

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marta Chludzińska

**Komfort cieplny człowieka
w warunkach
wentylacji indywidualnej
w pomieszczeniach biurowych**

**WARSZAWA
2010**

725.1:005.91/ 697:628.87:043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marta Chludzińska

**Komfort cieplny człowieka w warunkach wentylacji indywidualnej w
pomieszczeniach biurowych**

Promotor

Prof. dr hab. inż. Bogdan Mizieliński

Warszawa, 2010

L57



BG105/295-01

*Pragnę serdecznie podziękować mojemu Promotorowi
Panu Profesorowi Bogdanowi Mizielińskiemu za
nieocenioną pomoc, wyrozumiałość i wsparcie.*

*Podziękowania należą się również dr inż. Annie Bogdan
za zaangażowanie i pomoc, które pozwoliły mi zrealizować
niniejszą pracę.*

Marta Chludzińska

Streszczenie

Zadaniem wentylacji i klimatyzacji jest zapewnienie użytkownikom pomieszczeń poczucia komfortu, czyli zadowolenia z warunków panujących w pomieszczeniu. W wentylacji mieszającej powstałe jednorodne środowisko nie stwarza warunków, które byłyby akceptowane przez wszystkich użytkowników pomieszczenia, natomiast zastosowanie wentylacji wyporowej może powodować u użytkowników odczucie lokalnego dyskomfortu cieplnego, spowodowane przeciągiem czy też pionowym gradientem temperatury. Idealnym rozwiązaniem może być zatem stosowanie indywidualnego systemu regulacji. W warunkach biurowych proces ten można realizować poprzez umieszczanie nawiewników (z możliwością regulowania kierunku nawiewu oraz ilości powietrza) w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca pracy np. w biurku. Przy uwzględnieniu indywidualnego nawiewu świeżego powietrza z osobistą kontrolą temperatury i prędkości powietrza, możliwe jest uzyskanie satysfakcji każdego użytkownika pomieszczenia. Rozwiązanie to jest szczególnie istotne w pomieszczeniach, w których pracuje duża grupa osób (np. pomieszczenia typu 'open – space').

Celem pracy było zbadanie wpływu kierunku napływu świeżego oraz różnicy temperatury między powietrzem nawiewanym a powietrzem w pomieszczeniu na odczucie lokalnego komfortu cieplnego użytkowników tego systemu. Pracę zrealizowano w laboratorium CIOP-PIB, gdzie przeprowadzono badania z udziałem 20 ochotników (mężczyzn w wieku 20 – 25 lat) oraz z wykorzystaniem 16-segmentowego manekina termicznego. Pomiary prowadzono w komorze klimatycznej przy specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym. Metodyka badań miała na celu określenie komfortu użytkowników przy jednoczesnym zapewnieniu stałej, higienicznej ilości powietrza świeżego i zakładała utrzymanie stałego wydatku powietrza w ilości $72 \text{ m}^3/\text{h}$ (20 l/s). Sposób ustalenia parametrów nawiewu, przy których odczuwalne warunki cieplne będą komfortowe, zakładał analizę kwestionariuszy zawierających subiektywną ocenę wrażeń cieplnych ochotników biorących udział w badaniach oraz pomiar wartości temperatury na powierzchni manekina termicznego.

Przeprowadzone badania stały się podstawą do opracowania wytycznych pomocnych przy określaniu parametrów powietrza, które będą zapewniały największą efektywność wykonywanej pracy oraz optymalne (komfortowe) warunki cieplnych środowiska pracy. Ustalenie korelacji pomiędzy tymi parametrami umożliwiło wyznaczenie zakresu wartości zapewniających odczucie komfortu.

Abstract

The principal purpose of ventilation and air conditioning is to ensure comfort to a room occupants, i.e. satisfaction with indoor conditions. In mixing ventilation homogeneous environment that is produced does not create conditions that would be acceptable by all occupants of a room whereas the use of displacement ventilation may be the cause of local thermal discomfort experienced by occupants due to a draft or a vertical temperature gradient. Therefore, the use of an individual regulation system which makes it possible to ensure thermal comfort to all persons occupying a given room seems to be an ideal solution.

In office conditions this process may be implemented by means of air devices (which can adjust the direction and amount of supplied air) in the immediate vicinity of workplace, e.g. on the desk. With the supply of fresh air with personalized control of temperature and air velocity, it is possible to achieve satisfaction for each user of the room. Such a solution is especially important in the rooms where larger numbers of users work (e.g. 'open – space' offices).

In order to determine the influence of direction fresh air inflow and differences in temperatures between supply and indoor air onto the local thermal comfort experienced by the CIOP-PIB laboratory workers tests were carried out. In research participated 20 volunteers (males in academic age) and were made on the 16-segment thermal manikin. All research took place in a climatic chamber at the specially designed testing stand. The testing methodology aimed to determine the user's comfort ensuring, at the same time, the minimum of hygienic amount of fresh air. It also assumed maintaining permanent air flow in the amount of $72 \text{ m}^3/\text{h}$ (20 l/s).

In order to determine supply air parameters at which perceptible thermal conditions are at a comfort level, all volunteers filled in a questionnaire about subjective thermal sensations and temperature values were measured at the surface of a thermal manikin.

Presented tests provide a basis for the development of guidelines to determine the air parameters, which will ensure greater efficiency of work and optimum (comfortable) thermal conditions of working environment. Establishment of relations between these parameters made it possible to determine a range of values ensuring comfortable perception.

SPIS TREŚCI:

1. WPROWADZENIE.....	11
2. CEL I ZAKRES PRACY	14
3. KOMFORT CIEPLNY CZŁOWIEKA.....	15
3.1. PODSTAWOWE INFORMACJE	15
3.2. SPOSOBY OKREŚLANIA I POMIARU KOMFORTU TERMICZNEGO CZŁOWIEKA.....	24
3.3. STOSOWANE SKALE POMIARU KOMFORTU TERMICZNEGO.....	32
<i>Skala Bedford'a</i>	<i>32</i>
<i>Skala odczuć cieplnych wg ASHRAE</i>	<i>33</i>
<i>Przewidywana średnia ocena komfortu (PMV).....</i>	<i>34</i>
<i>Ocena subiektywnego odczucia komfortu</i>	<i>36</i>
<i>Ocena lokalnego dyskomfortu cieplnego.....</i>	<i>37</i>
4. WENTYLACJA INDYWIDUALNA W TWORZENIU MIKROKLIMATU OTOCZENIA CZŁOWIEKA	39
5. BADANIA EKSPERYMENTALNE.....	61
5.1. STANOWISKO BADAWCZE.....	61
5.2. APARATURA SYMULACYJNA I POMIAROWA STOSOWANA W BADANIACH.....	64
5.3. CHARAKTERYSTYKA NAWIEWANEGO STRUMIENIA POWIETRZA	71
5.4. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH OSÓB.....	78
5.5. METODYKA BADAŃ.....	78
<i>Badania z wykorzystaniem manekina termicznego</i>	<i>78</i>
<i>Badania z udziałem ochotników</i>	<i>79</i>
6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	84
6.1. WARIANTY Z WYKORZYSTANIEM MANEKINA TERMICZNEGO.....	84
<i>Wpływ wentylacji indywidualnej na wartość t_{eq} dla nagiego manekina w warunkach zimowych i letnich.</i>	<i>85</i>

<i>Wpływ wentylacji indywidualnej na wartość t_{eq} dla ubranego manekina w warunkach zimowych.</i>	90
<i>Wpływ wentylacji indywidualnej na wartość t_{eq} dla ubranego manekina w warunkach letnich.</i>	93
6.2. WARIANTY Z UDZIAŁEM OCHOTNIKÓW	95
<i>Wpływ wentylacji indywidualnej na odczucia cieplne człowieka w warunkach zimowych.</i>	95
<i>Wpływ wentylacji indywidualnej na odczucia cieplne człowieka w warunkach letnich. ...</i>	102
6.3. KLASYFIKACJA ODCZUĆ CIEPLNYCH WG STREF KOMFORTU NILSSON'A	109
7. WYZNACZENIE ZMIENNOŚCI ODCZUĆ CIEPLNYCH W ZALEŻNOŚCI OD TEMPERATURY OTOCZENIA ORAZ TEMPERATURY NAWIEWU I KIERUNKU NAWIEWANEGO POWIETRZA PRZEZ SYSTEM PV.	116
<i>Zmienność odczuć cieplnych całego ciała w zależności od t_{eq} w warunkach zimowych....</i>	118
<i>Zmienność odczuć cieplnych całego ciała w zależności od t_{eq} w warunkach letnich.....</i>	119
<i>Zmienność odczuć cieplnych poszczególnych części ciała w zależności od t_{eq} w warunkach letnich.</i>	121
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	132
9. BIBLIOGRAFIA	135
10. ZAŁĄCZNIKI	147

OZNACZENIA

- φ – wilgotność względna powietrza, [%],
- a – współczynnik kierunkowy,
- b – współrzędna punkty przecięcia z osią Oy,
- ET – temperatura efektywna, [°C],
- f – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu, [mm Hg],
- f_{cl} – stosunek pola powierzchni ciała pokrytego odzieżą do pola powierzchni ciała nie pokrytego odzieżą (współczynnik powierzchni pokrytej odzieżą) [-],
- h_c – współczynnik przejmowania ciepła [W/m²/K],
- I_{cl} – izolacja cieplna odzieży, [m²K/W],
- M – wartość metabolizmu [W/m²],
- p_a – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, [Pa],
- R^2 – współczynnik korelacji liniowej [-],
- Q – ilość ciepła wewnętrznego wytwarzanego podczas metabolizmu odniesiona do 1 m² powierzchni ciała, [W/m²],
- Q_d – straty ciepła na skutek dyfuzji pary wodnej przez skórę, odniesiona do 1 m² powierzchni ciała, [W/m²],
- Q_K – straty ciepła na drodze konwekcji z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, odniesiona do 1 m² powierzchni ciała, [W/m²],
- Q_{oj} – straty ciepła jawnego podczas oddychania, odniesiona do 1 m² powierzchni ciała, [W/m²],
- Q_{ou} – straty ciepła utajonego podczas oddychania, odniesiona do 1 m² powierzchni ciała, [W/m²],
- Q_p – ilość ciepła przenikającego z powierzchni skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, odniesiona do 1 m² powierzchni ciała, [W/m²],

- Q_R – straty ciepła przez promieniowanie z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
- q_T – moc cieplna dostarczana do manekina pracującego w trybie "comfort", $[\text{W}/\text{m}^2]$,
- Q_w – straty ciepła na skutek odparowania potu z powierzchni skóry, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
- S – ocena odczuć cieplnych według skali Bedford'a, [-],
- t_a – temperatura powietrza otaczającego, $[\text{°C}$ lub °F (w zależności od równania)],
- t_{cl} – średnia temperatura powierzchni ciała ludzkiego okrytej odzieżą $[\text{°C}]$,
- t_{eq} – wartość temperatury ekwiwalentnej $[\text{°C}]$,
- t_r – średnia wartość temperatura promieniowania $[\text{°C}]$,
- t_s – temperatura powierzchni manekina, $[\text{°C}]$,
- t_w – średnia temperatura otoczenia (przegrody budowlane itp.), $[\text{°F}]$,
- W – ilość ciepła wytwarzana przez organizm, $[\text{W}/\text{m}^2]$,
- w – prędkość powietrza, $[\text{m}/\text{s}$ lub Ft/min (w zależności od równania)].

1. WPROWADZENIE

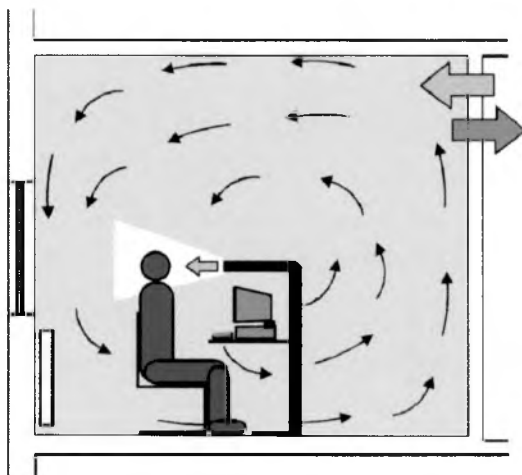
Budynek umożliwia wydzielenie z zewnętrznego otoczenia pewnej ograniczonej przestrzeni, w której przy pomocy różnych urządzeń można kontrolować parametry powietrza dążąc do optymalizacji warunki środowiska. Tworzenie określonego mikroklimatu w pomieszczeniach służy uzyskaniu takich warunków cieplnych, w których każdy obecny w pomieszczeniu człowiek odnosiłby wrażenie komfortu cieplnego [2, 36, 103]. Zapewnienie ludziom poczucia komfortu cieplnego poprzez regulację odpowiednich parametrów środowiska wewnętrznego przekłada się, m. in. na poprawę samopoczucia, zmniejszenie liczby popełnianych błędów, oraz wysoką wydajności pracy [1, 36, 110]. Dotychczasowe rozwiązania wentylacji (mieszająca i wporowa) dążą do utrzymania w pomieszczeniach środowiska komfortowego dla wszystkich użytkowników pomieszczeń.

Wentylacja indywidualna (PV z ang. *personalized ventilation*) definiowana jest jako system, który pozwala kształtować parametry powietrza w lokalnych strefach pomieszczenia (np. wokół miejsca pracy) i jest indywidualnie regulowany przez każdego użytkownika. W praktyce przekłada się to na instalowanie nawiewników w najbliższym otoczeniu człowieka najczęściej w liczbie równej liczbie pracowników - w pozostałej strefie pomieszczenia za środowisko odpowiada wentylacja ogólna, mieszająca lub wporowa, która projektowana jest dla utrzymania akceptowalnych dla użytkowników warunków środowiska wewnętrznego (rys.1.1.).

Pierwsze układy wentylacji indywidualnej bazowały na rozwiązaniach wykorzystujących nawiewniki podłogowe. Stosowano je głównie w obiektach w Afryce Południowej i Europie (1990 r.). W układach tych powietrze transportowane było w przestrzeni podwójnej podłogi za pomocą lokalnych wentylatorów o zmiennej wydajności, a następnie nawiewane do pomieszczenia przez elementy zainstalowane w płytach podłogowych. Rozwiązanie takie jednak nie przekładało się na wysoką jakość powietrza dopływającego do strefy oddychania (co jest główną zaletą PV), brakowało również możliwości lokalnego sterowania temperaturą nawiewanego powietrza. W kolejnych latach opracowano metody dostarczania czystego powietrza do strefy oddychania użytkowników za pomocą nawiewników umieszczanych przy biurku lub siedzisku użytkownika, jednocześnie wprowadzając elementy umożliwiające regulację kierunku napływu powietrza [23].

Podstawową zaletą wentylacji indywidualnej jest zwiększenie efektywności wentylacji i zapewnienie czystego środowiska w najbliższym otoczeniu człowieka. W pomieszczeniach

zamkniętych, w których są spełnione normy higieniczne odnośnie ilości świeżego powietrza, użytkownicy często odczuwają dyskomfort wynikający z nieprzyjemnych zapachów, lub też są narażeni na rozprzestrzenianie wirusów i bakterii pochodzących od współpracowników.



Rys.1.1.1. Idea działania wentylacji indywidualnej [86].

Fig.1.1.1. Principle of personalized supply air systems [86].

Dostarczanie świeżego, niezanieczyszczonego powietrza bezpośrednio do strefy oddychania każdego człowieka wpływa na jego komfort i zdrowie, co może przełożyć się również na efektywność jego pracy. Ponadto wraz z możliwością indywidualnego sterowania parametrami powietrza w otoczeniu zwiększa się komfort cieplny każdego z użytkowników. W pomieszczeniach biurowych, gdzie praca wykonywana jest z niską aktywnością fizyczną nawet niewielkie wahania parametrów powietrza mogą wpłynąć na dyskomfort pracowników. Samodzielne dopasowanie własności nawiewanego powietrza do wartości metabolizmu i izolacyjności zastosowanej odzieży pozwoli usatysfakcjonować każdego pracownika i osiągnąć wartość wskaźnika PPD (przewidywany odsetek niezadowolonych) bliski zeru, podczas gdy obecne standardy określają jako środowisko komfortowe, warunki w których nie mniej niż 90% użytkowników jest stanie neutralnym ($PMV=0$) [90, 28].

