

Wskaźnikowa ocena komfortu w budynkach mieszkalnych zlokalizowanych w klimacie umiarkowanym

Indicative assessment of thermal comfort in residential buildings for temperate climate

[dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz, prof. uczelni](#), [mgr inż. Romana Antczak-Jarząbska](#) | [IZOLACJE 6/2016](#) | 2016-07-13

Utrzymanie odpowiednich warunków cieplnych środowiska w pomieszczeniach skutkuje efektywniejszą pracą i lepszym samopoczuciem osób w nich przebywających. Warunki te można próbować określić za pomocą wskaźników PMV (przewidywana ocena średnia) i PPD (przewidywany odsetek osób niezadowolonych).

W krajach rozwiniętych ok. 40% całkowitego zużycia energii pochłaniana jest przez budynki [1], z czego ponad 55% wykorzystywane jest do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń [2].

Obecnie większość z tej energii dostarczana jest ze źródeł nieodnawialnych, co przyczynia się do degradacji środowiska naturalnego i znacznych kosztów ogrzewania/chłodzenia. Wobec tego należy skoncentrować się na zwiększeniu dbałości o rozwój budownictwa zrównoważonego, którego celem jest ograniczenie negatywnego wpływu budynków na środowisko naturalne oraz zdrowie człowieka. **Budownictwo zrównoważone** ma za zadanie zapewnić jak najniższe zużycie energii podczas produkcji oraz w czasie eksploatacji i nie wpływać przy tym negatywnie na środowisko [3],[4]. Musi być energooszczędne oraz zapewnić komfort użytkownika.

W artykule skoncentrowano się na przedstawieniu sposobu oceny komfortu termicznego w budynkach poddanych analizie. Jako najważniejsze parametry charakteryzujące klimat przyjęto:

- temperaturę powietrza t_a [°C],
- temperaturę promieniowania termicznego otoczenia t_{MR} [°C],
- wilgotność powietrza H [%],
- prędkość [m/s],
- a także ciśnienie atmosferyczne p_a [Pa].

W celu zbadania komfortu wykonano długoterminowe obserwacje, przeprowadzone w okresie grzewczym w dwóch różnych budynkach mieszkalnych. Eksperymenty wykonano w budynku jednorodzinny (**budynek nr 1**) oraz w mieszkaniu budynku wielorodzinnego (**budynek nr 2**). Oba budynki zlokalizowane były w klimacie umiarkowanym przejściowym, czyli w klimacie o zmiennych stanach pogody.

Podczas pomiarów budynki były eksploatowane – użytkowane jako budynki mieszkalne.

W pracy skoncentrowano się na zbadaniu dwóch wskaźników określających komfort termiczny PMV (ang. Predicted Mean Vote - przewidywana ocena średnia) oraz PPD (ang. Predicted Percentage Dissatisfied - przewidywany odsetek osób niezadowolonych). Wskaźnik PMV stosowany jest w opisie komfortu cieplnego w pomieszczeniach zamkniętych i opisuje wrażenia cieplne człowieka. Natomiast wskaźnik PPD stanowi prognozę liczby osób odczuwających **brak komfortu cieplnego**.

Ze względu na to, że komfort termiczny, obok hałasu i wystroju wnętrza, decyduje o warunkach panujących w pomieszczeniu, w pracy wykonano szczegółową analizę tego właśnie parametru.

Charakterystyka budynków poddanych analizie

Budynek nr 1 powstał w latach 50. XX w. w technologii tradycyjnej jako dwukondygnacyjny i całkowicie podpiwniczony. W 2012 r. wykonano **termomodernizację**.

Mury zewnętrzne wykonano z cegły pełnej gr. 38 cm. Mury zewnętrzne w poziomie kondygnacji nadziemnych ocieplono w technologii ETICS z zastosowaniem polistyrenu ekspandowanego (styropianu) FS-20 gr. 15 cm. Więźbę dachową całkowicie przebudowano podczas termomodernizacji. Dach wykonano jako drewniany stromy, wielospadowy, o konstrukcji jętkowej.

Dokumentacja projektowa przewidywała następujący układ warstw stropu nad I piętrzem (od góry):

- folia zbrojona paroprzepuszczalna,
- wełna mineralna gr. 24 cm,
- folia paroprzepuszczalna,
- drewniane belki stropowe 10×24 cm,
- podsufitka drewniana gr. 1,5 cm,
- sufit podwieszany gipsowo-kartonowy na ruszcie stalowym.

