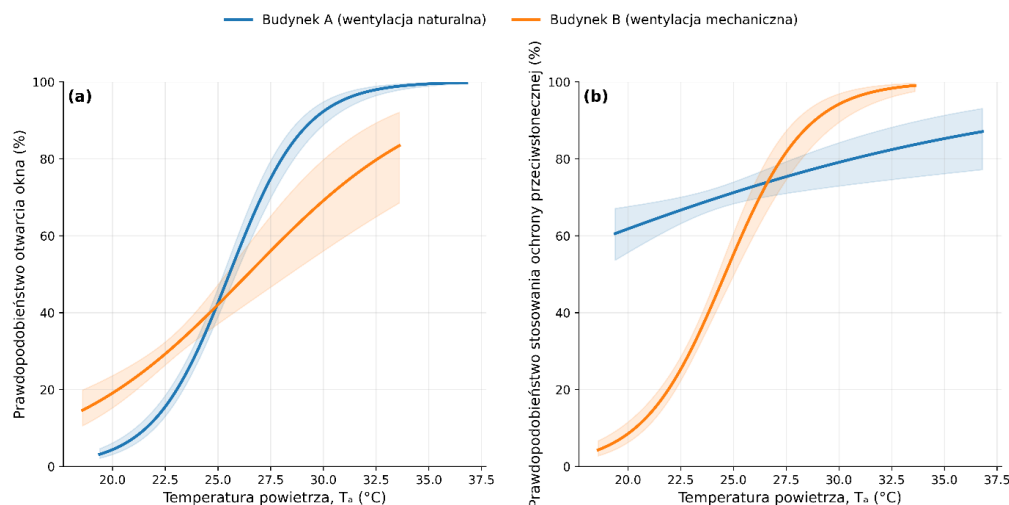
Dynamika zachowań adaptacyjnych

Wyniki regresji liniowej, przebieg krzywych LOESS oraz



Rysunek 5. Częstość względna występowania poszczególnych stanów otwarcia okna (a) oraz poziomów stosowania ochrony przeciwsłonecznej (b) w budynkach A i B, w podziale na pory roku. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Relative frequency of window opening states (a) and levels of solar shading use (b) in Buildings A and B by season. Source: authors' own study



Rysunek 6. Prawdopodobieństwo podejmowania działań adaptacyjnych przez użytkowników w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego T_a w budynkach A i B: (a) prawdopodobieństwo otwarcia okna, (b) prawdopodobieństwo stosowania ochrony przeciwsłonecznej. Krzywe przedstawiają dopasowanie modeli regresji logistycznej, a zacieniowane obszary oznaczają 95% przedziały ufności. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. Probability of occupants' adaptive actions as a function of indoor air temperature T_a in Buildings A and B: (a) probability of window opening, (b) probability of using solar shading. The curves represent fitted logistic regression models, and the shaded areas indicate 95% confidence intervals. Source: authors' own study

porównanie modeli regresyjnych prowadzą do wspólnego wniosku: odczucie ciepłe w rzeczywistych budynkach biurowych jest wynikiem nie tylko parametrów fizycznych środowiska, ale także sposobu użytkowania budynku i działań adaptacyjnych pracowników. Szczególnie istotne mogą być takie zachowania jak zmiana odzieży, otwieranie okien, korzystanie z osłon przeciwsłonecznych czy używanie urządzeń osobistych PECS (np. wentylatorów, klimatyzatorów lub grzejników).