Zaletą, która jest szczególnie istotna pod kątem dyrektywy EPBD, jest redukcja zużycia energii do eksploatacji budynku. Dostarczanie świeżego powietrza w ilości niezbędnej dla procesu oddychania człowieka jest znacznie niższe od wartości określonych normatywnie, zatem zmniejszenie ilości powietrza może przełożyć się na zmniejszenie niezbędnej ilości energii przeznaczonej na cele eksploatacji budynku przy jednoczesnym utrzymaniu na wysokim poziomie jakości powietrza w strefie przebywania pracownika. Wentylacja indywidualna jest również układem prostym w montażu, gdyż przewody ściennie są krótkie i łatwo dostępne do inspekcji i czyszczenia. Jednak w porównaniu z tradycyjnymi systemami niezbędne jest wykonanie dodatkowych przewodów doprowadzających powietrze do nawiewników instalowanych w strefie pracy np. przy biurku. Już na etapie projektu wskazane jest uwzględnienie tego typu instalacji, aby wkomponować ją w architekturę budynku. Wady układu PV wynikają głównie z niewielkiej ilości zrealizowanych projektów i fachowców doświadczonych w tego rodzaju realizacjach. W związku tym brakuje norm i innych dokumentów regulujących zalecenia projektowe i wykonawcze, a także niewielką liczbę urządzeń i gotowych rozwiązań projektowych, które można by było instalować w pomieszczeniach. Inwestorów zniechęcają szczególnie przewidywane wyższe koszty początkowe, gdyż zastosowanie lokalnych jednostek klimatyzacyjnych może być kosztowne. Z tego powodu należy w fazie projektowej rozpatrzyć, czy zredukowana (w stosunku do systemu klasycznego) liczba przewodów wentylacji ogólnej oraz wielkość urządzeń w centrali klimatyzacyjnej zbilansuje koszt wprowadzenia dodatkowych jednostek przy biurkowych [23].

Wyniki przeprowadzonych w ramach pracy badań stanowią podstawę do opracowania wytycznych pomocnych przy określeniu parametrów powietrza, pod kątem zapewnienia komfortu cieplnego, tym samym uniknięcia lokalnego dyskomfortu poszczególnych części ciała np. twarzy, rąk, stóp. Ustalenie zależności pomiędzy tymi parametrami pozwoli wyznaczyć zakres wartości zapewniających odczucie komfortu. Dodatkowo wyniki pomiarów będą stanowić wkład do dyskusji nt. racjonalizacji zużycia energii na potrzeby uzdatniania powietrza.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Teza: Temperatura powietrza nawiewanego przez system wentylacji indywidualnej oraz kierunek nawiewu tego powietrza wpływa na proces wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem i jego otoczeniem, a tym samym na odczucia cieplne człowieka.

Celem pracy jest zbadanie wpływu kierunku nawiewanego powietrza oraz różnicy temperatury pomiędzy powietrzem nawiewanym, a powietrzem w pomieszczeniu na odczucie lokalnego komfortu cieplnego użytkowników przebywających w pomieszczeniach biurowych oraz ustalenie optymalnej konfiguracji powyższych parametrów dla sezonu letniego i zimowego. Ustalenie korelacji pomiędzy tymi parametrami będzie stanowić podstawę określenia zakresu wartości temperatury zapewniającej odczucie komfortu.

Rozważania zmierzające do opracowania przedstawionych powyżej problemów zawarto 5 poniższych rozdziałach pracy. W rozdziale 3. – *Komfort cieplnym człowieka*, omówiono podstawowe zagadnienie związane z bilansem cieplnym pomiędzy człowiekiem a otoczenia, przedstawiono środowiskowe i indywidualne czynniki wpływające na odczucia cieplne oraz opisano wskaźniki i skale subiektywnych wrażeń cieplnych służących do oceny środowiska umiarkowanego. W rozdziale 4. – *Wentylacja indywidualna w tworzeniu mikroklimatu otoczenia człowieka*, przedstawiono dotychczasowe wyniki badań systemów wentylacji indywidualnej obejmujące zarówno zagadnienia związane z uczuciem komfortu, jak również związane z odczuwalną jakością powietrza oraz energochłonnością tego systemu w porównaniu z systemami wentylacji mieszającej i wyporowej. Rozdział 5. – *Badania eksperymentalne*, zawiera informacje na temat konstrukcji stanowiska badawczego, wykorzystanej aparatury badawczej, charakterystykę osób biorących udział w eksperymencie oraz opis sposobu przeprowadzenia serii pomiarowych. W rozdziale 6. – *Analiza wyników*, omówiono uzyskane wyniki pomiarów z wykorzystaniem manekina termicznego oraz badań subiektywnych odczuć cieplnych przeprowadzonych wśród ochotników. Rozdział 7. – *Podsumowanie i wnioski*, zawiera zestawienie uzyskanych w toku realizacji pracy doświadczeń i analiz, których rozwiązania uznano za istotne z punktu widzenia tematu pracy. Na końcu pracy zamieszczono wykaz literatury i załączniki.

3. KOMFORT CIEPLNY CZŁOWIEKA

3.1. PODSTAWOWE INFORMACJE

Zgodnie z opracowaniem ASHRAE 55 z 1992 roku [7] komfort cieplny określany jest jako stan zadowolenia z warunków cieplnych otoczenia.

Badania komfortu cieplnego oraz możliwości jego realizacji wymagają znajomości procesów termoregulacji organizmu oraz sposobu odbierania przez człowieka wrażeń cieplnych.

Zadaniem układu termoregulacji organizmu jest utrzymanie stałej temperatury wewnętrznej w zakresie $37^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ K}$ [84, 94]. W warunkach ustalonej wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem i otoczeniem ilość wytwarzanego ciepła metabolicznego równa jest stratom powstałym w skutek oddawania ciepła do otoczenia zgodnie z poniższym równaniem bilansu cieplnego człowieka [36]:

$$Q - Q_d - Q_w - Q_{ou} - Q_{oj} = Q_p = Q_R + Q_K \quad (3.1)$$

gdzie:

Q – ilość ciepła wewnętrznego wytwarzanego podczas metabolizmu odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_d – straty ciepła na skutek dyfuzji pary wodnej przez skórę, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_w – straty ciepła na skutek odparowania potu z powierzchni skóry, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_{ou} – straty ciepła utajonego podczas oddychania, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_{oj} – straty ciepła jawnego podczas oddychania, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_p – ilość ciepła przenikającego z powierzchni skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_R – straty ciepła przez promieniowanie z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_K – straty ciepła na drodze konwekcji z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało, odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$.

Oznacza to, że ilość ciepła wytwarzanego wewnątrz organizmu pomniejszona o straty ciepła wynikające z procesów oddychania i odparowania potu równa jest ilości ciepła przenikającego przez odzież do otoczenia przez konwekcje oraz rozpraszanego na drodze promieniowania. Powyższe równanie można również zapisać w następującej formie [84]:

$$Q_R + Q_K = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (3.2)$$

gdzie:

Q_R – straty ciepła przez promieniowanie z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

Q_K – straty ciepła na drodze konwekcji z zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało odniesiona do 1 m^2 powierzchni ciała, $[\text{W}/\text{m}^2]$,

f_{cl} – stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała nie okrytego odzieżą (współczynnik powierzchni okrytej odzieżą) [-],

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

t_r – średnia temperatura promieniowania $[\text{°C}]$,

h_c – współczynnik przejmowania ciepła $[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$

t_a – temperatura otoczenia $[\text{°C}]$.

Spełnienie równania bilansu cieplnego jest warunkiem zapewnienia komfortu cieplnego. Dla określonego tempa metabolizmu oraz stałych warunków otoczenia jedynymi zmiennymi mogącymi wpłynąć na bilans cieplny jest temperatura skóry oraz ilość ciepła odprowadzana

poprzez odparowanie potu. Dla określonej aktywności fizycznej, rodzaju odzieży oraz warunkach otoczenia ustala się pewna kombinacja temperatury skóry oraz strat ciepła poprzez odparowanie potu, co zapewnia spełnienie warunków bilansu cieplnego. Jednak w szerokim zakresie zmienności parametrów otoczenia warunek bilansu cieplnego jest niewystarczający, aby zapewnić odczucie komfortu cieplnego [36], gdyż uczucie to możliwe jest do osiągnięcia jedynie w wąskim zakresie wartości temperatury skóry oraz wartości strat ciepła na odparowanie wydzielonego potu. Temperatura powierzchni skóry wskazuje poziom odczuć cieplnych oraz określa kierunek wymiany ciepła, przy czym wartości powyżej 45°C oraz poniżej 18°C powodują ból [47]. W przypadku małej aktywności fizycznej i w warunkach komfortu cieplnego wartość temperatury powierzchni skóry utrzymuje się w granicach 33 - 34°C i zmniejsza się w przypadku wzrostu aktywności [35]. Osoba dorosła podczas spoczynku wytwarza około 100 W ciepła, co w odniesieniu do jednostkowej powierzchni ciała wynosi około 58 W/m² [8].

Na odczucie komfortu bądź dyskomfortu ma wpływ szereg innych czynników, poza wymienionymi w równaniu bilansu cieplnego, które generalnie można podzielić na czynniki środowiskowe oraz indywidualne [101].

Do czynników środowiskowych, związanych z parametrami środowiska otaczającego można zaliczyć:

- temperatura powietrza,
- prędkość powietrza,
- wilgotność względna powietrza,
- temperatura promieniowania powierzchni,
- asymetria rozkładu temperatury w pomieszczeniu.

Czynniki indywidualne (osobnicze) związane są z indywidualnymi predyspozycjami i upodobaniami człowieka i należą do nich:

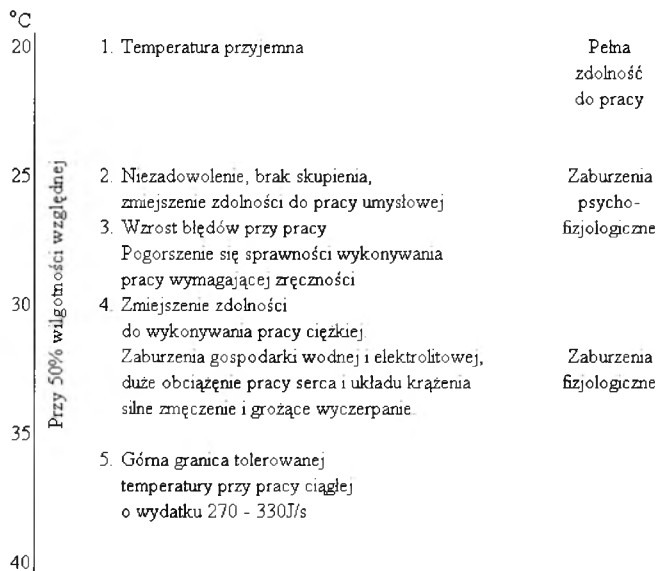
- izolacyjność cieplna odzieży,
- metabolizm,
- wiek,



- aklimatyzacja.

Znaczenie budynku jako czynnika realizacji komfortu cieplnego wynika z możliwości utrzymania określonych parametrów powietrza wewnętrznego lub szerzej kontrolowania czynników środowiskowych. Nie ma jednak możliwości kontroli czynników indywidualnych, które wpływają na zróżnicowanie odczuć cieplnych w budynkach gromadzących duże grupy ludzi, zwłaszcza tam, gdzie parametry powietrza utrzymywane są centralnie.

Najistotniejszym parametrem powietrza wpływającym na odczucie komfortu jest temperatura powietrza. Zbyt wysoka, może powodować wiele istotnych zaburzeń psychofizjologicznych. Prowadzone badania [107] wykazały, że ekspozycja na temperaturę wyższą niż 21°C powoduje spadek sprawności psychofizycznej o 5,95% w stosunku do temperatury neutralnej (tj.16-21°C), zaś przekraczająca 26,67°C w najwyższym stopniu upośledza poziom uwagi, spostrzegawczość i refleks, zwłaszcza podczas krótkiego, tj. poniżej 120 min. czasu ekspozycji (spadek sprawności o ok. 16%).

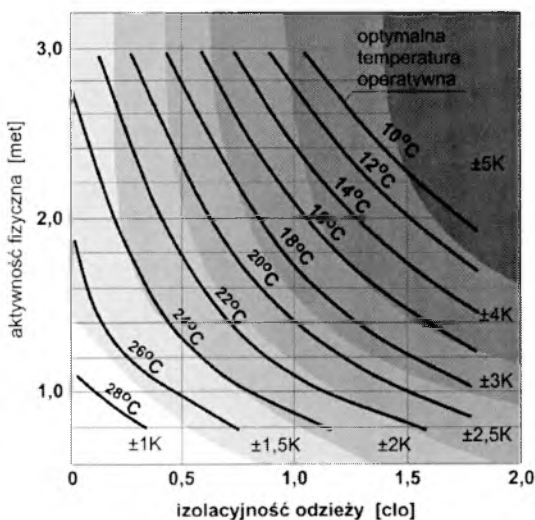


Rys.3.1. Wpływ temperatury na stan fizyczny i psychiczny człowieka [46].

Fig.3.1. Influence of the temperature on the constitution and psychological of human [46].

W przypadku temperatury niższej od komfortowej dochodzi do zwężenia naczyń krwionośnych, zwłaszcza kończyn i obniżenia temperatury skóry nóg nawet o 10 K. Dolna, dopuszczalna temperatura skóry wynosi 20°C rys.3.1.

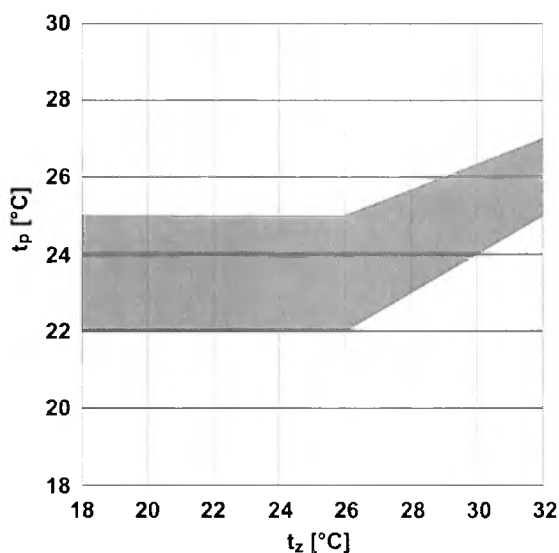
W środowisku umiarkowanym przy małej aktywności fizycznej odpowiadającej szeroko pojętej pracy biurowej, optymalna wartość temperatury będzie zależała od pory roku (lato, zima) oraz izolacyjności cieplnej odzieży. W zimie wartości optymalne wyniosą ok. 20÷22°C, natomiast w okresie letnim ok. 24÷26°C [87]. Człowiek zaczyna odczuwać zmianę temperatury powietrza otaczającego przy wahaniach w granicach ± 1 K [85], w związku z tym optymalny układ klimatyzacji powinien utrzymywać wartość temperatury powietrza w tych granicach. Na rysunku 3.2 przedstawiono zależność optymalnej wartości temperatury operatywnej od izolacyjności odzieży oraz aktywności fizycznej i kategorii pomieszczenia. Linia ciągłą oznaczone są wartości temperatury operatywnej dla PMV=0 (optymalne). Przedstawione obszary z dopuszczalną różnicą temperatury w stosunku do wartości optymalnej wyznaczone zostały dla PPD<10% tj. $-0,5 < PMV < +0,5$.



Rys.3.2. Wartości optymalnej temperatury operatywnej w zależności od izolacyjności odzieży, aktywności fizycznej dla kategorii pomieszczeń B [90].

Fig.3.2. Optimum operative temperature as function of clothing and activity for category B [90].

Z uwagi na ograniczoną zdolność organizmu ludzkiego do szybkiej aklimatyzacji w okresach ciepłych różnica temperatury pomiędzy powietrzem zewnętrznym i wewnętrznym nie powinna przekraczać 6-7 K. W przeciwnym przypadku lekko ubrana osoba po wejściu do pomieszczenia będzie odczuwała chłód. Z tego względu wskazane jest w pomieszczeniach klimatyzowanych (chłodzonych), przy temperaturze powietrza zewnętrznego powyżej 27°C, utrzymywanie wyższej niż standardowo zalecana, temperatury wewnętrznej, zgodnie z poniższym nomogramem (rys.3.3.).



Rys.3.3. Zakres zmian temperatury powietrza w pomieszczeniu w zależności od temperatury zewnętrznej [29].

Fig.3.3. Range of the air temperature in the room depending on the outside temperature [29].