Dach drewniany stromy zaprojektowano dla następującego układu warstw (od góry): dachówka, łąty 4,0×5,0 cm, kontrłąty 2,5×5,0 cm, krokwie 8×14 cm, folia dachowa zbrojona (**RYS. 1–2**). Budynek wyposażony był w system wentylacji grawitacyjnej.

Ze względu na to, że budynek posiada dwie kondygnacje nadziemne i jedną podziemną, w celu uproszczenia, badania wykonano dla dwóch pomieszczeń: kuchni i salonu. Pomieszczenia wybrane do analizy - kuchnia i salon - stanowiły samodzielną część użytkową, tzn. występował w ich obszarze wlot i wylot powietrza wentylacyjnego. Były szczelnie oddzielone od pozostałych pomieszczeń i stanowiły główną funkcję użytkową w budynku.

Budynek nr 2 zrealizowany został jako czterokondygnacyjny, całkowicie podpiwniczony, w technologii tradycyjnej udoskonalonej. Wybudowano go w latach 2010–2012.

Mury zewnętrzne zaprojektowano z bloków wapienno-piaskowych 6NFD W+W klasy 15 gr. 25 cm, a stropy międzykondygnacyjne - jako masywne, żelbetowe gr. 20 cm. Ocieplenie murów zewnętrznych w poziomie kondygnacji nadziemnych zaprojektowano w technologii ETICS z zastosowaniem polistyrenu ekspandowanego (styropianu) FS-20 gr. 14 cm.

Więźbę dachową zaprojektowano jako dach drewniany stromy, wielospadowy o konstrukcji jętkowej.

Dokumentacja projektowa przewidywała następujący układ warstw stropu nad III piętrzem (od góry):

- folia zbrojona paroprzepuszczalna,
- wełna szklana gr. 24 cm,
- folia paroprzepuszczalna,
- strop żelbetowy gr. 18 cm,
- tynk gipsowy maszynowy gr. 1 cm.

Dach drewniany stromy zaprojektowano dla następującego układu warstw (od góry):

- blachodachówka, łąty 5,0×6,0 cm,
- kontrłąty 2,5×5,0 cm,
- krokwie 8×16 cm,
- folia dachowa zbrojona o niskiej paroprzepuszczalności (**RYS. 3**).





RYS. 3. Szkic mieszkania w budynku nr 2; rys. autorów.

Budynek wyposażony był w system **wentylacji** naturalnej (grawitacyjnej), który został zaprojektowany i wykonany zgodnie z obowiązującymi przepisami i normami [5], [6].

Przewody wentylacji grawitacyjnej zaprojektowano i wykonano z pustaków ceramicznych 19×19 cm o przekroju przewodu $\varnothing 15$ cm, które zostały obmurowane ścianami gr. 8 cm z kształtki ściennej silikatowej klasy 7,5 na zaprawie cementowo-wapiennej.

Powyżej ostatniej kondygnacji, w części wyprowadzonej ponad połac dachową, wszystkie przewody obmurowane zostały ścianami gr. 12 cm z cegły silikatowej pełnej klasy 7,5, murowane na zaprawie cementowo-wapiennej.

Komfort termiczny jako wskaźnik standardu eksploatacyjnego budynku

Wraz z rozwojem elementów centralnego ogrzewania rozwijało się pojęcie "komfortu cieplnego".

Dopiero w 1970 r. powstały trzy najważniejsze modele [7]:

- model dwuwęzłowy zaproponowany przez Gagge,
- model PMV zaproponowany przez Fanger,
- model wielowęzłowy zaproponowany przez Stolwijk.

Określają one komfort cieplny osób przebywających w pomieszczeniu.

Najbardziej rozpowszechnionym modelem jest model PMV zaproponowany przez Fanger [8]. Badacz ten stwierdził, że wymagania zapewnienia poczucia komfortu cieplnego w pomieszczeniu stawiane inżynierom wentylacji, klimatyzacji i ogrzewnictwa, jest niemożliwe do zrealizowania, ponieważ samo poczucie komfortu jest już pojęciem względnym i trudnym do opisanie. Zaproponował, aby subiektywne odczucia użytkownika określić za pomocą wskaźnika, który nazwał PMV (*Predicted Mean Vote*).