Na Rysunku 5 przedstawiono sezonową częstość działań adaptacyjnych związanych z otwieraniem okien i stosowaniem ochrony przeciwsłonecznej, natomiast Rysunek 6 pokazuje, jak prawdopodobieństwo tych działań zmieniało się wraz z temperaturą powietrza w pomieszczeniu. Oba ujęcia prowadzą do spójnych wniosków. W budynku A, z wentylacją naturalną, otwieranie lub uchylanie okien występowało najczęściej latem i jednocześnie silnie zależało od temperatury powietrza. Prawdopodobieństwo otwarcia okna rosło od kilku procent przy około 20°C do ponad 90% przy 30°C. Oznacza to, że okna były podstawowym sposobem bieżącej regulacji warunków cieplnych w okresach podwyższonej temperatury. W budynku B, z wentylacją mechaniczną,

ną, przez większą część roku dominował stan zamknięty okien, a wzrost prawdopodobieństwa otwarcia okna wraz ze wzrostem temperatury był łagodniejszy. Wskazuje to, że otwieranie okien miało tam raczej charakter uzupełniający w stosunku do pracy instalacji HVAC.

Podobne zależności były widoczne również w przypadku ochrony przeciwsłonecznej. W budynku A częściowe zacienienie było stosowane często przez większą część roku, a latem wzrastał udział pełnego zacienienia. Jednocześnie prawdopodobieństwo zastosowania osłon było wysokie już przy niższych temperaturach i umiarkowanie rosło wraz ze wzrostem T_a . Może to świadczyć o stałej potrzebie ograniczania zysków słonecznych, szczególnie w budynku o większej podatności na warunki zewnętrzne. W budynku B częściej występował brak osłony, a stosowanie zacienienia nasilało się głównie latem i przy wyższych temperaturach. Wyniki te pokazują, że użytkownicy obu biur reagowali na pogorszenie warunków cieplnych, jednak w budynku z wentylacją naturalną działania adaptacyjne były częstsze i bardziej podstawowe dla utrzymania komfortu, natomiast w budynku z wentylacją mechaniczną stanowiły raczej dodatkowy mechanizm korekty lokalnych warunków.

Modyfikacja odzieży

Na Rysunku 7 przedstawiono dwa uzupełniające się ujęcia adaptacji użytkowników przez odzież. Rysunek 7a przedstawia sezonowy rozkład izolacyjności odzieży, natomiast Rysunek 7b – prawdopodobieństwo deklarowanej modyfikacji odzieży w zależności od temperatury powietrza w pomieszczeniu. Wyniki wskazują, że poziom izolacyjności odzieży był przede wszystkim związany z porą roku. W obu budynkach najniższe wartości poziomu izolacyjności odzieży występowały latem, a najwyższe zimą, co potwierdza sezonowe dostosowanie ubioru do warunków zewnętrznych i oczekiwań cieplnych użytkowników. Różnice między sezonami były większe niż różnice między budynkami, choć zimą i jesienią nieco wyższe wartości izolacyjności odzieży obserwowano w budynku B z wenty-

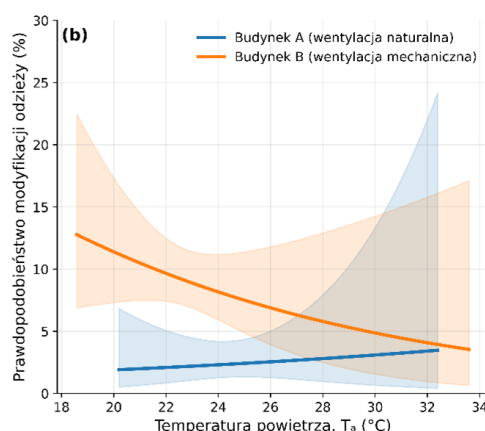
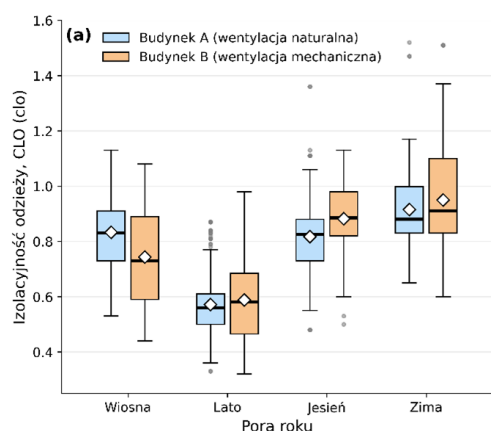
lacją mechaniczną.