Kolejnym czynnikiem środowiskowym jest prędkość powietrza w pomieszczeniu. Wpływa ona na proces wymiany ciepła na powierzchni ciała człowieka, a tym samym na strumień ciepła oddawany do otoczenia na drodze konwekcji. Zbyt mała prędkość może okazać się niewystarczająca do odebrania odpowiedniej ilości ciepła wytwarzanego przez człowieka, co

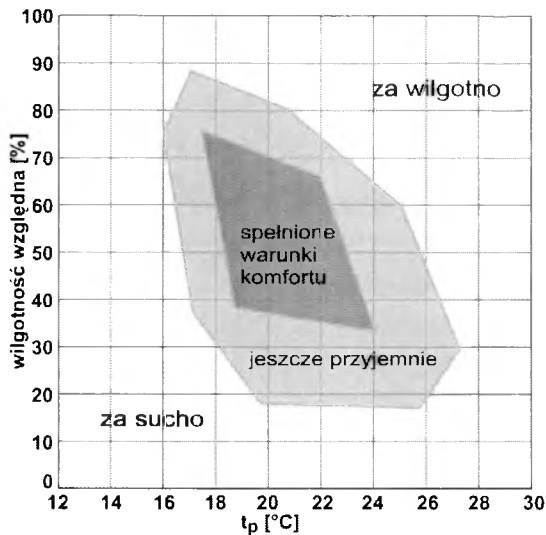
w konsekwencji spowoduje odczucie duszności i przegrzania. Ze wzrostem wartości prędkości zwiększa się ilość ciepła oddawana do otoczenia przez konwekcję, co może potęgować uczucie chłodu. Optymalne wartości prędkości powietrza w bezpośrednim otoczeniu człowieka zależą od temperatury i aktywności fizycznej ludzi. Lokalny wzrost prędkości może być odczuwany jako przeciąg [4, 52]. Zakres prędkości uważanych za komfortowe w zależności od wartości temperatury powietrze przedstawiono w tabeli 3.1.

Tab.3.1. Zalecana prędkość powietrza w pomieszczeniu w zależności od wartości temperatury powietrza.

Tab.3.1. Recommended air velocity in the room depending on the value of the air temperature.

Temperatura powietrza t_n [°C]	Prędkość przepływu powietrza [m/s]
20	0,04 – 0,12
21	0,04 – 0,14
22	0,05 – 0,17
23	0,07 – 0,21
24	0,09 – 0,26
25	0,12 – 0,32
26	0,16 – 0,40

Wilgotność powietrza wpływa na intensywność parowania potu. Wpływ tego parametru na odczucia cieplne jest większy w warunkach wysokiej temperatury. Wartość wilgotności względnej w granicach 30 – 60% ma niewielki wpływ na odczucia cieplne.



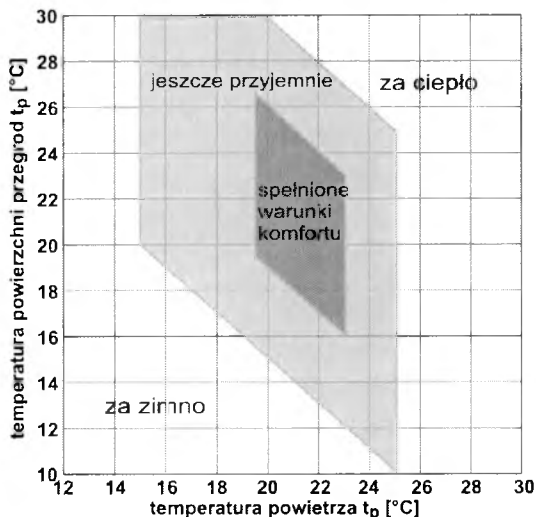
Rys.3.4. Odczucia cieplne w zależności od wartości temperatury powietrza i wilgotności względnej [60].

Fig.3.4. Thermal sensation depending on the value of the air temperature and relative humidity [60].

Wyższe wartości (ok.70%) utrudniają odparowanie potu i sprzyjają rozwojowi bakterii i pleśni. Wilgotność poniżej 30% może powodować wysuszenie śluzówki nosa i skóry, unoszenie kurzu i innych zanieczyszczeń powodując podrażnienie dróg oddechowych. Zalecane wartości wilgotności w zależności od temperatury pokazano na rysunku 3.4.

Temperatura promieniowania przegród wpływa na wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem, a otoczeniem na drodze promieniowania. W warunkach komfortu cieplnego człowiek oddaje na drodze promieniowania 55% ciepła [93]. Zbyt niska temperatura powierzchni przegród sprawi, że pomimo utrzymania temperatury powietrza w zakresie komfortowym człowiek będzie odczuwał zimno. Różnica pomiędzy temperaturą przegród, a powietrzem nie powinna przekraczać 3 K.

Na rysunku 3.5. przedstawiono odczucia cieplne w zależności od temperatury powietrza i przegród.



Rys.3.5. Odczucia cieplne w zależności od wartości temperatury powietrza i temperatury powierzchni przegrod [60].

Fig.3.5. Thermal sensation depending on the air and walls temperature [60].

Ostatnim z przedstawionych czynników środowiskowych jest asymetria rozkładu temperatury w pomieszczeniu. Pionowy gradient temperatury, czyli zmiana wartości temperatury powietrza wraz z wysokością/ szerokością pomieszczenia może powodować lokalne uczucie chłodu – stóp bądź głowy. Stopień asymetrii promieniowania cieplnego nie powinien być większy niż 10 K z powierzchni pionowych oraz 5 K z powierzchni poziomych [90].

Uczucie komfortu ,w tym komfortu cieplnego, z definicji jest oceną subiektywną, różną dla każdego człowieka. Liczne badania oraz normy krajowe i międzynarodowe określają pewien zakres parametrów, których utrzymanie ma zapewnić satysfakcję z warunków cieplnych. Jednak zalecane wartości poszczególnych czynników określone są jako średnia z wyników uzyskanych na podstawie badań określonej grupy osób, bez określenia indywidualnych różnic występujących pomiędzy poszczególnymi osobnikami oraz dodatkowo przy założeniu jednorodnych parametrów w całej kubaturze pomieszczenia. W praktyce w pomieszczeniach utrzymanie jednorodnego środowiska nie jest możliwe. Szereg czynników takich jak temperatura promieniowania ścian i okien, systemy wentylacji i klimatyzacji itp.

wprowadzają asymetrie rozkłady temperatury powietrza i promieniowania, czy lokalne zmiany prędkości powietrza. Wszystkie te elementy w połączeniu z indywidualnymi czynnikami wpływającymi na odczucia cieplne sprawiają, że centralne systemy klimatyzacyjne nie dają możliwości zapewnienia komfortu każdej, przebywającej w danym pomieszczeniu osobie. Rozwiązaniem może okazać się system wentylacji osobistej (PV), który pozwala użytkownikowi na samodzielne, lokalne kontrolowanie parametrów powietrza, w najbliższym otoczeniu dostosowując parametry środowiska do swoich chwilowych potrzeb.

3.2. SPOSOBY OKREŚLANIA I POMIARU KOMFORTU TERMICZNEGO CZŁOWIEKA

Niejednorodność środowiska wewnętrznego spowodowała wprowadzenie wskaźników komfortu cieplnego oraz zastępczych wartości temperatury (np.: temperatura odczuwalna, temperatura ekwiwalentna) pozwalających na wyznaczenie przewidywanych odczuć cieplnych w danych parametrach.

Część z tych wskaźników, stworzonych dla środowiska umiarkowanego stała się tematem normy PN-EN ISO 7730:2006: *Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczenie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego* [90] oraz normy: PN-EN 15251: *Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas* [89].

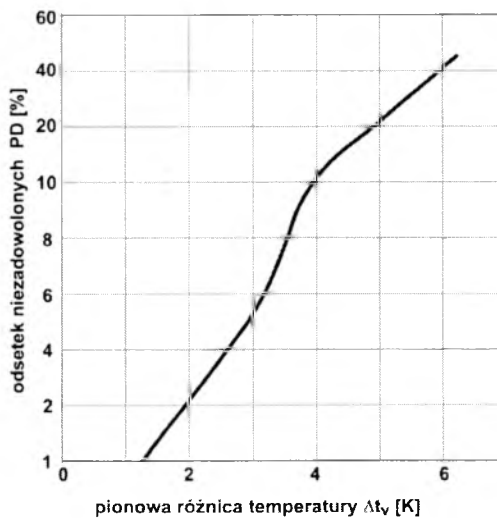
W obu powyższych dokumentach do opisu komfortu cieplnego w pomieszczeniach wykorzystuje się wskaźnik PMV (przewidywana średnia ocena komfortu), który jest funkcją m. in. aktywności człowieka oraz izolacyjności jego odzieży, prędkości, temperatury, wilgotności powietrza oraz średniej temperatury promieniowania. PMV służy do wyznaczenia średniej oceny, dotyczącej środowiska termicznego w pomieszczeniach, dużej grupy osób określających swe wrażenia cieplne w siedmiostopniowej skali ocen: od -3 (zimno), poprzez 0 (neutralnie), do +3 (gorąco). Kolejnym wskaźnikiem dotyczącym komfortu termicznego jest PPD (przewidywany odsetek niezadowolonych). Wskaźnik jest ściśle związany z PMV i stanowi prognozę liczby osób odczuwających w danym pomieszczeniu brak komfortu termicznego. Z uwagi na indywidualne różnice w odczuwaniu mikroklimatu, nie jest możliwe uzyskanie poczucia satysfakcji, z panujących warunków cieplnych, przez wszystkie osoby przebywające w danym środowisku. Na podstawie normy PN-EN ISO 7730:2006 [90]

proponuje się określenie zakresu komfortu cieplnego zadowolającego 90% użytkowników tego pomieszczenia, co odpowiada wartości wskaźnika PMV zawartej w granicach $\pm 0,5$. Należy jednak pamiętać, iż *PMV* i *PPD* są wskaźnikami opisującymi komfort całego ciała, nie uwzględniając jednak lokalnego uczucia dyskomfortu, który dotyczy najczęściej nieosłoniętych części ciała (dłoni, stóp, karku). Zarówno wskaźnik PMV jak i PPD dotyczy odczuć cieplnych całego ciała i szerzej przedstawiono je w rozdziale 3.3.

PN-EN ISO 7730:2006 [90] zawiera również wskaźniki umożliwiające ocenę odczuć lokalnych. Lokalny dyskomfort opisuje się za pomocą dwóch wartości PD (odsetka niezadowolonych) oraz DR (wskaźnik przeciągu).

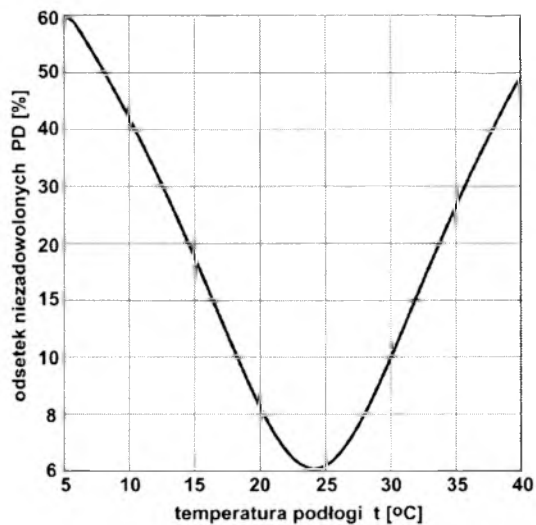
Odsetek niezadowolonych (PD) wykorzystywany do przedstawienie wpływu pionowej różnicy temperatury, wpływu ciepłej/zimnej powierzchni podłogi oraz asymetrii temperatury promieniowania. Zależności te pokazano na rys. 3.6., 3.7., 3.8.

Spadek temperatury wraz z wysokością pomieszczenia nie ma tak dużego wpływu na odczucia lokalnego dyskomfortu jak przypadek przedstawiony na rys. 3.6.



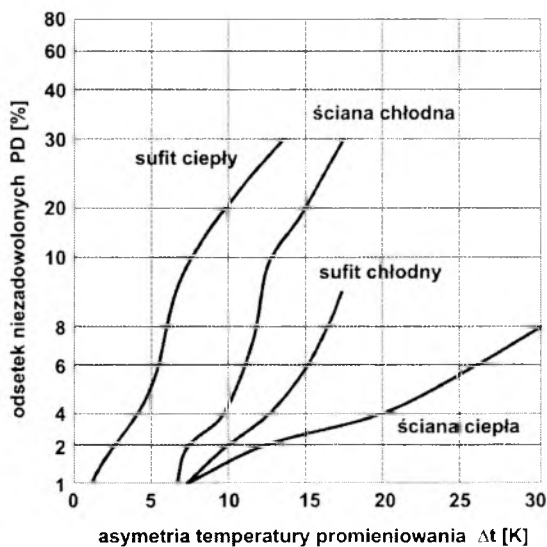
Rys.3.6. Odsetek niezadowolonych powodowany pionową różnicą temperatury pomiędzy głową i stopami (dla wzrostu temperatury wraz z wysokością pomieszczenia) [90].

Fig.3.6. Local discomfort caused by vertical air temperature difference [90].



Rys.3.7. Lokalny dyskomfort powodowany temperaturą podłogi [90].

Fig.3.7. Local thermal discomfort caused by warm or cold floors [90].



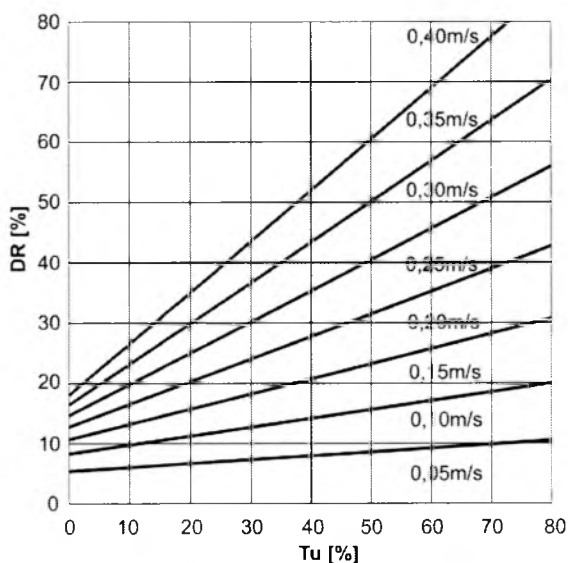
Rys.3.8. Lokalny dyskomfort powodowany asymetrią temperatury promieniowania [90].

Fig. 3.8. Local thermal discomfort caused by radiant temperature asymmetry [90].

Wskaźnik przeciągu (DR) jest to przewidywany odsetek ludzi, którym może przeszkadzać przeciąg. Wyznaczany jest przy założeniu, że osoba wykonuje lekką pracę, odczucia ciepłne dla całego ciała są neutralne ($PMV=0$), a uczucie przeciągu będzie dotyczyło okolic karku.

Na rysunku 3.9. przedstawiono wartości DR w zależności od intensywności turbulencji powietrza przepływającego z określoną prędkością.

Innymi wskaźnikami służącymi do oceny środowiska wewnętrznego oraz dającymi możliwość porównania parametrów panujących w różnych warunkach są wskaźniki temperaturowe, uwzględniające szereg czynników tj. prędkość powietrza, czy temperatura promieniowania. Należą do nich m.in. temperatura efektywna, temperatura wynikowa oraz temperatura ekwiwalentna.

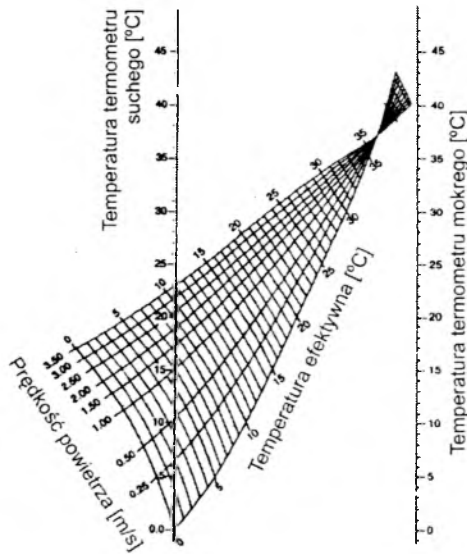


Rys.3.9. Przewidywany odsetek osób odczuwających przeciąg w zależności od stopnia turbulencji powietrza i jego prędkości dla temperatury powietrza 23°C [90].

Fig.3.9. Predicted percentage dissatisfied caused by draught depending on air velocity and turbulence for air temperature 23°C [90].

Temperatura efektywna (ET) i jej modyfikacje

Jest to pierwszy wskaźnik stworzony na przełomie lat 20. i 30. XX wieku do oceny odczuć cieplnych pozwalający na porównanie odczuć przy różnych parametrach środowiska. ET odzwierciedla łączny wpływ temperatury, wilgotności powietrza i jego prędkości na kształtowanie odczuwalności cieplnej człowieka. Temperaturę efektywną można zdefiniować jako umowną temperaturę nieruchomego powietrza o wilgotności względnej 100%, która stwarzałaby takie samo odczucie ciepłe co kombinacja rzeczywistej temperatury powietrza o rzeczywistej wilgotności względnej i prędkości. Wartości ET zostały wyznaczone empirycznie w komorach klimatycznych z uwzględnieniem parametrów fizjologicznych przez Yagłoglou, Houghtona i Millera [50, 51, 115]. Na tej podstawie stworzono dwa wykresy odzwierciedlające wartość temperatury efektywnej w zależności od prędkości, wilgotności oraz temperatury powietrza. Jeden dla osoby rozebranej do pasa (rys.3.10.), gdzie wskaźnik ten nazwano BET (*ang. Basic Effective Temperature*) oraz drugi dla osoby „normalnie ubranej” określony jako NET (*ang. Normal Effective Temperature*) (rys.3.11.).