Wskaźnik PMV służy do określenia oceny środowiska wewnętrznego według 7-stopniowej skali wrażeń cieplnych określonych jako:

- gorąco (+3),
- ciepło (+2),
- lekko ciepło (+1),
- neutralnie (0),
- lekko chłodno (-1),

- chłodno (-2),
- zimno (-3) [9].

Wybór okresu pomiarowego został dokonany zgodnie z zaleceniami, czyli pomiary powinno się wykonywać w okresie odpowiadającym maksymalnemu obciążeniu termicznemu:

- środowisko gorące w lecie,
- środowisko zimne w zimie.

Indeks PMV ma zastosowanie w przypadku spełnienia następujących warunków [10]:

- temperatura powietrza w analizowanym pomieszczeniu t_a : 10-30°C,
- średnia temperatura promieniowania przegród (np. ściany zewnętrzne, stropy, okna) w pomieszczeniu t_{MR} : 10-40°C,
- prędkość powietrza w pomieszczeniu V : 0-1 m/s,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu p_a : 0-2700 Pa,
- wydatek energetyczny osób przebywających w tym pomieszczeniu M : 0,8-4,0 met (46,6-232,8 W/m²),
- izolacyjność termiczna odzieży osób przebywających w tym pomieszczeniu I_{cl} : 0-2 clo.

Formuła obliczeniowa modelu bazuje na zjawisku równowagi termicznej ludzkiego ciała. Do równowagi tej dochodzi wówczas, gdy wielkość ciepła produkowanego wewnątrz ciała jest równa wielkości ciepła oddawanego do otoczenia. Pełne równanie pozwalające określić wskaźnik (PMV) wygląda następująco [11]:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,038] \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5876 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{MR} + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

gdzie:

M – poziom metabolizmu, który należy oszacować na podstawie aktywności osób przebywających w pomieszczeniu,

W – praca zewnętrzna (zazwyczaj = 0) [W/m²],

I_{cl} – izolacyjność termiczna odzieży [(m²·K)/W],

p_a – cząstkowe ciśnienie pary wodnej [Pa],

t_a – temperatura powietrza [°C],

t_{MR} – średnia temperatura promieniowania (MRT) [°C],

t_{cl} – średnia temperatura powierzchni ciała ludzkiego okrytej odzieżą [°C],

f_{cl} – stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego [-],

h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję [W/(m²·K)].

Średnia temperatura powierzchni ciała ludzkiego okrytej odzieżą wyznaczana jest iteracyjnie:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{MR} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

gdzie h_c jest określone przez:

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{V_{ar}} \\ 12,1\sqrt{V_{ar}} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{V_{ar}} \end{cases}$$

V_{ar} , czyli względna prędkość powietrza, mieści się w przedziale od 0 [m/s] do 1 [m/s], natomiast f_{cl} , czyli stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego jest określony następującą formułą:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0,078 \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,078 \end{cases}$$

Ze względu na indywidualne przyzwyczajenia oraz różnice osobnicze nie jest możliwe, aby stworzyć taki mikroklimat, który byłby satysfakcjonujący dla każdego. Jedynym rozwiązaniem jest minimalizowanie liczby osób niezadowolonych.

Wskaźnikiem, który to określa, jest drugi znany wskaźnik zaproponowanym przez Fangera w 1974 r. – PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*).

Wskaźnik ten stanowi prognozę liczby osób odczuwających brak komfortu cieplnego, czyli jest to przewidywany odsetek niezadowolonych z warunków cieplnych panujących w pomieszczeniu. Jest on możliwy do obliczenia dopiero po określeniu wskaźnika PMV.

Z badań [12] wynika, że środowisko komfortowe pod względem mikroklimatu uznawane jest za odpowiednie, jeżeli zawiera się w przedziale $-0,5 < PMV < 0,5$, co odpowiada $PPD < 10\%$.

Przewidywalny odsetek osób niezadowolonych określa się wzorem [13]:

$$PPD = 100 - 95e^{(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)}$$

Opis aparatury pomiarowej komfortu termicznego

Do wykonania pomiarów zastosowano system pomiarowy z czujnikami posiadającymi potwierdzone właściwości metrologiczne [14]. Jako jednostkę centralną akwizycji danych zastosowano komputer PC podłączony do rejestratora danych pomiarowych złożonego z koncentratora i lokalnego modułu akwizycji danych. Do badań klimatu wewnętrznego wykorzystano termohigrometr, czujnik przepływu powietrza oraz czujnik ciśnienia powietrza wewnętrznego.