Deklarowana modyfikacja odzieży w trakcie dnia była jednak stosunkowo rzadka. Udział odpowiedzi „Tak” w budynku A nie przekraczał 3,7% w żadnym sezonie. W budynku B modyfikacje odzieży były częstsze, szczególnie jesienią (12,6%) i wiosną (11,4%), ale nadal dotyczyły mniejszości obserwacji. Jest to spójne z Rysunkiem 7b, gdzie prawdopodobieństwo modyfikacji odzieży pozostawało na niskim poziomie, zwłaszcza w budynku A. W budynku B krzywa wskazuje na wyższe prawdopodobieństwo zmian odzieży przy niższych temperaturach, co może sugerować, że użytkownicy częściej reagowali na odczucie chłodu niż na przegrzewanie.

Z punktu widzenia eksploatacji budynków wyniki te pokazują, że adaptacja przez odzież miała głównie charakter sezonowy, a nie bieżący. Użytkownicy dostosowywali typowy poziom izolacyjności ubioru do pory roku, natomiast modyfikacje odzieży w ciągu dnia były rzadkie. W budynku z wentylacją naturalną większe znaczenie miały prawdopodobnie działania regulujące środowisko, takie jak otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych. W budynku z wentylacją mechaniczną adaptacja przez odzież była częstsza, lecz nadal stanowiła działanie pomocnicze. Potwierdza to, że ocena komfortu cieplnego w biurach powinna uwzględniać zarówno parametry środowiska, jak i rzeczywiste możliwości oraz częstotliwość stosowania działań adaptacyjnych przez użytkowników.

Stosowanie systemów wspomagających PECS

Stosowanie PECS miało wyraźnie sezonowy charakter i było związane przede wszystkim z warunkami letnimi oraz wzrostem temperatury powietrza w pomieszczeniach. W obu biurach przez większość roku dominował brak użycia PECS, natomiast latem ich udział wyraźnie wzrastał. W budynku A, z wentylacją naturalną, PECS stosowano latem w około 27% obserwacji, głównie w postaci osobistych wentylatorów. Oznacza to, że użytkownicy tego budynku wykorzystywali PECS jako dodatkowe wsparcie w warunkach podwyższonej temperatury, obok innych



Rysunek 7. Zachowania adaptacyjne użytkowników związane z odzieżą w budynkach A i B:

(a) sezonowy rozkład izolacyjności odzieży (CLO) w obu budynkach, (b) prawdopodobieństwo modyfikacji odzieży w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego T_a , wyznaczone na podstawie regresji logistycznej; zacieniowane obszary oznaczają 95% przedziały ufności. Źródło: opracowanie własne

Figure 7. Occupants' clothing-related adaptive behaviour in buildings A and B: (a) the seasonal distribution of clothing insulation (CLO) in both buildings, (b) the probability of clothing modification as a function of indoor air temperature T_a , estimated using logistic regression; the shaded areas indicate 95% confidence intervals. Source: authors' own study

działań adaptacyjnych, takich jak otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych. W budynku B, z wentylacją mechaniczną, udział PECS latem był znacznie wyższy i wynosił około 54%, przy czym dominowało stosowanie klimatyzatorów strefowych. Również model logistyczny potwierdzał silniejszą reakcję użytkowników budynku B na wzrost temperatury – prawdopodobieństwo użycia PECS rosło tam gwałtownie po przekroczeniu około 24–25°C, podczas gdy w budynku A wzrost był bardziej stopniowy. Wyniki te wskazują, że mimo obecności ogólnej instalacji HVAC w budynku B użytkownicy często potrzebowali do-

datkowej lokalnej regulacji warunków cieplnych. Może to świadczyć o zróżnicowaniu warunków na stanowiskach pracy lub niedopasowaniu parametrów pracy systemu do indywidualnych oczekiwań użytkowników. Z punktu widzenia eksploatacji budynków, PECS należy więc traktować nie tylko jako element poprawy komfortu indywidualnego, ale także jako sygnał potencjalnych problemów z równomiernością i skutecznością regulacji środowiska wewnętrznego.