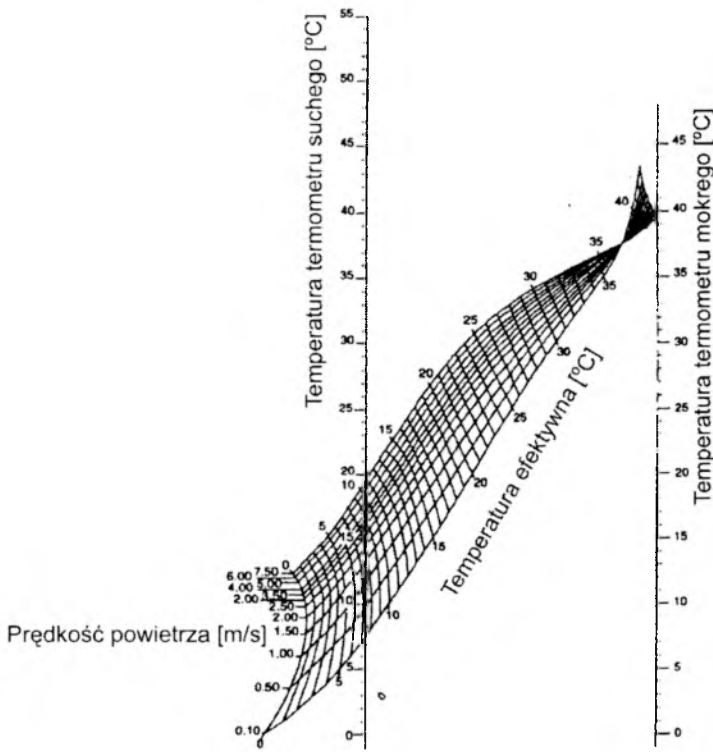


Rys.3.10. Wykres zależności BET w zależności od wilgotności, prędkości i temperatury powietrza [84].

Fig. 3.10. BET value depending on relative humidity, temperature and air velocity [84].

Przy czym skala odczuwalności cieplnej dla temperatury efektywnej opracowana została dla jej wartości dodatnich.

Wskaźnik ET niestety nie uwzględniał wpływu temperatury promieniowania, która w niektórych przypadkach istotnie wpływała na odczucia cieplne człowieka. Dlatego Vernon i Warner zaproponowali pomiar temperatury za pomocą czarnej kuli o średnicy 150 mm, a nie jak w przypadku ET za pomocą zwykłego termometru (suchego) [109]. Tak wyznaczana temperaturę nazwano CET (*ang. Corrected Effective Temperature*).



Rys.3.11. Wykres zależności NET w zależności od wilgotności, prędkości i temperatury powietrza [84].

Fig.3.11. NET value depending on relative humidity, temperature and air velocity [84].

Francuski badacz Missenard, prowadzący badania dotyczące wskaźników komfortu w swoich pracach [75, 76, 66] zaproponował obliczanie ET z użyciem wzoru 3.3.

Zarówno ET jak i CET były stosowane w szerokim zakresie jako wskaźniki odczuć cieplnych i komfortu cieplnego. W chwili obecnej wskaźnik ten jest również stosowany choć niezalecany do oceny środowisk umiarkowanych, natomiast znalazł zastosowanie w ocenie środowisk gorących.

$$ET = 37,0 - \frac{(37,0 - t_a)}{0,68 - 0,0014 \cdot \varphi + \frac{1}{1,76 + 1,4 \cdot w^{0,75}}} - 0,29 \cdot t_a \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{100}\right), \quad (3.3)$$

gdzie:

ET – temperatura efektywna, [°C],

t_a – temperatura powietrza, [°C],

w – prędkość powietrza, [m/s],

φ – wilgotność względna powietrza, [%].

Temperatura ekwiwalentna (t_{eq})

Temperaturę ekwiwalentną można zdefiniować jako temperaturę teoretycznego środowiska zamkniętego, w którym średnia temperatura promieniowania jest równa temperaturze powietrza w tej przestrzeni, które pozostaje w bezruchu i w którym wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem i otoczeniem na drodze konwekcji i promieniowania jest taka sama jak w przypadku warunków rzeczywistych. Wskaźnik ten początkowo miał zastosowanie do oceny odczuć całego ciała w warunkach suchej wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem i otoczeniem [30, 31, 62, 81, 80]. W późniejszym czasie wskaźnik ten dostosowano do określenia odczuć cieplnych poszczególnych części ciała [80].

Bedford na podstawie przeprowadzonych badań, prowadzonych głównie wśród pracownic zakładów przemysłowych [12] stworzył poniższe równanie za pomocą, którego możliwe było obliczenie wartości temperatury ekwiwalentnej:

$$t_{eq} = 0,522 \cdot t_a + 0,478 \cdot t_r - 0,21\sqrt{w} \cdot (37,8 - t_a), \quad (3.4)$$

gdzie:

t_{eq} – temperatura ekwiwalentna, [°C],

t_a – temperatura powietrza, [°C],

t_r – średnia temperatura promieniowania, [°C],

w – prędkość powietrza, [m/s].

Dalsza analiza zagadnienie oraz wprowadzenie skali odczuć cieplnych, zwanej później skalą Bedford'a (szerzej omówiona w rozdziale 3.3) doprowadziło do przekształcenia równania do poniższej postaci:

$$S = 11,16 - 0,0556 \cdot t_a - 0,0538 \cdot t_w - 0,0372 \cdot f + 0,00144 \cdot \sqrt{w} \cdot (100 - t_a), \quad (3.5)$$

gdzie:

S – ocena odczuć cieplnych według skali Bedford'a (patrz rozdział 3.3), [-],

t_a – temperatura powietrza, [°F],

t_w – średnia temperatura otoczenia (przegrody budowlane itp.), [°F],

f – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu, [mm Hg],

w – prędkość powietrza, [Ft/min].

Wskaźnik ten znalazł zastosowanie między innymi do oceny systemów klimatyzacji częściowej w pojazdach [113], które weryfikowane są za pomocą manekinów termicznych [49].

3.3. STOSOWANE SKALE POMIARU KOMFORTU TERMICZNEGO

Skala Bedford'a

Bedford opracował siedmiostopniową skalę odczuć cieplnych, którą posłużyła między innymi w badaniach prowadzonych przez niego w zakładach przemysłowych [12]. Ankietyzowani pracownicy, wykonujący lekką pracę fizyczną w zakładach przemysłowych, określali swoje uczucie ciepła, które następnie klasyfikowane było zgodnie z poniższą skalą:

Znacznie za ciepło	1
Za ciepło	2
Komfortowa ciepło	3
Komfortowo	4
Komfortowo chłodno	5
Za chłodno	6
Znacznie za chłodno	7

Przy czym jako strefę komfortu należy przyjąć zakres od „komfortowo ciepło” do „komfortowo chłodno”. Pomiar, który stał się podstawą do określenia zakresu komfortowych wartości temperatury prowadzony był w zakładach przemysłowych jedynie w okresie zimowym, kiedy pracował system ogrzewania w budynkach. Z tego powodu autor przyporządkowując wartości temperatury ekwiwalentnej do siedmiostopniowej skali odczuć nie przewidział, że w warunkach letnich strefa komfortu przesunie się w wyniku aklimatyzacji i mniejszej izolacyjności odzieży.

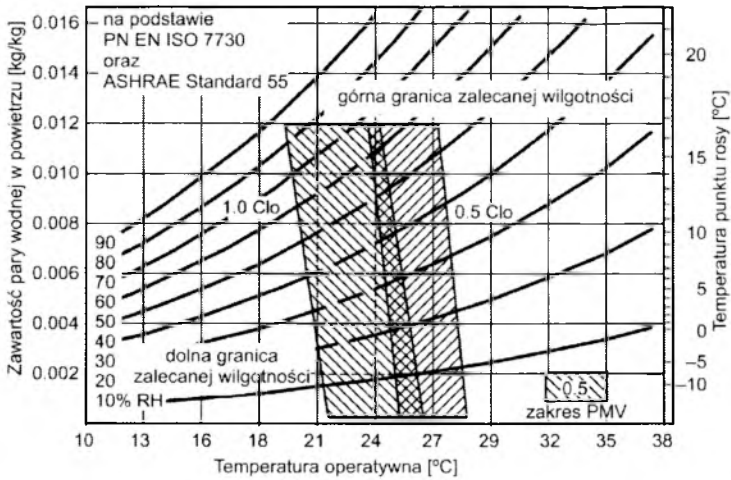
Stosując tę skalę odczuć cieplnych należy pamiętać, że nie jest to skala ciągła. Dlatego nie można przyjmować, zwłaszcza podczas analiz statystycznych, że kolejne stopnie odczuć na skali odpowiadają jednakowym odstępom w odczuciach cieplnych. W późniejszych badaniach [12] wykazano, że w zakresie odczuć komfortowych skala ta jest liniowo zależna od wartości temperatury ekwiwalentnej, a wskaźnik ten może być stosowany zarówno w warunkach niskiej jak i wysokiej prędkości powietrza.

Skala odczuć cieplnych wg ASHRAE

Skala ta została stworzona podczas badań prowadzonych przez Rohles'a i Nevins'a [95, 96]. Badania te przeprowadzone na grupie 1600 studentów posłużyły do określenia zależności pomiędzy odczuciami cieplnymi, a temperaturą powietrza, wilgotnością względną, płcią oraz czasem ekspozycji na określone warunki. W badaniach tych zastosowano siedmiostopniową skalę subiektywnych wrażeń cieplnych opisana poniżej:

Gorąco	+3
Ciepło	+2
Lekko ciepło	+1
Neutralnie	0
Lekko chłodno	-1
Chłodno	-2
Zimno	-3

Liczba stopni wrażeń cieplnych oraz ich odzwierciedlenie numeryczne zbliżone jest do skali Bedford'a, jednak wprowadzenie wartości od +3 do -3 miało na celu bardziej intuicyjne posługiwanie się skalą i ułatwienie jej zapamiętania. Na podstawie badań z wykorzystaniem tej skali wyznaczono obszary odpowiedniej kombinacji parametrów tj. wilgotność względną, temperatura operatywna powietrza oraz izolacyjności cieplna odzieży, dla których 80% osób będzie odczuwało komfort cieplny rys.3.12.



Rys.3.12. Strefy komfortu cieplnego dla lata i zimy wg ASHRAE przy prędkości powietrza poniżej 0,2 m/s, izolacyjności cieplnej odzieży 0,5 i 1,0 clo oraz aktywności fizycznej poniżej 1,1 met [8].

Fig.3.12. ASHRAE summer and Winter Comfort zones for air velocity 0,2 m/s, people wearing 1,0 and 0,5 clo clothing during primarily sedence activity ($\leq 1,1$ met) [8].

Przewidywana średnia ocena komfortu (PMV)

PMV (ang. *Predicted Mean Vote*), określa przewidywaną średnią ocenę dużej liczby osób przebywających w danym pomieszczeniu, zgodnie ze skalą wrażeń cieplnych wg ASHRAE. Przy czym zakres komfortu przyjmowany jest w granicach $-2 < PMV < +2$. Wskaźnik ten wyraża różnicę pomiędzy rzeczywistą ilością ciepła oddawaną przez człowieka do otoczenia i odbieraną przez środowisko otaczające, a optymalną ilością ciepła, która zostałaby oddana z organizmu do otoczenia w warunkach komfortu przy danej aktywności.

Wartość PMV zgodnie z normą można wyznaczyć z następującego równania [90]:

$$PMV = \left[0,303 \cdot e^{-0,036 M} + 0,028 \right] \cdot \left[\begin{aligned} &(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ &- 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &- 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right], \quad (3.6)$$

gdzie:

M – wartość metabolizmu [W/m^2],

W – ilość ciepła wytwarzana przez organizm, [W/m^2],

I_{cl} – izolacyjność cieplna odzieży, [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$],

f_{cl} – współczynnik przykrycia odzieżą powierzchni ciała, [-],

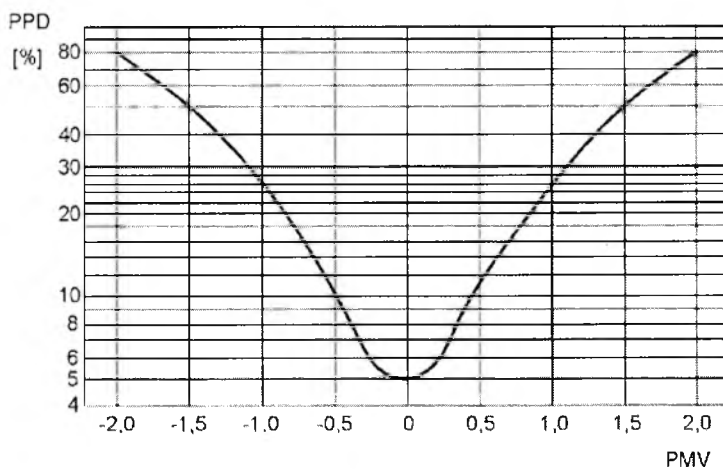
t_a – temperatura powietrza otaczającego, [$^{\circ}\text{C}$],

t_r – średnia wartość temperatury promieniowania, [$^{\circ}\text{C}$],

p_a – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, [Pa],

h_c – współczynnik przyjmowania ciepła, [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],

t_{cl} – temperatura powierzchni odzieży, [$^{\circ}\text{C}$].



Rys.3.13. Zależność przewidywanej średniej oceny komfortu w funkcji odsetka osób niezadowolonych (PPD) [90].

Fig. 3.13. PPD (predicted percentage dissatisfied) as function of PMV (predicted mean vote) [90].

Wskaźnik PMV określa jedynie przewidywane wrażenia termiczne osób przebywających w pomieszczeniu. Uzupełniającym wskaźnikiem, określającym negatywnych opinie, co do warunków środowiska cieplnego, jest PPD (ang. *Predicted Percentage of Dissatisfied*), tj. przewidywany odsetek niezadowolonych z grupy osób znajdujących się w danym pomieszczeniu.

Określa on procentowy udział osób zdecydowanie nieusatsfakcjonowanych warunkami cieplnymi panującymi w pomieszczeniu pracy. W przypadku, gdy PPD ma wartość niższą niż 10%, środowisko uznaje się za komfortowe, dla którego z kolei wskaźnik PMV zawiera się w granicach $\pm 0,5$. Korelacja pomiędzy wartościami PMV, a PPD została przedstawiona na wykresie (rys.3.13).

Wskaźniki PMV i PPD odzwierciedlają komfort (lub jego brak) generalnie odczuwany przez człowieka, pomijając lokalne odczucia dyskomfortu [27].

Ocena subiektywnego odczucia komfortu

Oprócz wskaźników odczuć cieplnych, które opisane są zależnościami pozwalającymi na prognozowanie wrażeń cieplnych na podstawie znajomości odpowiednich parametrów środowiska, w badaniach dotyczących odczuć cieplnych wykorzystywane są również kwestionariusze umożliwiające określenie subiektywnych ocen osób przebywających w określonych warunkach środowiskowych. Podczas badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej zastosowano ankietę służącą do oceny subiektywnego odczucia komfortu [103]. Ankieta składała się z czterech pytań wraz z trzema możliwymi odpowiedziami, przedstawionymi poniżej. Ochotnicy biorący udział w badaniach wypełniali kwestionariusz poprzez wybór jednej z odpowiedzi, najbardziej odpowiadającej jego rzeczywistym wrażeniom.

1. Chciałbyś aby było tu teraz		3. Czujesz się tu:	
a) cieplej	+1	a) ożywiony	+1
b) bez zmian	0	b) normalny	0
c) chłodniej	-1	c) śpiący	-1

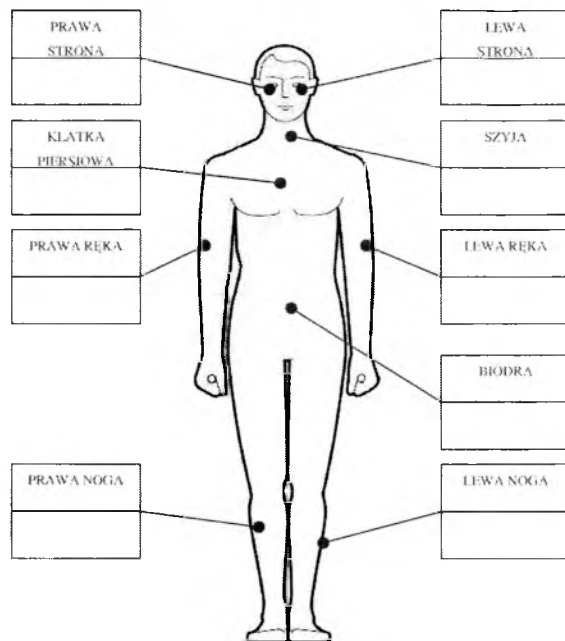
2. Chciałbyś aby było tu teraz:	4. W pomieszczeniu tym czujesz się
a) mniej przewiewnie +1	a) dobrze +1
b) bez zmian 0	b) obojętnie 0
c) przewiewnej -1	c) źle -1

Dzięki zastosowaniu tego typu kwestionariuszy badania z udziałem ochotników umożliwiają analizę wrażeń właściwych wyłącznie ludziom, których określenie jest niemożliwe w przypadku badań z użyciem np. manekinów termicznych, bądź innych urządzeń.