W **TABELI** zamieszczono szczegóły techniczne zastosowanych czujników. Pomiaru wykonywano dla budynku nr 1 przez 7 dni, a dla budynku nr 2 przez 13 dni. Oba pomiary wykonane były w okresie grzewczym z częstotliwością próbkowania 60 s. Oceny **komfortu termicznego** w budynku dokonano w oparciu o wartości parametrów wejściowych: $M = 1$ [met], $I_{cl} = 0,6$ [clo].



Funkcja czujnika	Oznaczenie	Przedział pomiaru	Niepewność pomiaru
Pomiar prędkości przepływu powietrza	LB-801C	0 m/s do 50 m/s -40°C do 70°C	±0,05 m/s ±0,1°C
Pomiar prędkości przepływu powietrza	LB-801A	0,05 m/s do 10 m/s	±0,05 m/s
Pomiar wilgotności i temperatury H, t_a	LB-710R	-40°C do 85°C 10% do 90%	±0,1°C ±2,0%
Pomiar ciśnienia p_a	LB-471P	0,1 kPa do 120 kPa	±0,1 kPa

TABELA. Parametry czujników pomiarowych

Analiza wyników pomiarów komfortu termicznego

Warunek równowagi cieplnej organizmu jest uzależniony od wielu czynników. Do najważniejszych można zaliczyć:

- czynniki środowiskowe, czyli temperaturę i prędkość powietrza, wilgotność względną powietrza, rozkład temperatury w pomieszczeniu oraz temperaturę promieniowania powierzchni,
- czynniki indywidualne, takie jak izolacyjność cieplna odzieży, metabolizm oraz aklimatyzacja.

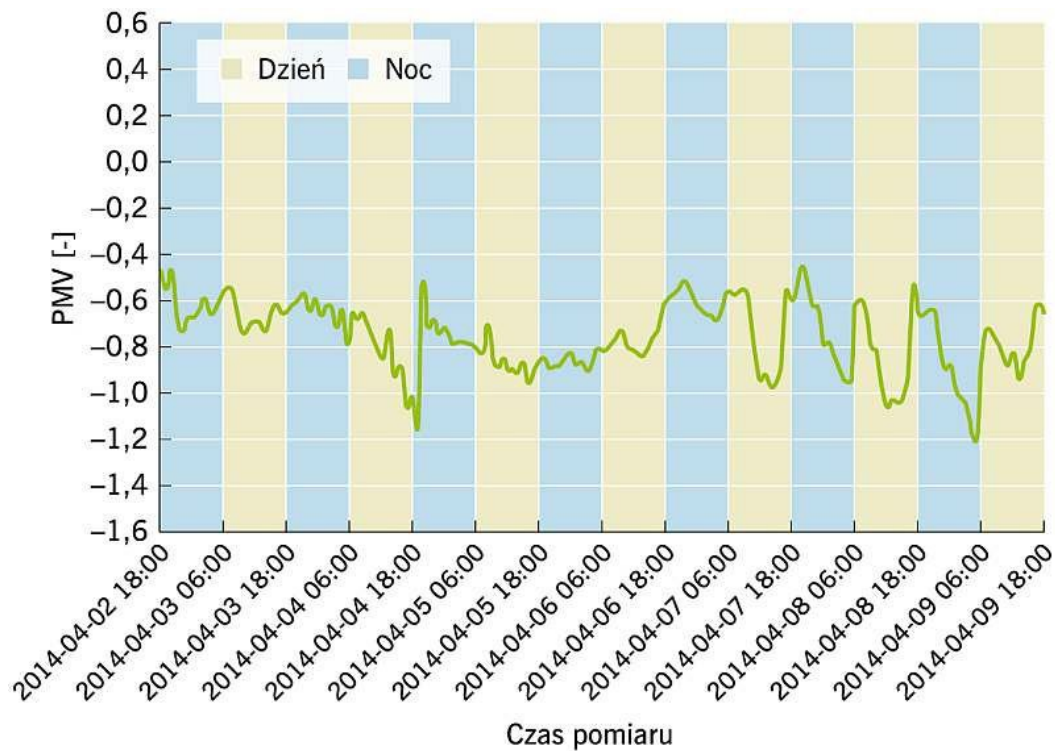
Każdy z wymienionych czynników został szczegółowo opisany w pracy "Określenie warunków komfortu termicznego w pomieszczeniach za pomocą wskaźników PMV i PPD" [15].