Dyskusja

Uzyskane wyniki pokazują, że różnice między budynkami nie sprowadzają się wyłącznie do rodzaju wentylacji, lecz wynikają z połączenia warunków sezonowych, zakresu temperatury, działania instalacji oraz dostępnych form adaptacji. Budynek A, z wentylacją naturalną i bez aktywnego chłodzenia, był bardziej podatny na sezonowe wahania temperatury, szczególnie latem. Budynek B, z wentylacją mechaniczną i chłodzeniem, charakteryzował się bardziej stabilnymi warunkami temperaturowymi, ale mimo to użytkownicy często korzystali z dodatkowych działań adaptacyjnych, zwłaszcza PECS. Oznacza to, że sama obecność systemu HVAC nie gwarantuje pełnego dopasowania warunków do potrzeb użytkowników.

Zależność TSV od temperatury powietrza była dodatnia w obu budynkach, ale niskie wartości R^2 wskazują, że temperatura wyjaśniała tylko niewielką część zmienności ocen cieplnych. Również zastosowanie bardziej złożonych modeli, takich jak wielomiany czy funkcje spline, poprawiało dopasowanie jedynie nieznacznie. Dopiero uwzględnienie sezonu, wilgotności, izolacyjności odzieży i działań adaptacyjnych poprawiało opis danych, a najwyższe dopasowanie uzyskano po uwzględnieniu efektu użytkownika. Wynik ten jest istotny praktycznie: komfort cieplny w biurach należy traktować jako zjawisko zależne nie tylko od parametrów powietrza, ale również od lokalnych warunków stanowiskowych i indywidualnych preferencji.

Temperatury neutralne wyznaczone z regresji liniowej

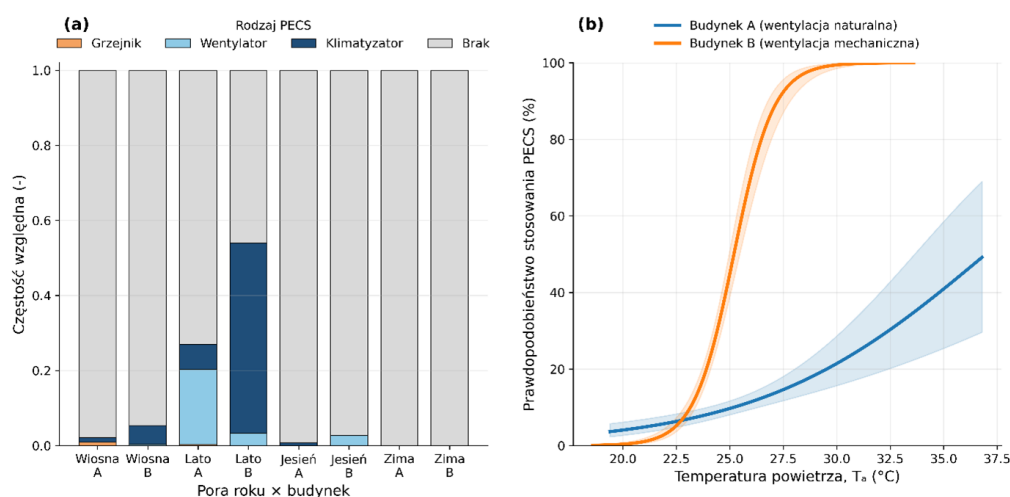
wyniosły około $21,1^{\circ}\text{C}$ w budynku A oraz $22,1^{\circ}\text{C}$ w budynku B. Różnica ta jest niewielka i, co ważne, nie potwierdza prostego założenia, że użytkownicy budynku z wentylacją naturalną osiągają neutralność cieplną przy wyższej temperaturze (de Dear & Brager, 2002). Z tej przyczyny wyników nie należy interpretować jako dowodu większej tolerancji cieplnej w którymkolwiek z budynków. Bardziej uzasadnione jest wskazanie, że użytkownicy obu obiektów reagowali na zmiany temperatury podobnie pod względem średniego trendu TSV, ale posługiwali się innymi mechanizmami adaptacji.