Ocena lokalnego dyskomfortu cieplnego

Drugą ze skal zastosowanych podczas prowadzonych badań była ankieta pozwalająca na oszacowanie lokalnego dyskomfortu cieplnego człowieka. Zgodnie z poniższym schematem (rys.3.14.).

Ochotnicy, w pierwszej z komórek, za pomocą znaków „+” dla wrażenia komfortu oraz „-” dla uczucia dyskomfortu, mieli za zadanie określenie swoich wrażeń cieplnych dla poszczególnych partii ciała [54]. Ponadto, ze względu na niejednorodność środowiska podczas pracy systemu wentylacji indywidualnej, w drugiej z komórek dodatkowo określali swoje odczucia cieplne zgodnie z siedmiostopniową skalą odczuć wg ASHRAE. Tak skonstruowana ankieta pozwalała na niezależną ocenę uczucia ciepła oraz poczucia komfortu dla poszczególnych partii ciała np. w warunkach zimowych przy stosunkowo niskiej temperaturze otoczenia i w przypadku nawiewu ciepłego powietrza na stopy odczucia cieplne na poziomie +2 lub +3 mogą być odbierane jako komfortowe ze względu na ogólny bilans ciepła organizmu.



Rys.3.14 Schemat ankiety służącej ocenie lokalnego dyskomfortu cieplnego [54].

Fig.3.14. Questionnaire used for the evaluation of local thermal feelings [54].

4. WENTYLACJA INDYWIDUALNA W TWORZENIU MIKROKLIMATU OTOCZENIA CZŁOWIEKA

Nadrzędnym zadaniem systemów wentylacji i klimatyzacji jest zapewnienie użytkownikom pomieszczeń poczucia komfortu, czyli zadowolenia z warunków panujących w pomieszczeniu. Realizowane obecnie układy opierają się na wentylacji mieszającej lub wyporowej i projektowane są według standardów przyjętych dla dużej grupy osób tj. ASHRAE Standard 55-1992 [7], PN-EN ISO 7730:2006 [90], a w Polsce dodatkowo PN-EN 15251:2007 [89] oraz PN-B-03421:1978 [87] i PN-B-03430:1983/Az3:2000 [88]. Jednak wentylacja mieszająca (z ang. *Mixing Ventilation* - MV), rozcieńczając zanieczyszczenia powstające w pomieszczeniu a zarazem zapewniając jednorodne środowisko cieplne nie stwarza warunków, które byłyby akceptowane przez wszystkich użytkowników pomieszczenia. Klasyczne rozwiązania wentylacji mieszającej dotyczące możliwości kontroli i regulacji temperatury powietrza przez użytkowników nie przekładają się na zwiększenie ich komfortu [58]. Przeprowadzone w 1991 roku badania [45] wykazały, że indywidualne różnice w perforowanych wartościach temperatury powietrza otaczającego mogą dochodzić nawet do 10 K, a wartość prędkości powietrza wybierana jako optymalna może różnić się czterokrotnie [71]. Systemem wentylacji wyporowej (z ang. *Displacement Ventilation* - DV), w którym powietrze o temperaturze $2 \div 4\text{K}$ niższej od temperatury powietrza w pomieszczeniu, dostarczane jest przez nawiewniki umiejscowione blisko poziomu podłogi, może powodować u użytkowników odczucie lokalnego dyskomfortu cieplnego, spowodowane przeciągiem czy też pionowym gradientem temperatury. Dopiero pełna regulacja warunków najbliższego otoczenia człowieka może skutkować poprawą warunków pracy a przez to przekładać się na efektywność wykonywanej pracy [9, 21, 70].

Stworzenie układów, wykorzystujących indywidualny rozdział powietrza dla każdego użytkownika, potencjalnie daje możliwość niezależnej kontroli parametrów termodynamicznych powietrza w najbliższym otoczeniu człowieka. Pozwala to na dostosowanie najbliższego środowiska wewnętrznego do chwilowych potrzeb – aktywności fizycznej, metabolizmu, izolacyjności odzieży. Wartości tych parametrów dla każdego człowieka mogą znacząco się różnić - wartość metabolizmu człowieka w zależności od jego naturalnych skłonności oraz aktywności fizycznej może wynieść od 1 met do 1,5 met, a izolacyjność noszonej odzieży zmieniać się w zakresie od około 0,4 clo do 1,2 clo [6].

Czynniki takie, jak fizjologia człowieka, aktywność fizyczna, reakcje psychologiczne, izolacyjność ubrania, a nawet świadomością samodzielnego wpływu na regulację parametrów nawiewu [10] stanowią bardzo istotny element przy odczuwaniu mikroklimatu środowiska jako optymalnego i komfortowego stanowiska pracy [37]. W przypadku wentylacji indywidualnej komfort cieplny uzyskiwany jest za pomocą dostosowania efektu chłodzenia ciała człowieka przez strumień powietrza do osobistych preferencji użytkowników. Efekt chłodzenia strumieniem powietrza zależy od:

- intensywności turbulencji powietrza w strumieniu [71],
- wartości różnicy temperatury pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu a powietrzem nawiewanym [40, 106],
- kierunku napływu powietrza na ciało człowieka [106].

Oprócz zapewnienia odpowiednich wrażeń cieplnych układ wentylacji indywidualnej (z ang. Personalized Ventilation - PV) znacząco wpływa na jakość powietrza, którym oddycha użytkownik, w tym przypadku nie dochodzi bowiem do mieszania się zanieczyszczeń generowanych w pomieszczeniu, a następnie inhalacji. Wentylacja indywidualna dostarcza świeże, odpowiednio przygotowane powietrze bezpośrednio do strefy oddychania, tym samym powietrze z otoczenia, częściowo zanieczyszczone, jest wypierane przez czyste, którym następnie oddycha człowiek. Początkowo podobny potencjał dostrzegano w wentylacji waporowej. Jednak pomiary prowadzone w pomieszczeniach z nawiewnikami waporowymi wykazały, że blisko 50% osób było niezadowolonych z jakości powietrza panującego w pomieszczeniach [69, 78]. Kaczmarczyk [57], Zeng [117] i Gao [44] wykazali, że wentylacja indywidualna znacząco poprawia ocenę jakości powietrza w porównaniu do wentylacji mieszającej przy tej samej ilości powietrza świeżego dostarczanego przez oba systemy.

W celu zweryfikowania działania układu wentylacji indywidualnej, zarówno pod kątem zapewnienia odpowiednich odczuć cieplnych, jak i jakości powietrza wewnętrznego, w ramach pracy doktorskiej, przeprowadzone zastały liczne badania z udziałem ochotników, jak również z wykorzystaniem manekina termicznego, które omówiono w kolejnych podrozdziałach.

Wpływ wentylacji indywidualnej na jakość powietrza wewnętrznego

W 2004r. Kaczmarczyk i inni [55] opublikowali wyniki badań, które miały na celu określenie wpływu systemu wentylacji indywidualnej (PV) oraz wentylacji mieszającej (MV) na osoby wykonujące pracę biurową. Przebadano sześćdziesiąt osób w wieku 20-25 lat zarówno kobiety jak i mężczyzn. Wszystkie pomiary prowadzone były w pomieszczeniu o powierzchni 36 m² i wysokości 3 m, wykończonego materiałami o niskiej emisyjności zanieczyszczeń, w którym umieszczono 6 biurek. Jakość powietrza zbliżona do warunków biurowych symulowana była poprzez umieszczenie w laboratorium używanej wykładziny dywanowej w sposób niewidoczny dla ochotników biorących udział w eksperymencie, co zapewniło rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w całym pomieszczeniu. Każde z biurek wyposażone było w nawiewnik wentylacji indywidualnej w postaci kratki wentylacyjnej o wymiarach 240mm x 74 mm umieszczonej ponad monitorem komputera, który dostarczał powietrze w ilości od 0,36 m³/h do 54 m³/h (wielkość dostarczanego przez nawiewnik powietrza regulowana była indywidualnie przez każdego ochotnika). Do całego pomieszczenia dostarczana był stały strumień powietrza świeżego w ilości 324 m³/h. Powietrze wprowadzano przez układ wentylacji mieszającej lub podczas badania systemu wentylacji indywidualnej przez nawiewniki zlokalizowane nad monitorem. W przypadku, gdy osoby biorące udział w eksperymencie ustawiły wydajność nawiewnika mniejszą niż 54 m³/h pozostała ilość powietrza dostarczana była przez system MV, tak aby zachowany był stały strumień powietrza dostarczanego do pomieszczenia. Zrealizowano sześć serii pomiarowych - cztery symulujące warunki zimowe zgodnie z [7, 90, 89], tj.: w 1 serii temperatura otoczenia wynosiła 23°C i działał system wentylacji mieszającej a temperatura nawiewu wynosiła 23°C, w 2 i 3 serii działał system PV dostarczając tylko świeże powietrze o temperaturze odpowiednio 20°C oraz 23°C, w 4 serii nawiew był realizowany poprzez system PV dostarczający powietrze recyrkulowane z pomieszczenia o temperaturze 23°C. Pozostałe dwie serie miały na celu symulację warunków letnich przy temperaturze otoczenia 26°C zgodnie z [7, 90], tj.: w serii 5 działała wentylacja mieszająca (MV), w 6 – wentylacja indywidualna (PV), w obu przypadkach nawiewające tylko świeże powietrze o temperaturze 20°C. W czasie badań ochotnicy proszeni byli o wypełnianie ankiet zawierających informacje o odczuwanej jakości powietrza, symptomach syndromu chorego budynku (SBS), odczuciach cieplnych zarówno lokalnych jak i całego ciała oraz odczuciach dotyczących ruchu powietrza (ew. wystąpienia przeciągu). Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły porównanie wentylacji mieszającej oraz systemu wentylacji indywidualnej. Wyniki pokazały, że

niezależnie od temperatury powietrza w pomieszczeniu układ PV poprawił odczuwalną jakość powietrza oraz zmniejszył symptomy SBS porównaniu do MV. Stopień poprawy odczuwalnej jakości powietrza zależał od temperatury otoczenia oraz różnicy temperatury pomiędzy powietrzem nawiewanym a otoczeniem. Najlepszy efekt osiągnięto przy temperaturze powietrza nawiewanego niższej od powietrza otaczającego.

Cermak i inni [18, 20] również przeprowadzili badania porównawcze systemu PV oraz wentylacji mieszającej (MV) i wyporowej (DV) pod kątem rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń i możliwości potencjalnego zarażenia innych użytkowników w przypadku przebywania w pomieszczeniu osoby chorej. W tym celu, jako symulatory człowieka, wykorzystane zostały oddychające manekiny termiczne. Umieszczone zostały przy dwóch biurkach wyposażonych w nawiewniki PV, w pomieszczeniu o kontrolowanych parametrach powietrza. Zastosowano dwa rodzaje nawiewników PV. Pierwszy zlokalizowany nad monitorem komputerowym umieszczony na ruchomym ramieniu o średnicy 185 mm z panelem nawiewnym stabilizującym wypływ powietrza. Drugi w postaci szczeliny o wymiarach 220 mm x 20 mm umieszczonej na krawędzi biurka od strony siedzenia, nawiewającej powietrze pionowo bezpośrednio do strefy oddychania człowieka. Pomieszczenie, które zostało wykorzystane do badań było wyposażone w system wentylacji mieszającej (MV) oraz system wentylacji wyporowej (DV) w postaci pojedynczego nawiewnika umieszczonego przy podłodze o wysokości 1 m, nawiewającego powietrze z boku stanowisk. Jakość powietrza dla każdego układu wentylacji oceniana była na podstawie stężenia zanieczyszczeń zawartych w powietrzu inhalowanym przez oddychającego manekina termicznego. Jeden z manekinów symulował zainfekowanego człowieka, drugi – osobę potencjalnie narażoną na zarażenie. Wykorzystano trzy rodzaje gazów znacznikowych, które zastąpiły zanieczyszczenia wytwarzane w takich przypadkach w warunkach rzeczywistych, tj. CO₂ reprezentujący zanieczyszczenia pochodzące z wykładziny (uwalniany był równomiernie na poziomie powierzchni podłogi przez zbiornik o odpowiedniej perforacji), NO₂ symulujący biozanieczyszczenia uwalniane przez człowieka (przewody dozujące gaz umieszczone zostały w okolicach pach oraz bioder manekina zainfekowanego) oraz SF₆ dostarczany wraz z powietrzem wydychanym przez sztuczne płuca zainfekowanego manekina, dzięki czemu możliwe było oznaczenie rozprzestrzeniania się zarazków w pomieszczeniu. Eksperyment prowadzony był w czterech wariantach: 1 – oba manekiny korzystały z systemu PV, 2 – zakażony manekin korzystał z PV, narażony nie korzystał, 3 – zakażony manekin nie korzystał z PV, narażony korzystał, 4 – żaden z manekinów nie korzystał z wentylacji

indywidualnej. Do pomieszczenia dostarczano stałą ilość świeżego powietrza ($288 \text{ m}^3/\text{h}$), o temperaturze 20°C , odpowiednio rozdzielaną pomiędzy systemy PV, MV i DV, przy czym PV dostarczała powietrze w ilości 7 bądź $54 \text{ m}^3/\text{h}$. Badania te wykazały, że PV jest w stanie lepiej zabezpieczyć użytkownika przed zanieczyszczeniami niezależnie od źródła (aktywnego, pasywnego, lokalnego czy powierzchniowego) i jego lokalizacji w porównaniu do MV i DV. Największy wpływ na jakość powietrza w strefie oddychania manekina miała konstrukcja nawiewnika PV. W porównaniu do wentylacji waporowej (DV) układ PV podnosi jakość powietrza tylko w przypadkach pasywnego, powierzchniowego źródła zanieczyszczeń znajdującego się na podłodze.

Kolejni badacze weryfikowali pięć innych typów nawiewników wentylacji indywidualnej na odczucia ludzi [54]. Pomiary prowadzono w pomieszczeniu o wymiarach $4,5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, w którym umieszczono pięć stanowisk wyposażonych w różnego typu nawiewniki PV i symulowano pracę biurową. Pierwszy z nawiewników stanowiły dwie dysze umieszczone na krawędzi biurka od strony siedzenia. Jedna z dysz, umieszczona na blacie ($220 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$), nawiewała powietrze pionowo do góry, druga dysza ($245 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$) umieszczona prostopadłe do blatu nawiewała powietrze poziomo w okolice brzucha. Kolejne dwa nawiewniki umieszczono na ruchomych ramionach nad monitorami komputerów, jeden o kształcie prostokątnym o wymiarach $240 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$, drugi okrągły o średnicy 185 mm . Czwarty nawiewnik umieszczony został w słuchawkach w miejscu mikrofonu i miał powierzchnię 35 mm^2 . Natomiast ostatni z badanych typów nawiewników stanowił kombinację ruchomego okrągłego panela o średnicy 185 mm oraz szczeliny nawiewającej powietrze poziomo na brzuch. Każdy z nawiewników miał możliwość regulacji ilości powietrza. Maksymalna ilość dostarczanego powietrza dla wszystkich nawiewników oprócz słuchawek wynosiła $54 \text{ m}^3/\text{h}$; do nawiewnik umieszczony w słuchawkach dostarczał maksymalnie $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$. W przypadku kombinacji dwóch nawiewników, ruchomego, okrągłego panela oraz szczeliny powietrze podzielone zostało w proporcjach odpowiednio 36 i $18 \text{ m}^3/\text{h}$. Do pomieszczenia doprowadzane było powietrze świeże w ilości $54 \text{ m}^3/\text{h}$ dla każdej osoby. W przypadku, gdy użytkownik wybrał mniejszy niż maksymalny strumień powietrza pozostała część dostarczana była do pomieszczenia przez system wentylacji mieszającej (MV). W badaniach wzięło udział trzydziestu ochotników (kobiet i mężczyzn) w wieku 20-25 lat. Pomiary prowadzono przy temperaturze otoczenia 23°C oraz 26°C zgodnie z zaleceniami [7, 90, 89]. W temperaturze 23°C osoby biorące udział w eksperymencie poddawane były dwóm poziomom zanieczyszczeń – niskiemu i wysokiemu, tj. podczas badań

w temperaturze otoczenia równej 26°C utrzymywano jedynie wysoki poziom zanieczyszczeń umieszczając w pomieszczeniu wykładzinę dywanową, która używana była przez 20 lat, podczas badań z niskim poziomem zanieczyszczeń wykładzina była usuwana. Temperatura powietrza nawiewanego przez PV w czasie wszystkich badań wynosiła 20°C. Podczas każdego testu ochotnicy proszeni byli o wypełnianie ankiet zawierających informacje o odczuwalnej jakości powietrze, komforcie cieplnym oraz wrażeniach dotyczących ruchu powietrza. Zastosowanie wentylacji indywidualnej (PV) niezależnie od rodzaju nawiewnika zwiększało akceptowalność środowiska wewnętrznego. Stopień poprawy zależał od temperatury powietrza w otoczeniu oraz poziomu zanieczyszczeń. Zestawienie wyników wykazało, że odczuwalna jakość powietrza wewnętrznego zależy od jego temperatury. Przy temperaturze 23°C i niskim poziomie zanieczyszczeń odsetek osób niezadowolonych wynosił blisko 10%. Przy tej samej temperaturze i wysokim poziomie zanieczyszczeń odsetek niezadowolonych wynosił ok. 47%, natomiast wzrost temperatury do 26°C spowodowało wzrost PPD do poziomu 60%. Po zastosowaniu wentylacji indywidualnej (PV) PPD spadło do blisko 10% i zależało do zastosowanego typu nawiewnika. Większość osób nie ustawiała w żadnej serii pomiarowej maksymalnej wydajności nawiewników, jednak zaobserwowano wzrost preferowanej wydajności wraz ze wzrostem temperatury powietrza otaczającego. Po zapytaniu, które rozwiązanie użytkownicy wybraliby i zastosowali w praktyce (była opcja braku PV) 70% ochotników wybrała okrągły panel na ruchowym ramieniu, 53% wybrało panel prostokątny, nikt nie zdecydował się na brak PV.