Analizę wyników sporządzono w oparciu o ciągłe długoterminowe pomiary czynników środowiskowych.

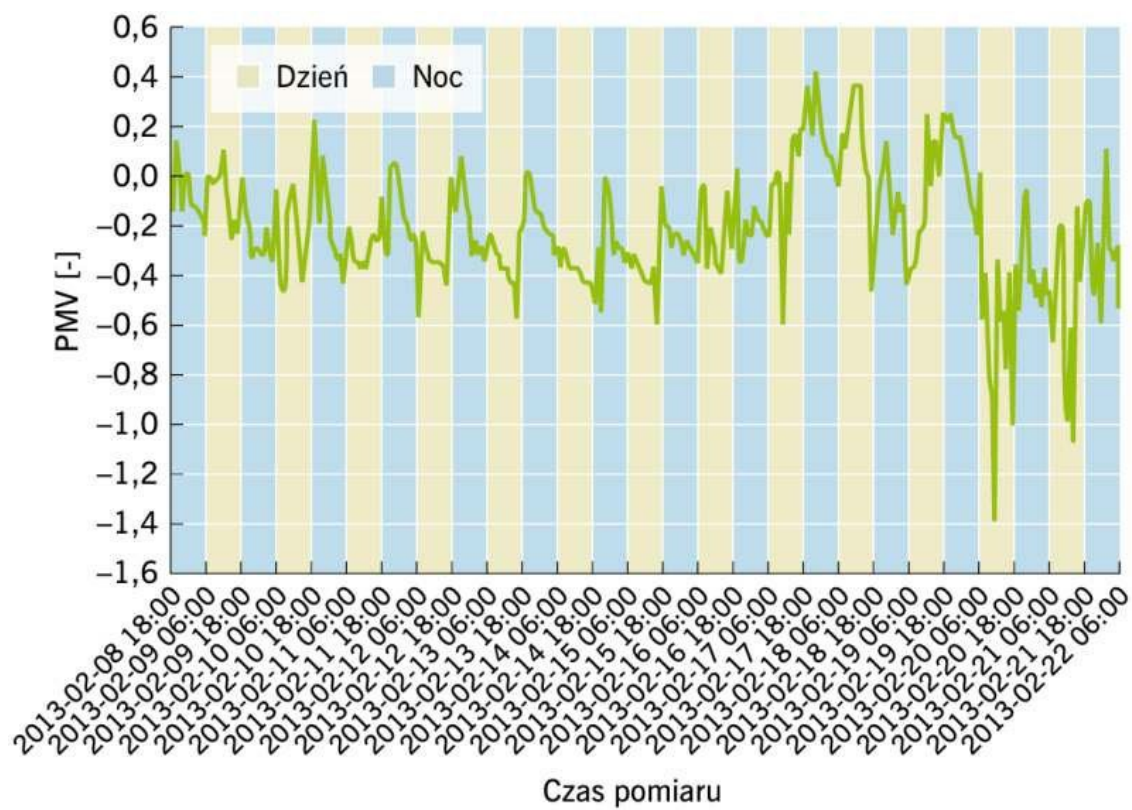
Na **RYS. 4** przedstawiono wynik PMV w budynku nr 1.

Z analizy wynika, że przez 95% czasu występowało środowisko niekomfortowe. Najniższa wartość zmierzona PMV wynosiła -1,20. Tak niska wartość **wskaźnika PMV** świadczy o uciążliwych warunkach termicznych w badanym pomieszczeniu. Średnia wartość wskaźnika PMV w budynku nr 1 wynosiła - 0,72 i była to wartość definiowana jako zbliżona do komfortowych warunków termicznych.

Na **RYS. 5** przedstawiono wyniki PMV wykonane dla budynku nr 2.



RYS. 4. Przewidywana ocena średnia PMV dla budynku nr 1; rys. autorów.