Największe różnice między budynkami ujawniły się właśnie w zachowaniach użytkowników. W budynku A dominowały działania związane z bezpośrednią regulacją środowiska, przede wszystkim otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych. W budynku B częściej obserwowano stosowanie PECS, zwłaszcza latem. Jest to ważna informacja eksploatacyjna: częste użycie lokalnych klimatyzatorów lub innych urządzeń wspomagających może wskazywać nie tyle na większy komfort, ile na lokalne niedopasowanie pracy instalacji HVAC do potrzeb użytkowników.

Wyniki dotyczące akceptowalności cieplnej pokazują, że neutralne odczucia cieplne nie powinny być traktowane jako wystarczający wskaźnik jakości środowiska cieplnego. W części przypadków użytkownicy oceniali warunki jako bliskie neutralnym, ale udział głosów wskazujących na wyraźną akceptowalność był umiarkowany. Dla praktyki projektowej i eksploatacyjnej oznacza to konieczność łączenia oceny odczucia cieplnego z oceną akceptowalności oraz uwzględniania udziału osób deklarujących brak dyskomfortu.

Ograniczeniem badań jest liczba analizowanych budynków i uczestników oraz fakt, że kampanie pomiarowe obejmowały wybrane okresy w poszczególnych sezonach. Wyniki należy więc traktować jako charakterystykę badanych budynków, a nie jako uniwersalne wartości projektowe. Mimo to analiza ta ma znaczenie praktyczne, ponieważ pokazuje, że skuteczna strategia zapewnienia komfortu

powinna łączyć stabilną pracę instalacji z możliwością lokalnej, intuicyjnej regulacji środowiska przez użytkowników. Wyniki te wskazują również na potencjał rozwiązań mixed-mode, czyli systemów hybrydowych łączących wentylację naturalną, możliwość adaptacji użytkowników oraz wsparcie mechaniczne uruchamiane wtedy, gdy warunki przekraczają możliwości regulacji pasywnej.



Rysunek 8. Stosowanie PECS w budynkach A i B: (a) częstość względna użycia poszczególnych typów PECS w zależności od pory roku i budynku, (b) prawdopodobieństwo stosowania PECS w funkcji temperatury powietrza T_a , oszacowane metodą regresji logistycznej. Zaciemnione obszary oznaczają przedziały ufności 95%. Źródło: opracowanie własne

Figure 8. Use of PECS in Buildings A and B: (a) relative frequency of different PECS types by season and building, (b) probability of PECS use as a function of indoor air temperature T_a , estimated using logistic regression. Shaded areas indicate 95% confidence intervals. Source: authors' own study