W celu uzupełnienia subiektywnych odczuć człowieka otrzymanych z powyższych badań [54] dla podobnych warunków przeprowadzono pomiary skuteczności wentylacji [73] zapewnianej przez pięć różnych typów nawiewników, z czego cztery badane były wcześniej z udziałem ludzi [54]. Wyeliminowano nawiewnik słuchawkowy, zmodyfikowano prostokątny nawiewnik nad monitorem umożliwiając regulację jedynie w pionie, a jako piąty rodzaj wybrano nawiewniki umieszczone na blacie w jego narożach, prezentowane również w [11]. Do oceny skuteczności zastosowano nowy wskaźnik – skuteczność indywidualnej ekspozycji zdefiniowany jako udział powietrza nawiewanego przez PV w powietrzu wdychanym. W tym celu w komorze klimatycznej o wymiarach 5 m x 6 m x 2,5 m umieszczano kolejno stanowiska wyposażone w pięć typów nawiewników PV, przy których, na wprost komputera, umieszczono oddychającego termicznego manekina składającego się z szesnastu segmentów. W komorze symulowane były warunki letnie oraz zimowe poprzez utrzymywanie temperatury odpowiednio 26°C i 20°C. Powietrze dostarczane przez nawiewniki miało

temperaturę 20, 23 lub 26°C, a jego strumień wahał się w granicach 18÷83 m³/h. W celu określenia skuteczności wentylacji indywidualnej zastosowano gaz znacznikowy w postaci SF₆, którego stężenie mierzone było w powietrzu nawiewanym do komory, nawiewanym przez nawiewniki oraz w powietrzu wdychanym przez sztuczne płuca manekina. Dodatkowo wyznaczone zostały wartości temperatury ekwiwalentnej, która stanowi wskaźnik komfortu cieplnego [104], dzięki czemu możliwe było ocenienie dodatkowo odczuć cieplnych. Dla analizowanych warunków i wszystkich typów nawiewników nie udało się uzyskać efektu wdychania powietrza pochodzącego całkowicie z systemu PV. Stopień skuteczności zależał od nawiewnika, ilości powietrza oraz parametrów temperaturowych. Maksymalna skuteczność wynosiła 0,6 przy minimalnej ilości powietrza nawiewanego przez PV równej 25 m³/h i została osiągnięta dla szczeliny umieszczonej na krawędzi biurka o nawiewie pionowym. W przypadku nawiewu izotermicznego dla większości nawiewników przy wydatku ok. 25 m³/h (i większym) skuteczność indywidualnej ekspozycji utrzymywana była w przybliżeniu na stałym poziomie od 0,3 do 0,6. Nawiew nieizotermiczny (PV dostarczał powietrze o temperaturze o 6 K niższej niż temperatura otoczenia) powodował stabilizację skuteczności przy wydatku ok. 36 m³/h, jednocześnie nawiew nieizotermiczny powodował dużo wyższą rozbieżność skuteczności pomiędzy konkretnymi nawiewnikami (od 0,1 do ok. 0,6). Najwyższą skuteczność uzyskiwano przy stosowaniu szczeliny o nawiewie pionowym, najgorszy pod względem skuteczności okazał się zmodyfikowany prostokątny nawiewnik umieszczony nad monitorem 0,1.

Obok zapewnienia dobrego samopoczucia i komfortu cieplnego wentylacja indywidualna umożliwia poprawę jakości powietrza w najbliższym otoczeniu człowieka. Daje możliwość oddychania powietrzem świeższym, o mniejszej zawartości zanieczyszczeń. Fang i inni [34] dowiedli, że wartość entalpii powietrza - kombinacji temperatury i wilgotności względnej ma znaczący wpływ na odczucie jakości powietrza przez człowieka. Im niższa temperatura i wilgotność względna powietrza, jego ocena rośnie – odczuwane jest jako świeższe. Jednak z uwagi na odczucia cieplne znaczące obniżanie temperatury powietrza w pomieszczeniu nie jest możliwe. Dostarczanie powietrza wprost do strefy oddychania daje sposobność wyeliminowania z powietrza inhalacyjnego zanieczyszczeń wydzielanych przez źródła wewnętrzne w tym innych ludzi oraz daje możliwość poprawienia jego oceny poprzez obniżenie entalpii bez konieczności obniżania temperatury powietrza w całym pomieszczeniu. Dzięki wykorzystaniu w badaniach termicznych manekinów oddychających i zastosowaniu gazów znacznikowych możliwe było określenie skuteczności wentylacji indywidualnej tzn.

oszacowanie jaki odsetek powietrza świeżego/ czystego dostaje się do sztucznych płuc manekina. Badania takie przeprowadzone zastały m.in. przez ośrodki w Stanach Zjednoczonych, Danii, Chinach i Słowenii. Ich autorzy analizowali zarówno kierunek nawiewu powietrza jak i wpływ konstrukcji nawiewników na skuteczność PV.

W swoich badaniach Faulkner i in. [39, 40, 41] badając sprawność wybranego typu nawiewnika zainstalowanego na krawędzi biurka wykorzystali manekina termicznego z funkcją oddychania oraz gaz znacznikowy SF₆. Pomiary przeprowadzono w zamkniętym pomieszczeniu, w którym utrzymywano określone stężenie SF₆ a przez nawiewnik dostarczano świeże powietrze nie zawierające gazu znacznikowego. Na podstawie stężenia gazu SF₆ w powietrzu, które pobierane było przez sztuczne płuca manekina określono sprawność wentylacji przy użyciu badanego nawiewnika w porównaniu do systemu wentylacji mieszającej rozcieńczającej zanieczyszczenia w całej kubaturze pomieszczenia. Pomiary prowadzono przy strumieniu objętości powietrza świeżego na poziomie: 12,6 m³/h; 17,3 m³/h oraz 23,4 m³/h. Skuteczność systemu wentylacji spersonalizowanej była o 50% większa w strefie oddychania w porównaniu do wentylacji mieszającej. Przeprowadzone następnie badania z udziałem ochotników oceniających odczucia cieplne podczas działania systemu PV, wykazały, że pomimo nawiewu powietrza bezpośrednio do strefy przebywania człowieka, mała wydajność i prędkość dostarczanego strumienia powietrza nie wpływały negatywnie na odczucie komfortu.

Podobne badania prowadzone były również przez zespół Melikov, Cermak i inni [72, 73]. W tym przypadku analizowano pięć różnych typów nawiewników wentylacji indywidualnej w warunkach letnich i zimowych. Rezultaty badań wykazały, iż przy zastosowaniu wydatku 54 m³/h osiągana jest najwyższa skuteczność indywidualnej ekspozycji i jest ona o 60% większa w porównaniu z wentylacją mieszającą.

Zeng i Zhao weryfikowali inny typ nawiewu indywidualnego badając jego skuteczność [118]. Stanowisko składało się z biurka z zainstalowanym nawiewnikiem PV. Na ruchomym ramieniu o średnicy 80 mm zamontowano prostokątny, aluminiowy nawiewnik o wymiarach 240x75 mm z zainstalowaną perforowaną płytą na króćcu przyłączeniowym (o perforacji średnicy 14 mm). Nawiewnik umieszczono nad głową. Ramię pozwalało na regulację kierunku nawiewu powietrza w granicach 0-45° od pionu. Do pomiarów wykorzystano manekina termicznego z funkcją oddychania oraz zastosowano gaz znacznikowy SF₆. Pomiary prowadzono w warunkach izotermicznych w temperaturze 23°C i 26°C przy

zmiennej odległości nawiewnika od twarzy manekina (15, 30 i 45 cm) oraz przy zmiennym strumieniu objętości powietrza – 18, 36, 54 i 72 m³/h. Analiza otrzymanych wyników wykazała że na skuteczność wentylacji znaczący wpływ ma odległość nawiewnika od twarzy manekina, a nie strumień objętości nawiewanego powietrza. Przy stałej odległości nawiewnika zwiększanie strumienia objętości powyżej 36 m³/h praktycznie nie wpływało na skuteczność PV. System ten osiągnął skuteczność na poziomie 40,5%, co oznacza, że powietrze inhalowane przez manekina składało się w 40,5% z powietrza dostarczanego przez PV.

Za pomocą oddychającego manekina termicznego zbadano również skuteczność wentylacji indywidualnej dla nawiewników zlokalizowanych na krawędzie biurka oraz nad monitorem komputerowym opisywanych wcześniej [67]. W komorze klimatycznej zostało umieszczone stanowisko badawcze z nawiewnikami PV. Przy biurku umieszczono manekina termicznego z funkcją oddychania. Aby wyznaczyć skuteczność systemów PV przez perforowaną podłogę dostarczane było powietrze wentylacji ogólnej z zawartością gazu znacznikowego (SF₆), którego wywiew zlokalizowana na suficie. Powietrze nawiewane przez nawiewniki PV pozbawione było wszelkich gazów znacznikowych. Natomiast do powietrza wydychanego przez sztuczne płuca manekina dozowany był drugi gaz znacznikowy N₂O. Na podstawie analizy zawartości obu gazów znacznikowych w powietrzu wdychanym przez manekina i w powietrzu otaczającym, wewnątrz komory wyznaczono skuteczność działania wentylacji indywidualnej z wykorzystaniem powyższych nawiewników. W czasie eksperymentów w komorze utrzymywano temperaturę 20°C lub 26°C, stałą wilgotność względną powietrza na poziomie 40%. Parametry powietrza dostarczanego przez PV wynosiły: 20 lub 23°C oraz strumień objętości od 18 do 90 m³/h. Doświadczenia te wykazały, że nawiewnik umieszczony bezpośrednio nad monitorem charakteryzuje się dużo mniejszą skutecznością na poziomie 10% (przy strumieniu objętości 36 m³/h) w porównaniu do nawiewnika umieszczonego na krawędzi który przy wydajności 18 i 36 m³/h gwarantował skuteczność na poziomie odpowiednio 33 i 50%.

Słoweńscy badacze przeprowadzili podobny eksperyment z wykorzystaniem oddychającego manekina termicznego i gazu znacznikowego (CO₂) badając konstrukcję o nazwie PERMICS-LOS1 [77]. Głównym elementem tej konstrukcji jest nawiewnik w postaci kratki wentylacyjnej o wymiarach 225x75 mm z dwoma regulowanymi żaluzjami. Kratka umieszczona jest w skrzynce rozprężnej, o wymiarach 800x1600 mm i wysokości 765 mm. Całość instalowana jest na krawędzi biurka od strony użytkownika. Chcąc sprawdzić

konstrukcję umieszczono biurko z zamontowanym systemem PV w komorze klimatycznej, a następnie prowadzono pomiary przy dwóch różnych położeniach żaluzji kratki wentylacyjnej (15° i 30° od osi pionowej w kierunku manekina) oraz przy strumieniu objętości powietrza $9 \text{ m}^3/\text{h}$ i $13 \text{ m}^3/\text{h}$. Badania przeprowadzono w warunkach izotermicznych przy temperaturze otoczenia ok. 25°C . Wyniki wykazały większą skuteczność systemu przy nawiewie powietrza pod kątem 30° od osi pionowej, gdzie w pierwszej minucie pomiaru stężenie gazu znacznikowego spadało o blisko 40% praktycznie niezależnie od ilości powietrza nawiewanego przez PV. W przypadku dostarczania powietrza pod kątem 15° redukcja stężenia zanieczyszczeń utrzymywała się na poziomie 33%.

Wysoka skuteczność wentylacji indywidualnej w praktyce może przyczynić się również do zapobiegania rozprzestrzenianiu się infekcji. W powietrzu wydychanym przez ludzi znajdują się cząsteczki aerozolu [15, 32] oraz cząstki respiracyjne [48], które mogą zawierać bakterie i wirusy. Jak wykazały badania [61] istnieją dowody, że rozprzestrzenianie się pewnych chorób zakaźnych związane jest z systemami wentylacji budynków. W 2007 r. opublikowano wyniki badań [79], w których sprawdzano możliwości PV pod tym kątem. W pomieszczeniu o wymiarach $4,2 \times 3,6 \times 2,5 \text{ m}$, które wentylowane było za pomocą półcylicydnego rękawa tekstylnego umieszczono dwa stanowiska biurowe wyposażone w komputery oraz lokalne oświetlenie. Doświadczenie z wykorzystaniem manekinów termicznych oddychających prowadzono przy założeniu, że jeden manekin jest zainfekowany, natomiast drugi narażony na infekcję. Powietrze wydychane przez manekina „zainfekowanego” zawierało gaz znacznikowy N_2O o określonym stężeniu. Eksperyment prowadzony był w dwóch wariantach. Pierwszy: oba manekiny posadzone zostały przy stanowiskach biurowych przy czym nawiewnik PV został zainstalowany wyłącznie przy stanowisku manekina niezainfekowanego, które znajdowało się bliżej wywiewu powietrza z pomieszczenia. Drugi: manekin zainfekowany umieszczony został bezpośrednio za siedzącym, przy swoim stanowisku wyposażonym w PV, manekinie niezainfekowanym. Oba warianty realizowane były przy działającej wentylacji ogólnej realizowanej przez nawiewnik tekstylny zapewniający $5,5 \text{ h}^{-1}$. Strumień objętości dostarczany przez wentylację indywidualną zmieniał się w granicach od 0 do $32 \text{ m}^3/\text{h}$. Wyniki pomiarów dowiodły, że zastosowanie wentylacji indywidualnej w pierwszym wariantie zmniejszyło stężenie zanieczyszczeń w powietrzu pobieranym przez sztuczne płuca sześciokrotnie przy wydajności PV $27 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz w drugim wariantcie blisko 15-krotnie przy tej samej wydajności. Ponieważ obliczenia prowadzone były w odniesieniu do stężenia zanieczyszczeń w powietrzu usuwanym z pomieszczenia, tak

znacząca poprawa jakości powietrza w drugim przypadku mogła być związana ze zwiększonym stężeniem zanieczyszczeń w tym powietrzu powodowanym umieszczeniem manekina stosunkowo blisko kratki wywiewnych. Jednak inne badania [73, 16, 18] dowodzą, że istnieje możliwość zmniejszenia stężenia zanieczyszczeń w powietrzu wdychanym, w zależności od konstrukcji PV, od 2 nawet do 50 razy.