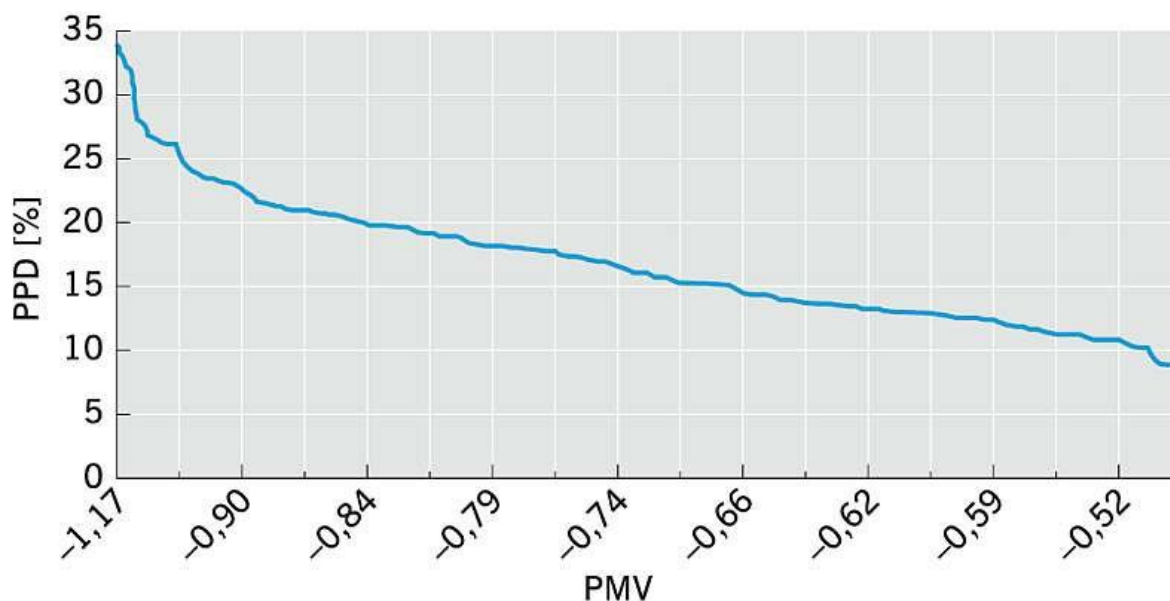
RYS. 5. Przewidywana oceny średnia PMV dla budynku nr 2; rys. autorów.



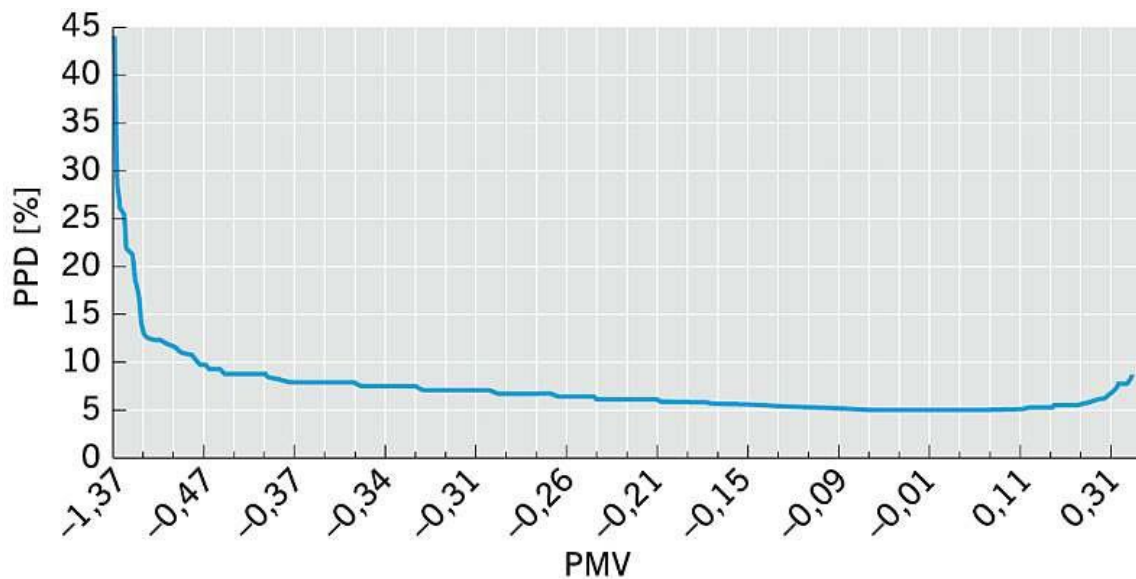
Z analizy wynika, że przez 83% czasu pomiaru w pomieszczeniu panowały komfortowe warunki termiczne. Najniższy pomiar PMV wynosił $-1,40$ i wystąpił incydentalnie. Średnia wartość wskaźnika PMV w budynku nr 2 wynosiła $-0,21$ i była to wartość mieszcząca się w granicach komfortowych warunków termicznych.