Wnioski

Analiza wyników badań terenowych przeprowadzonych w dwóch budynkach biurowych o skrajnie odmiennych strategiach wentylacyjnych (budynek A – naturalna, budynek B – mechaniczna) pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Temperatura powietrza wpływa na odczucie ciepłe, ale nie wyjaśnia go w pełni. Niskie wartości R^2 wskazują, że sama temperatura powietrza nie jest wystarczającym wskaźnikiem komfortu cieplnego użytkowników.
- Temperatury neutralne były zbliżone w obu budynkach: 21,1°C w budynku A oraz 22,1°C w budynku B. Nie potwierdzono więc przesunięcia temperatury neutralnej w stronę wyższych wartości w budynku z wentylacją naturalną.
- Różnice między budynkami ujawniły się przede wszystkim w sposobie adaptacji użytkowników. W budynku A dominowało otwieranie okien i stosowanie osłon przeciwsłonecznych, natomiast w budynku B częściej wykorzystywano PECS, szczególnie latem.
- Neutralne odczucie ciepłe nie zawsze oznaczało akceptowalne warunki, dlatego ocena komfortu powinna obejmować oba wskaźniki oraz udział użytkowników deklarujących akceptowalność i brak dyskomfortu.
- Adaptacja przez odzież miała głównie charakter sezonowy. Użytkownicy zmieniali poziom izolacyjności odzieży w zależności od pór roku, natomiast bieżące modyfikacje ubioru w ciągu dnia były rzadkie.
- Zastosowanie PECS może być sygnałem lokalnych problemów z komfortem. Szczególnie w budynku z wentylacją mechaniczną częste użycie klimatyzatorów lokalnych wskazuje na potrzebę lepszego dopasowania warunków do stanowisk pracy.
- Wyniki wspierają stosowanie rozwiązań hybrydowych typu mixed-mode. Najkorzystniejsze podejście powinno łączyć stabilną pracę instalacji z możliwością lokalnej regulacji środowiska przez użytkowników, zamiast opierać się wyłącznie na utrzymywaniu jednej stałej temperatury zadanej. Pozwala to wykorzystać potencjał adaptacyjny użytkowników w okresach umiarkowanych oraz zapewnia wsparcie mechaniczne, np. podczas fal upałów.

Podziękowania

Niniejsza praca powstała w ramach projektu „Cyfrowy awatar budynek-człowiek do projektowania i eksploatacji efektywnych energetycznie budynków z zaawansowanym modelem termicznym użytkowników” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu OPUS w programie Weave (nr grantu 2022/47/I/ST8/02272). Autorzy składają podziękowania wszystkim uczestnikom badań za zaangażowanie, poświęcony czas i udział w ankietach prowadzonych w budynkach biurowych. Szczególne podziękowania kierowane są do H11 Boutique Office za wsparcie udzielone podczas realizacji badań.

Bibliografia

- ASHRAE. (2023). ANSI/ASHRAE Standard 55-2023 Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- Brager, G., Paliaga, G., de Dear, R., Olesen, B., Wen, J., Nicol, F., & Humphreys, M. (2004). Operable windows, personal control, and occupant comfort. *ASHRAE Transactions*, 110, 17–35.
- de Dear, R., & Brager, G. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34, 549–561. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- de Dear, R. J., Akimoto, T., Arens, E. A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K. W. D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S. C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H., & Zhu, Y. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*, 23(6), 442–461. <https://doi.org/10.1111/ina.12046>
- Dennis, A. (2017). Global trends in thermal comfort in air conditioned and naturally ventilated offices in six climates. *University of California, Berkeley* <https://escholarship.org/uc/item/203955bs>
- Fanger, P. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill.
- Frontczak, M., Goins, J., Arens, E., Zhang, H., & Wargocki, P. (2011). Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. *Indoor Air*, 22, 119–131. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00745.x>
- Fuhrmann, M., Lipczyńska, A., & Ferdyn-Grygierek, J. (2025). Spersonalizowane systemy kontroli środowiska (PECS) jako klucz do indywidualizacji komfortu cieplnego w nowoczesnym budownictwie. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 56(6), 19–25. <https://doi.org/10.15199/9.2025.6.3>
- Graham, L., & Parkinson, T. (2021). Lessons learned from 20 years of CBE's occupant surveys. *Buildings and Cities*, 2, 166–184. <https://doi.org/10.5334/bc.76>
- Gupta, R., & Howard, A. (2019). Comparative evaluation of the link between measured and perceived indoor environmental conditions in naturally and mechanically ventilated office environments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609(4), 042080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/4/042080>
- Khoshbakht, M., Zhang, F., Zomorodian, M., & Gou, Z. (2023). Thermal sensitivity and adaptive comfort in mixed-mode office buildings in humid subtropical climate. *Building Research & Information*, 52, 1–15. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2256430>
- Khovalyg, D., Bivolarova, M. P., Shinoda, J., Al-Assaad, D., Vellei, M., Bandurski, K., Chinazzo, G., Kazanci, O. B., Kim, J., Kramer, T., Lipczyńska, A., Liu, S., Pasut, W., Rawal, R., Sekhar, C., Sun, R., Wu, Z., Afshari, A., Martinez-Alcaraz, P., Andre, M., Zaniboni, L. (2025). Personalized Environmental Control Systems (PE-