Ochrona osób, przebywających w tym samym pomieszczeniu, przed infekcją przenoszoną drogą kropelkową była również powodem badań Cermak'a i Melikov'a [17]. Umieścili oni dwa stanowiska badawcze (w układzie jedno za drugim), w pomieszczeniu o wymiarach 5,4x4,8x2,6 m. Biurka wyposażone zostały w wentylację indywidualną oraz komputery stacjonarne i oświetlenie lokalne, a przy każdym z nich umieszczono oddychającego manekina termicznego. Wentylacja pomieszczenia realizowana było dwoma systemami: PV oraz układem nawiewników podłogowych i wywiewników sufitowych. Świeże powietrze dostarczane było przez dwa nawiewniki wentylacji indywidualnej. Znajdujący się na krawędzi biurka od strony użytkownika nawiewający powietrze pionowo do góry (VDG) lub znajdujący się nad monitorem komputerowym kierujący powietrze na twarz. Każdy z nawiewników w czasie trwania pomiarów dostarczał stały strumień objętości czystego powietrza tj. 54 m³/h. System podłogowy w zależności od wariantu 180 lub 288 m³/h. Zanieczyszczenia symulowane były za pomocą trzech gazów znacznikowych. SF₆ i N₂O zawierało powietrze wydychane przez odpowiednio pierwszego i drugiego manekina symulując biozanieczyszczenia. Trzeci gaz, CO₂ służył do analizy rozprzestrzeniania zanieczyszczeń emitowanych przez wykładziny podłogowe. Analiza stężeń poszczególnych substancji w powietrzu pobieranym przez manekiny wykazała, iż PV jest w stanie zabezpieczać użytkowników przed rozprzestrzenianiem się zarówno biozanieczyszczeń jak i zanieczyszczeniami emitowanymi przez materiały podłogowe, choć stopień ochrony zależy od konstrukcji nawiewnika. Natomiast skuteczność wentylacji indywidualnej nie zależała od lokalizacji stanowiska pracy.

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników badań można stwierdzić, iż wentylacja indywidualna jest rozwiązaniem zapewniającym odpowiednią jakość powietrza oraz wysoką skuteczność wentylacji w strefie oddychania użytkownika.

Wpływ wentylacji indywidualnej na komfort cieplny użytkownika

Oprócz wysokiej jakości powietrza, którym oddychają użytkownicy, celem stosowania PV jest również zapewnienie komfortu cieplnego wszystkim użytkownikom pomieszczenia niezależnie od ich indywidualnych preferencji, metabolizmu i zastosowanej odzieży. Jak wykazały badania Baumana [10], jak również częściowo Kaczmarczyka [56] istotny wpływ na zadowolenie użytkowników ma już fakt możliwości regulacji parametrów jaki daje PV, a nie rzeczywiste zmiany ustawień dostosowujące lokalne środowisko do chwilowych potrzeb. Tak więc główną zaletą PV jest możliwość dopasowania parametrów środowiska do indywidualnych oczekiwań, nie, jak przypuszczano wcześniej, możliwość kilkakrotnej w ciągu dnia regulacji temperatury itp.

Podobny eksperyment przeprowadzili Melikov i Knudsen [74], którzy badali wpływ, jaki ma na człowieka możliwość indywidualnej kontroli urządzeń kształtujących najbliższe jego środowisko. Przebadano 48 osób – kobiet i mężczyzn, które miały do swojej dyspozycji stanowisko pracy składające się z nawiewnika wentylacji indywidualnej w postaci ruchomego ramienia z okrągłym wylotem [13] znajdującego się na wysokości głowy użytkownika i podblatowego elementu nawiewającego powietrze poziomo w kierunku siedzenia, fotela z ogrzewanym oparciem, podblatowego panela grzejnego oraz podłogowego panela grzejnego. Do pomieszczenia, w którym prowadzony był eksperyment dostarczano stały strumień objętości powietrza wentylacyjnego ($288 \text{ m}^3/\text{h}$), który rozdzielany był na system PV i MV w zależności od ustawień osób biorących udział w badaniu. Nawiewniki systemu PV miały płynną regulację od $22 \text{ m}^3/\text{h}$ do $54 \text{ m}^3/\text{h}$, co przekładało się na prędkość powietrza w zakresie $0,22 - 0,56 \text{ m/s}$. Panele grzejne osiągały temperaturę $40^\circ\text{C} - 47^\circ\text{C}$, a użytkownik stanowiska miał możliwość ich włączenia bądź wyłączenia. W pomieszczeniu utrzymywana była temperatura powietrza otaczającego w zależności od serii pomiarowej 20°C , 22°C i 26°C . Po skończonych pomiarach ochotnicy proszeni byli o wypełnienie ankiet dotyczących odczuć cieplnych całego ciała oraz poszczególnych jego partii. W zależności od temperatury otoczenia zmieniały się preferowane ustawienia nawiewnika PV. Przy niższej temperaturze otoczenia, powietrze z PV kierowane było w większości przypadków bezpośrednio na twarz, przy temperaturze otoczenia 26°C nawiewnik przestawiany był w taki sposób, aby powietrze nawiewane było na czubek głowy. Analiza wyników pokazała, że niezależnie od temperatury otoczenia, nastąpił wyraźny wzrost akceptowalności parametrów środowiskowych przez użytkowników dzięki zastosowaniu systemu PV z możliwością regulacji.

Bauman i inni [11] również analizowali system wentylacji indywidualnej wyposażonej w kontrolę temperatury oraz ilości powietrza pod kątem zapewnienia komfortu cieplnego użytkownikowi. W biurku zainstalowano dwa nawiewniki umieszczone na blacie, jego w narożach. Nawiewniki miały możliwość obrotu o 360° w poziomie oraz regulacji poziomych żaluzji nawiewnych w granicach $\pm 30^\circ$. Powietrze do nawiewników doprowadzane było za pomocą dwóch wentylatorów o małym sprężu i regulowanej prędkości obrotowej: pierwszy wentylator dostarczał powietrze świeże doprowadzone przewodami wentylacyjnymi do skrzynki rozprężnej w suficie lub podwójnej podłodze; drugi - pobierał powietrze recyrkulacyjne z pomieszczenia, z przestrzeni podblatowej, które przepływało przez filtr wstępny. Następnie oba strumienie mieszały się i przepływały przez filtr elektrostatyczny skąd kierowane były do nawiewników. Stopień recyrkulacji kontrolowany był przez przepustnice i umożliwiał kontrolę temperatury powietrza nawiewanego. Na biurku umieszczono sterownik, za pomocą którego możliwa była regulacji parametrów powietrza – prędkości, temperatury i dodatkowo mocy promiennika grzewczego o mocy 200 W umieszczonego w okolicy stóp użytkownika. System zapewniał przepływ powietrza w ilości $72\div 252\text{ m}^3/\text{h}$, przy czym $72\text{ m}^3/\text{h}$ dostarczane było przy wyłączonych wentylatorach, tak aby zapewnić minimalne wymagania higieniczne. Dostarczany strumień objętości przekładał się na prędkość powietrza w odległości 10 cm od twarzy w zakresie $2\div 7,5\text{ m/s}$. W badaniach brało udział ośmioro ochotników – czworo używało stanowisk wyposażonych w system PV i czworo pracowało przy biurkach bez tego systemu. Wszyscy przebywali w jednym pomieszczeniu, w którym ustawione zostały wszystkich osiem stanowisk. Badania wykazały możliwość kształtowania najbliższych parametrów powietrza w stosunkowo dużym zakresie. Nawet małe ilości powietrza nawiewane przez PV miały znaczący wpływ na straty ciepła człowieka, dzięki czemu mogły znacząco wpływać na odczucia cieplne w tym na odczucie komfortu użytkowników. W okresach ciepłych system PV w strefie przebywania człowieka zapewniał temperaturę niższą o $0,5\div 1,5\text{ K}$ niższą porównaniu do stanowisk bez PV. Taki rezultat osiągnięto przy 50% wydajności systemu. Stanowiska wyposażone w indywidualny system wentylacji zapewniły użytkownikom komfort cieplny, a ponadto wykazano, że zmiana wcześniejszych ustawień odbywała się sporadycznie.

W celu zwiększenia komfortu cieplnego użytkowników opracowano również tzw. nawiewnik fotelowy dedykowany wentylacji indywidualnej, który z uwagi na konstrukcję (wąski, cylindryczny kształt z pionowym nawiewem w okolicach brody człowieka) może znaleźć zastosowanie głównie w obiektach audytoryjnych, teatrach, czy kinach. W badaniach

Niu i in. [83] przeprowadzono testy weryfikujące możliwości tych nawiewników, przy użyciu oddychającego manekina termicznego oraz ochotników umieszczonych w komorze klimatycznej, wyposażonej w klimatyzację mieszającą zapewniającą temperaturę 22°C i wilgotność 60%. Wykorzystując manekin termiczny przebadano cztery nawiewniki o kształcie prostokątnym oraz cztery okrągłe, nawiewające powietrza w zakresie 0,36 do 1,1 m³/h o temperaturze 20°C. Manekin termiczny, wyposażony w sztuczne płuca, składał się z 16 segmentów zasilanych i kontrolowanych niezależnie tak aby w czasie eksperymentu utrzymać temperaturę na powierzchni 31°C. Manekin wykonywał 17 oddechów/ min., co oznaczało wentylację sztucznych płuc na poziomie 8,5 l/min. Jako gazu znacznikowego użyto CO₂ o stężeniu 2000÷5000 ppm w zależności od ilości powietrza dostarczanego przez PV (było to dużo wyższe stężenie od stężenia CO₂ w powietrzu w pomieszczeniu wahającym się od 500÷700 ppm). Dzięki pomiarowi stężenia gazu powietrza otaczającym, nawiewanym przez PV oraz pobieranym przez płuca możliwe było określenie stopnia inhalacji powietrzem z nawiewnika PV. Badania z udziałem ludzi (8 mężczyzn i 4 kobiet) prowadzone były w analogiczny sposób, jak z manekinem termicznym, przy czym temperatura powietrza świeżego utrzymywany była w granicach 15÷18°C, a wilgotność względna 70%. Każdy z ochotników wypełniał ankietę dotyczącą odczuć cieplnych, uczucia komfortu, akceptowalności systemu. Realizacja nawiewu powietrza przy użyciu tego typu nawiewników umożliwiła redukcję inhalowanych zanieczyszczeń dochodzącą do 80%. Jednak pomimo dostarczania powietrza bezpośrednio do strefy oddychania, tak blisko nosa nie udało się wyeliminować z powietrza pobieranego przez sztuczne płuca powietrza z pomieszczenia. Biorąc pod uwagę jakość powietrza oraz zapotrzebowanie na energię do przygotowania powietrza autorzy zalecali nawiew ilości 2,9 do 5,8 m³/h. Wykazano, że osoby biorące udział w eksperymencie bardziej odczuwali zmiany ilości powietrza niż jego temperatury. Strumień powietrza powyżej 5,8 m³/h nie jest wskazany ze względu na uczucie przeciągu i dyskomfortu powodowanego prędkością. Właściwie zaprojektowana PV dzięki osiągnięciu efektu „chłodnej głowy” zapewni wyższą odczuwalną jakość powietrza i komfort cieplny, ponadto może stanowić podstawy do redukcji kosztów związanych z eksploatacją systemów klimatyzacyjnych. Jednocześnie autorzy doszli do wniosku, że w przypadku, gdy pole powierzchni wypływu powietrza z PV jest zbyt małe, wzrasta wpływ parametrów otoczenia na odczucia cieplne człowieka. W takim przypadku stosowanie nawiewnika fotelowego wskazane jest do poprawy jakości powietrza, którym oddycha człowiek, a nie do zapewnienia optymalnych odczuć cieplnych.

Weryfikacja różnego typu konstrukcji nawiewników PV prowadzona była również przez Arens [5], Cho [26], Cermak [19], Kaczmarczyka [14, 53], Tanabe [105] oraz Amai [3]. W ostatnich badaniach weryfikowano możliwości zapewnienia optymalnych odczuć ciepłych przy wykorzystaniu czterech konstrukcji nawiewnych zainstalowanych w najbliższym otoczeniu biurka. Pierwsza (TU) to konstrukcja zainstalowana pod blatem biurka, dostarczająca powietrze recyrkulacyjne bez możliwości chłodzenia lub ogrzewania, która pozwala na regulację kierunku nawiewu w granicach 0° - 90° od poziomu. Druga (PEM) składała się ze skrzynki rozprężnej umieszczonej pod biurkiem oraz panela grzejnego; dzięki odpowiednim proporcjom mieszania powietrza świeżego i recyrkulacyjnego użytkownik może dostosować zarówno temperaturę powietrza, jak i jego prędkość. Powietrze dostarczane było za pomocą stojącego na blacie nawiewnika. Trzecia konstrukcja (3DU+) to półsztywny przewód wentylacyjny podłączony do skrzynki rozprężnej i panela grzejnego, dostarczający powietrze z boku użytkownika (za jego plecami), jednocześnie podobnie, jak w PEM, istniała w tej konstrukcji możliwość regulacji temperatury oraz prędkości nawiewanego powietrza (nawiewnik tej konstrukcji analizowany był wcześniej w układzie izotermicznym w pomiarach prowadzonych przez Tanabe [105]). Czwarta konstrukcja (RCU) stanowił podobną konstrukcję do 3DU+ i składał się z półsztywnego przewodu elastycznego, wyprowadzonego w sposób umożliwiający nawiewanie powietrza bezpośrednio na plecy człowieka. Podobnie jak w 3DU+ istniała możliwość regulacji temperatury i prędkości powietrza (poprzez zmniejszenie strumienia). Dodatkowo za pomocą pilota regulacji podlegał kierunek nawiewu w granicach -27° - $+17^{\circ}$ w pionie oraz 310° w poziomie. Eksperymenty prowadzono w komorze klimatycznej, gdzie utrzymywana była temperatura powietrza 28°C w przypadku działania PV oraz 26°C w czasie wariantów porównawczych bez działającej PV. Przebadano 24 ochotników (12 mężczyzn i 12 kobiet). Każde badanie trwało 220 min. W czasie jego trwania ochotnik mógł w określonym przedziale czasowym regulować ustawienia oraz proszonym był o wypełnienie ankiet dotyczących odczuć ciepłych oraz testów psychologicznych i fizjologicznych. W warunkach wentylacji indywidualnej odczucia ciepłe ochotników zawierały się w granicach -0,5 do -0,7 w przypadku mężczyzn oraz od -0,3 do -0,4 w przypadku kobiet. Na podstawie analizy ankiet stwierdzono odczucie komfortu cieplnego u ponad 80% ochotników korzystających z PV, co stanowiło wyższy odsetek usatysfakcjonowanych niż w wariantach porównawczych, gdy wentylacja indywidualna nie była, a temperatura powietrza otaczającego była niższa i wynosiła 26°C . Ocena przepływu powietrza przez wszystkich ochotników zawierała się w granicach -0,3 - -0,4. Część osób

deklarowało uczucie dyskomfortu pomimo neutralnej ogólnej oceny odczuć cieplnych, co mogło być spowodowane odczuciem przeciągu spowodowanym nawiewanym strumieniem powietrza. Zauważono również, że mężczyźni wybierali nastawy zapewniające chłodne powietrze o dużej prędkości nawiewu, w przeciwieństwie do kobiet preferujących ciepłe powietrze o małej prędkości.

Wprowadzanie powietrza bezpośrednio do najbliższego otoczenia pracującej osoby wiąże się z ryzykiem wywołania odczucia przeciągu. Z tej przyczyny powietrze powinno być nawiewane z niewielką prędkością rzędu 0,2 m/s. Tak mała prędkości strumienia powietrza sprawia jednak, że strumień jest niestabilny i podatny na przepływy poprzeczne. Z tego powodu przeprowadzono symulacje komputerowe [43] mające na celu określenie wpływu strumienia konwekcyjnego tworzącego się wokół człowieka na strumień nawiewany przez PV oraz poprzecznych przepływów powietrza pochodzących z centralnego systemu klimatyzacyjnego. Obawiano się indukcji powietrza z pomieszczenia przez strumień konwekcyjny, jego przepływ do strefy oddychania i wypieranie czystego powietrza pochodzącego z PV. W symulacji komputerowej zastosowano trójwymiarowego, wirtualnego manekina o kobiecych kształtach i powierzchni ciała 1,594 m². Umieszczony został w pomieszczeniu o wymiarach 2,6 m x 2,2 m x 2,7 m wyposażonym w wentylację wyporową, umieszczoną przy podłodze. Nawiewnik PV zdefiniowano jako tubę o średnicy wylotu 80 mm, ułożoną pionowo z wylotem ku górze w okolicy brody manekina. Symulacje przeprowadzono dla 15 wariantów, przy różnych konfiguracjach ilości nawiewanego powietrza (2,9 m³/h, 5,8 m³/h), temperatury (18, 20, 22, 24°C), intensywności turbulencji strumienia PV (5, 10, 20%) oraz kierunku nawiewu wentylacji wyporowej (z boku, z przodu, z tyłu). Modelowanie numeryczne wykazało, że wraz ze wzrostem różnicy temperatury pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu, a temperaturą człowieka intensywniejszy staje się strumień konwekcyjny wokół człowieka, co zakłóca strumień wentylacji indywidualnej pogarszając tym samym jakość powietrza przy oddychaniu. Wykazano również, że przepływy poprzeczne pochodzące z wentylacji wyporowej zlokalizowanej z boku są wystarczające aby zakłócić przepływ PV, w taki sposób że nie dociera ono do strefy oddychania. Jednak jeśli strumienie systemu centralnego nie zakłócają strumienia konwekcyjnego wokół człowieka nie będą miały również wpływu na powietrze z pochodzące z PV. Dodatkowym wnioskiem pochodzącym z symulacji numerycznych jest fakt, że wzrost turbulencji strumienia PV powoduje intensywniejsze mieszanie z powietrzem w pomieszczeniu, co z uwagi na jakość inhalowanego powietrza nie jest wskazane. Jednocześnie dostarczanie powietrza

bezpośrednio do strefy oddychania wiąże się z ryzykiem uczucia przeciągu i dyskomfortu związanego przede wszystkim z wysuszaniem spojówek i zwiększoną częstotliwością zamykania oczu. Dlatego istotna jest weryfikacja każdego systemu PV nie tylko pod kątem skuteczności wentylacji i możliwości zapewnienia komfortu cieplnego, ale również pod kątem odczuć związanych z przeciągiem.