Na podstawie wykresu przedstawionego na [RYS. 6](#) można stwierdzić, że warunki termiczne, które podczas pomiarów panowały w budynku nr 1, były komfortowe zaledwie przez 22% czasu. Widać, że duża ilość osób przebywających w budynku nr 1 opisywałaby swoje wrażenia cieplne jako chłodne bądź dość chłodne.

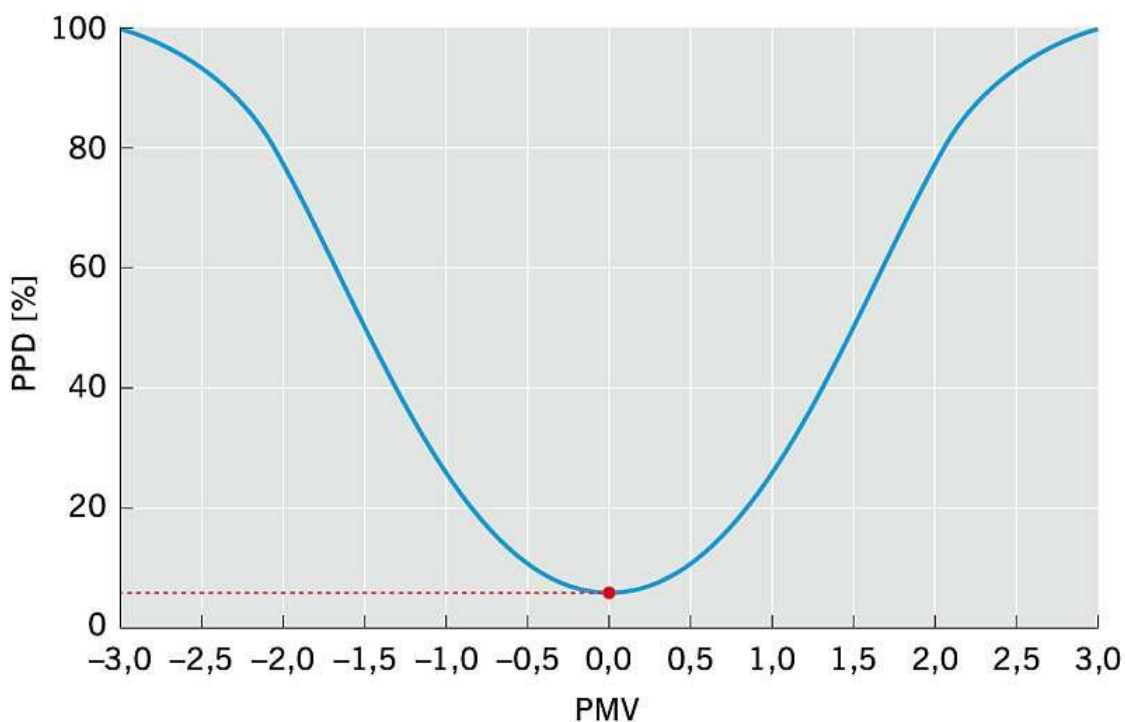
Na podstawie otrzymanych wyników z pomiarów w budynku nr 2 można stwierdzić, że warunki byłyby komfortowe dla prawie 90% osób przebywających w takim pomieszczeniu ([RYS. 7](#)). Podczas badań w budynku nr 2 zaobserwowano chwilowy spadek komfortu, na co wskazuje ok. 45% osób, które opisałyby swoje wrażenia cieplne jako chłodne ([RYS. 7](#)). Uzyskane wartości odpowiadają wynikom normowym [16] ([RYS. 8](#)).



RYS. 6. Przewidywana ocena średnia PMV i przewidywana liczba osób odczuwających brak komfortu cieplnego PPD w budynku nr 1; rys. autorów.



RYS. 7. Przewidywana ocena średnia PMV i przewidywana liczba osób odczuwających brak komfortu cieplnego PPD w budynku nr 2; rys. autorów.



RYS. 8. Zależność między przewidywaną oceną średnią PMV a przewidywaną liczbą osób odczuwających brak komfortu cieplnego PPD.

Wnioski

Na skutek różnic wynikających z upodobań mieszkańców nie jest możliwe zapewnienie **komfortu cieplnego** na jednakowym poziomie dla wszystkich osób przebywających w danym pomieszczeniu. W związku z tym 10% osób, które zawsze będą niezadowolone z warunków termicznych panujących w pomieszczeniu, informuje nas o komfortowych warunkach cieplnych.

Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły stwierdzić, że warunki termiczne panujące w budynku nr 2 byłyby niekomfortowe zaledwie przez 17% czasu pomiaru, a warunki termiczne panujące w budynku nr 1 zapewniały komfort tylko przez 5% czasu pomiarowego.

Przyczyną braku komfortu mogło być niepożądane nagrzanie lub nadmierne ochłodzenie określonej części ciała. Taka sytuacja może być spowodowana przez zbyt dużą prędkość przepływu powietrza (przeciąg), zbyt dużą różnicę temperatury powietrza między głową a stopami (kostkami nóg), przez zbyt gorącą lub zimną podłogę albo też przez zbyt dużą asymetrię promieniowania.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w obu mieszkaniach dyskomfort spowodowany był nadmiarem chłodu. Przyczyną nadmiernego ochłodzenia była prawdopodobnie zbyt duża prędkość powietrza wpływającego do pomieszczeń z zewnątrz (badania obu przypadków prowadzone były zimą – temperatura powietrza osiągała wartość bliską 0°C).

Negatywny wpływ na wyniki komfortu miał również sam system **wentylacji naturalnej (grawitacyjnej)**. Wentylacja grawitacyjna wykazuje najwyższą sprawność zimą, a to wiąże się z możliwością wychładzania pomieszczeń.

Literatura

1. C.A. Balaras, K. Drousta, E. Dascalaki, S. Kontoyiannidis, "Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings", "Energy and Buildings", nr 37/2005, s. 429-442.
2. K. Arendt, M. Krzaczek, R. Antczak, J. Tejchman, "Wpływ systemu ogrzewania na zużycie energii i koszty eksploatacyjne budynku", "Przegląd Budowlany", nr 4/2015.
3. Nemry and Uihlein, 2008. Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings. (IMPRO Building), JRC EC, 2008.
4. PE International, 2012, Topical Paper 2: Strategies for decoupling – options to consider in the field of buildings and infrastructure.
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinno odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU nr 1157 z dnia 15 czerwca 2002 r. wraz z późn. zm.).
6. PN-B-03430:1983 (wraz z późn. zm.), "Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania".
7. A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi, "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response", „ASHRAE Transactions", nr 77/1971, Part 1, s. 247-262.
8. B.W. Jones, "Capabilities and limitations of thermal models for use in thermal comfort standards", "Energy and Buildings", nr 34/2002.
9. M. Fountain, C. Huizenga, "A thermal sensation model for use by the engineering profession, Results of Cooperative Research Between ASHRAE and Environmental Analytics", ASHRAE RP-781 Final Report, Piedmont 1995.
10. A. Marszałek, K. Sołtyński, "Człowiek w warunkach obciążenia termicznego", CIOP-PIB, Warszawa 2001.
11. ISO 7730:2005, "Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria", International Organization for Standardization, Geneva 2005.

12. M.A. Humphreys, J.F. Nicol, I.A. Raja, "Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach", "Journal of Advances on Building Energy Research" 2007, 1:55-88.
13. P.O. Fanger, O. Östberg, A.G. McK. Nicholl, N.O. Breum, E. Jerking, "Thermal Comfort Conditions during Day and Night, European Journal of Applied Physiology", 33/1974, s. 255-263.
14. ISO-IEC 17025, "Ogólne wymagania dotyczące laboratoriów badawczych i wzorcujących".
15. I. Sudoł-Szopińska, A. Chojnacka, „Określenie warunków komfortu termicznego w pomieszczeniach za pomocą wskaźników PMV i PPD", "Bezpieczeństwo Pracy", nr 5/2007.
16. PN-EN ISO 7730:2006(U), "Ergonomia. Środowisko termiczne umiarkowane. Analityczne wyznaczenie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźnika PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego".
17. R. Antczak-Jarząbska, M. Niedostatkiewicz, "Wpływ izolacji termicznej dachu na poprawny kierunek przepływu powietrza w wentylacji naturalnej", "Dachy", nr 10/2015, s. 16-19.
18. R. Antczak-Jarząbska, M. Niedostatkiewicz, "Badania termowizyjne ciągu wentylacyjnego w budynku mieszkalnym z poddaszem nieużytkowym", "Dachy" nr 1/2016, s. 8-12.