- CS): Systematic Review of Benefits for Thermal Comfort, Air Quality, Health, and Human Performance. *Building and Environment*, 286, 113541. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113541>
- Kim, J., Schiavon, S., & Brager, G. (2018). Personal comfort models – A new paradigm in thermal comfort for occupant-centric environmental control. *Building and Environment*, 132, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.023>
- Kim, J., Zhou, Y., Schiavon, S., Raftery, P., & Brager, G. (2018). Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning. *Building and Environment*, 129, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.011>
- Lamsal, P., Bajracharya, S. B., & Rijal, H. B. (2023). A Review on Adaptive Thermal Comfort of Office Building for Energy-Saving Building Design. *Energies*, 16(3), 1524. <https://doi.org/10.3390/en16031524>
- Liu, J., Yao, R., & McCloy, R. (2013). An investigation of thermal comfort adaptation behaviour in office buildings in the UK. *Indoor and Built Environment*, 23, 675–691. <https://doi.org/10.1177/1420326X13481048>
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, Special Issue on Thermal Comfort Standards, 34(6), 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków—Wentylacja budynków—Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki—Moduł M1-6. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- PKN. (2026). PN-EN ISO 7730:2026-03 Ergonomia środowiska termicznego—Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowa-
- niem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego. *Polski Komitet Normalizacyjny*.
- Rawal, R., Shukla, Y., Vardhan, V., Asrani, S., Schweiker, M., de Dear, R., Garg, V., Mathur, J., Prakash, S., Diddi, S., Ranjan, S. V., Siddiqui, A. N., & Somani, G. (2022). Adaptive thermal comfort model based on field studies in five climate zones across India. *Building and Environment*, 219, 109187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109187>
- Rijal, H., Humphreys, M., & Nicol, J. (2019). Behavioural Adaptation for the Thermal Comfort and Energy Saving in Japanese Offices. *Journal of the Institute of Engineering*, 15, 14–25. <https://doi.org/10.3126/jie.v15i2.27637>
- Rupp, R. F., Parkinson, T., Kim, J., Toftum, J., & de Dear, R. (2022). The impact of occupant's thermal sensitivity on adaptive thermal comfort model. *Building and Environment*, 207, 108517. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108517>
- Rupp, R., Kim, J., Toftum, J., Brager, G., & Dear, R. (2025). Ten Questions Concerning the Application of Adaptive Thermal Comfort in Mixed-Mode Buildings. *Building and Environment*, 284, 113490. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113490>
- Shrestha, B., Rai, Y., Rijal, H. B., & Shrestha, R. (2025). A Review of the Importance of Window Behavior and Its Impact on Indoor Thermal Comfort for Sustainability. *Architecture*, 5(4), 100. <https://doi.org/10.3390/architecture5040100>
- Wang, Z., de Dear, R., Luo, M., Geng, Y., & Zhu, Y. (2018). Individual Difference in Thermal Comfort: A Literature Review. *Building and Environment*, 138, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.040>
- Zagreus, L., Huizenga, C., Arens, E., & Lehrer, D. (2004). Listening to the occupants: A Web-based indoor environmental quality survey. *Indoor Air*, 14(8), 65–74. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00301.x>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0*.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license*.



Szczegóły: <https://pzits.bialystok.pl/xii-podlaska-konferencja-cieplownicza>