Wyniki badań prowadzonych przez Melikov i in. [73, 102] pokazały, że lokalnie nawiewany strumień powietrza o małej turbulencji charakteryzuje się dłuższym jądrem dzięki czemu zapewnia wyższą jakość powietrza, którym oddycha człowiek. Jednak stopień turbulencji strumienia nawiewanego wpływa na odczucie przeciągu a tym samym może oddziaływać na odczucia cieplne użytkownika. Wnioski, jakie zostały wyciągnięte przez Fangera w 1988r. dowodziły, że strumień powietrza nawiewany z większą turbulencją może powodować częstsze odczucie przeciągu niż strumień o małej turbulencji nawiewany z tą samą prędkością i o tej samej temperaturze [38]. Zjawisko to może wiązać się ze zwiększoną wymianą ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem wraz ze wzrostem turbulencji powietrza wokół niego [42]. Dodatkowo analiza wpływu częstotliwości fluktuacji powietrza na odczucia osób przeprowadzona przez Yang [116] pokazała, że w warunkach letnich częstotliwość 0,2 Hz była najkorzystniej odbierana przez uczestniczące w doświadczeniu osoby w odniesieniu do częstotliwości 0,1 Hz i 0,3 Hz. Odczucie przeciągu może również być zwiększane poprzez nawiew chłodnego powietrza w okolice głowy, a związana z tym asymetria cieplna ma istotny wpływ na odczucie komforty cieplnego całego ciała [119]. Sun i in. [102] zbadali wpływ turbulencji powietrza nawiewanego przez system PV na odczucie lokalnego komfortu cieplnego oraz komfortu całego ciała. Ich wyniki potwierdziły, że strumienie o małej turbulencji charakteryzują się wyraźnym, dłuższym jądrem co skutkuje większą prędkością powietrza w regionie głowy człowieka oraz mniejszą różnicą temperatury pomiędzy powietrzem u wylotu nawiewnika i tym docierającym do użytkownika. Nie stwierdzili oni jednak wpływu turbulencji na odczucia cieplne całego ciała.

Analogiczne badania przeprowadzone zostały dla środowiska ciepłego [114]. W warunkach izotermicznych, w komorze klimatycznej prowadzone były pomiary w temperaturze 26 - 30,5°C i wilgotności względnej powietrza 35 i 65%. W pomiarach brało udział 108 ochotników (18 kobiet i 88 mężczyzn) w wieku ok. 20 lat o izolacyjności cieplnej odzieży ok. 0,6 clo. Strumień powietrza o turbulencji 25% i 40% nawiewany był w okolice klatki piersiowej i kolan, w taki sposób aby omijać najbardziej wrażliwe na przeciąg okolice twarzy i szyi. Uczestnicy po wejściu do komory klimatycznej poddawani byli oddziaływaniu

strumienia powietrza o turbulencji 25%, a następnie 40%. Każdy pomiar trwał 30 min., a następnie ochotnik proszony było wypełnienie ankiety dotyczącej odczuć cieplnych. Wyniki wykazały wzrost preferowanej prędkości powietrza wraz ze wzrostem temperatury. Najmniejszy odsetek osób odczuwających przeciąg uzyskano przy temperaturze odczuwalnej na poziomie 27,5°C i wilgotności względnej 35% i wynosił ok. 3%. Wartość turbulencji (25, 40%) w tym przypadku miała znikomy wpływ na to odczucie. Większe różnice zaobserwowano przy wilgotności względnej 65%, gdzie wyraźnie niższy odsetek osób odczuwających przeciąg pojawiał się w przypadku 40% turbulencji (średnio 20%) i utrzymywał się na poziomie ok. 7% niższym w całym zakresie temperaturowym w porównaniu do strumienia o turbulencji 25%. Jednak większość uczestników po odpowiednim dostosowaniu prędkości powietrza deklarowała odczucie komfortu cieplnego.

Analizując wyniki przedstawionych badań widać, że stopień turbulencji strumienia powietrza dostarczanego bezpośrednio do strefy oddychania człowieka przez system wentylacji osobistej wpływa zarówno na jakość powietrza którym oddycha człowiek, jak i jego odczucia cieplne. Niższa wartość turbulencji zapewnia wyższą jakość powietrza w strefie oddychania z powodu małego stopnia mieszania się powietrza czystego z powietrzem otaczającym (zanieczyszczonym). Może jednak wiązać się z uczuciem przeciągu powodowanego większą prędkością powietrza. Należy więc dążyć do ustalenia optymalnych konfiguracji stopnia turbulencji, prędkości nawiewanego powietrza, tak aby poprawiając jakość powietrza zapewnić jednocześnie najkorzystniejsze odczucia termiczne.

Wydajność pracy przy zastosowaniu wentylacji indywidualnej

Zmniejszenie odsetka niezadowolonych (PPD) z warunków panujących w pomieszczeniu wymaga zapewnienia każdemu z użytkowników możliwości przystosowania najbliższego środowiska do własnych chwilowych potrzeb. Kroner i Stark-Martin w swoich badaniach [59] wykazali, że możliwość kontroli parametrów lokalnego środowiska wpływa na wzrost wydajności pracowników. Podobne wnioski wyciągnięto z wyników eksperymentu przeprowadzonego przez Baumana i in. [10]. Dowiedziono, że kontrola parametrów powietrza dostarczanego przez PV ma pozytywny wpływ na stopień zadowolenia użytkowników. Opublikowane w 1996 wyniki badań Wyon [111] pokazały, że w warunkach biurowych, gdzie każdy pracownik mógł dostosować swój ubiór według własnych potrzeb, indywidualna regulacja temperatury powietrza w zakresie $\pm 2,3$ K w odniesieniu do

temperatury uważanej powszechnie za optymalną w danym sezonie umożliwi redukcję wskaźnika PPD do 5%. Powyższe badania [59, 10] ze względu na konstrukcję stanowisk nie dawały możliwości regulacji położenia nawiewników PV. Kolejne eksperymenty [56], których celem było określenie reakcji człowieka na system PV przy dostarczaniu powietrza o różnej jakości, temperaturze i czystości weryfikowały nie tylko ustawienia temperatury i strumienia powietrza, ale również kierunku nawiewu. W pomiarach brało udział trzydziestu ochotników, którzy symulowali pracę biurową w pomieszczeniu, w którym zainstalowano sześć stanowisk z wentylacją indywidualną. Przy każdym stanowisku, na ruchomym ramieniu, zainstalowano nawiewnik dostarczający powietrze. Stworzona konstrukcja [117] pozwalała na regulację kierunku nawiewu powietrza, położenia nawiewnika oraz regulację ilości powietrza nawiewanego przez system PV. Ochotnicy przez cały czas trwania eksperymentu mogli dowolnie regulować ustawienia nawiewnika oraz ilość powietrza wentylacyjnego dostarczanego przez nawiewnik PV, nie mieli jednak możliwości regulacji temperatury powietrza. Wszystkie warianty eksperymentu prowadzony były w temperaturze otoczenia 23°C. System PV dostarczał powietrze świeże o temperaturze 20°C lub 23°C, bądź powietrze recyrkulacyjne. Dla porównania przeprowadzono serię, w której działała wyłącznie wentylacja mieszająca. W każdym przypadku ilość powietrza wentylacyjnego była stała i wynosiła 324 m³/h. Powietrze było dzielone na pomiędzy wentylację indywidualną i mieszającą. Ochotnicy, którzy czasie badań wykonywali prace biurowe proszeni byli o wypełnienie ankiet dotyczących jakości powietrza, komfortu cieplnego i odczucia przeciągu. Wykazano, że wszystkie osoby biorące udział w badaniach dokonywały zmian w ustawieniach nawiewnika. Preferowano ustawienia nawiewnika przed sobą (96%) w odległości 30-40 cm (50%). Niezależnie od jakości powietrza wentylacyjnego zakres preferowanych przez ochotników ilości powietrza dostarczanych przez nawiewnik PV wynosił od 11 do 54 m³/h.

Bazując na wynikach wcześniejszych pomiarów dotyczących wydajności pracy [112], prowadzonych na grupie 200 pracowników biurowych, które wykazały, że zapewnienie użytkownikom indywidualnej kontroli środowiska wewnętrznego w zakresie odpowiadającym zmianie temperatury powietrza wewnętrznego w granicach: ± 2 K zapewni satysfakcję ponad 90% osób, $\pm 2,3$ K umożliwi zadowolenie ponad 95% osób, a w granicach ± 3 K zapewni osiągnięcie satysfakcji z warunków cieplnych 99% użytkowników pomieszczenia, Tsuzuki [108] zweryfikował trzy systemy PV. Sprawdzono je pod względem możliwości zapewnienia użytkownikom zbliżonego lub takiego samego stopnia kontroli jak w

badaniach [112] chcąc ustalić odpowiednie parametry powierza nawiewanego, jego kierunek oraz temperaturę względem pomieszczenia. Wszystkie pomiary przeprowadzono w komorze klimatycznej, w której umieszczono cztery stanowiska do pracy biurowej o wymiarach 2,3x1,9m o wysokości 1,7m z otwartymi drzwiami. Wewnątrz trzech stanowisk znajdowało się biurko oraz elementy symulujące zyski ciepła pochodzące od komputera oraz zainstalowano po jednym z trzech badanych systemów PV: PEM (*The Personal Environmental Module*) składający się z dwóch nawiewników umieszczonych 0,3m na blatem biurka w jego narożnikach. Powietrze dostarczane przez te nawiewniki stanowi mieszaninę powietrza świeżego oraz powietrza recyrkulacyjnego pobieranego bezpośrednio spod blatu biurka, w proporcjach umożliwiającą osiągnięcie zadanej temperatury. Konstrukcja ta umożliwia regulację zarówno ilości powietrza (22-255 m³/h) jak i kierunku nawiewu w zakresie 360° w poziomie oraz ±30° w pionie. Dodatkowo na podłodze pod biurkiem umieszczony został panel grzewczy o mocy 200W; CDESK (*The ClimaDesk*) układ o zmiennej ilości powietrza dostarczanego użytkownikowi (0-25 m³/h) przez dwa nawiewniki zlokalizowane pod blatem biurka w odległości 0,6 m od przedniej krawędzi oraz trzeci znajdujący się na krawędzi nawiewający powietrze ku górze pod kątem 7° od pionu. Całość uzupełnia panel grzewczy o wymiarach 0,6x0,8 m o mocy 200 W zainstalowany nad udami użytkownika, osiągający maksimum 50°C; TAM - konstrukcja o wymiarach 0,6x0,6 m montowana w systemach dostarczających powietrze w przestrzeni podwójnej podłogi o modułowej budowie. Układ ten można instalować w dowolnym miejscu poprzez umieszczenie go miejscu modułu podłogowego. Moduł nawiewny posiada wbudowany wentylator o zmiennej wydajności dostarczający od 155-306 m³/h przez szczeliny nawiewne regulujące kierunek nawiewu powietrza w zakresie 40° w pionie oraz 360° w poziomie. Całość pomiarów przeprowadzana była przy zmiennych wartościach temperatury powietrza nawiewanego przez PV i otoczenia (19-25°C) z wykorzystaniem 16-segmentowego manekina termicznego. Analiza wyników dowiodła, że każdy z tych systemów jest zdolny zmienić parametry powietrza w pomieszczeniu w stopniu wpływającym na całkowite straty ciepła odpowiadające zmianie temperatury o 3-9 K, a tym samym zapewnić warunki stawiane tym systemom w badaniach [112]. Przy czym największe efekty osiągnano z użyciem PEM, a następnie TAM i ClimaDesk.

Oszczędność energii przy zastosowaniu PV

Wentylację indywidualną (PV) weryfikowano nie tylko z uwagi na jakość powietrza, również ważna jest możliwość zapewnienia komfortu cieplnego każdemu użytkownikowi. Dodatkowo PV, dzięki dostarczaniu powietrza bezpośrednio do najbliższego otoczenia pracującego człowieka i zapewnianiu odpowiednich parametrów powietrza tylko strefie pracy, potencjalnie daje możliwość zmniejszenia zapotrzebowania na energię do przygotowania powietrza. Weryfikację wszystkich trzech elementów podjęto w pomiarach PV w warunkach klimatu tropikalnego o wysokiej temperaturze powietrza zewnętrznego i wysokiej wilgotności [100]. W badaniach brało udział jedenastu ochotników, którzy poddani zostali 17 różnym kombinacjom temperatury powietrza nawiewanego, otaczającego oraz nawiewu powietrza. Eksperyment prowadzony był w pomieszczeniu o kontrolowanych parametrach powietrza, w którym umieszczono sześć stanowisk do pracy biurowej wyposażonej w nawiewniki PV umieszczone na ruchomym ramieniu nad monitorem komputerowym. Nawiewnik, podobnie jak w innych badaniach, miał postać prostokąta o wymiarach 240x75 mm o perforowanym panelu nawiewnym z otworami o średnicy 15 mm. Wentylacja indywidualna dostarczała tylko świeże powietrze w ilościach 25,2, 39,6 lub 54 m³/h. Wentylacja mieszająca dostarczała jedynie do 10% powietrza świeżego, resztę stanowiło powietrze recyrkulacyjne. Serie pomiarowe prowadzone były dla różnych kombinacji temperatury powietrza otaczającego (23°C, 26°C) oraz temperatury powietrza nawiewanego (20, 23, 26°C) przy działającej wentylacji indywidualnej lub tylko mieszającej. Wilgotność względna utrzymywała się na poziomie 50-70%. Wszystkie badane osoby proszone były o wypełnienie ankiet pozwalających na subiektywną ocenę odczuwalnej jakości powietrza, symptomów SBS i ich intensywności oraz odczuć cieplnych wykorzystując liniowe skale opracowane w DTU. Dodatkowo mierzona była skuteczność PV przy pomocy gazu znacznikowego (SF₆) dozowanego w sześciu wyznaczonych punktach pomieszczenia. Dzięki badaniom wykazano wzrost odczuwalnej jakości powietrza oraz zadowolenia z odczuć cieplnych o odpowiednio 64% i 58% podczas pracy systemu PV, w porównaniu do wentylacji realizowanej przez nawiew sufitowy. Wyniki te są częściowo efektem oddychania powietrzem o niższej temperaturze (2-5 K), co jest powodowane dostarczaniem powietrza bezpośrednio do strefy oddychania zanim dojdzie do jego ogrzania. Ponadto PV zapewnia wyższą skuteczność wentylacji o blisko 50% w porównaniu do MV. Udowodniono również, że wykorzystanie ogólnego systemu klimatyzacyjnego wspomaganego przez PV nie tylko

poprawia odczuwalną jakość powietrza wewnętrznego i odczucia ciepłe, ale również daje możliwość redukcji zużycia energii na przygotowanie powietrza o 15-30%.

Ponadto wentylacja indywidualna może być rozwiązaniem korzystnym również ze względu na oszczędność energii zużywanej w czasie eksploatacji budynków. Zgodnie z zapisami „Dyrektywy Energetycznej” [33] oraz normy PN-EN 15251 [89] ocena energetyczna obiektu musi być prowadzona w odniesieniu do warunków środowiska panującego wewnątrz budynku. Zastosowanie systemu PV w połączeniu z niskoemisyjnymi materiałami budowlanymi i skuteczną metodą oczyszczania powietrza, stwarza możliwość obniżenia kosztów eksploatacji budynków, przy zachowaniu komfortowych warunków mikroklimatu cieplnego i jakość powietrza w strefie oddychania. Jak pokazują analizy [22] i wyniki badań [97, 98] zastosowanie PV poprzez zmniejszenie wymaganego strumienia objętości powietrza wentylacyjnego oraz zwiększenie temperatury otoczenia w okresie letnim daje możliwość redukcji zapotrzebowania na moc chłodniczą dochodzącą do 50%.

5. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Wyznaczenie i wykazanie zależności pomiędzy odpowiednimi kombinacjami temperatury i kierunku nawiewu powietrza, a odczuciami cieplnymi w tym poczuciu komfortu cieplnego wymagało skonstruowania odpowiedniego stanowiska pomiarowego oraz przeprowadzenia serii pomiarowych przy precyzyjnie kontrolowanych, stałych w czasie parametrach środowiska i dostarczanego powietrza. W tym celu skonstruowano system wentylacji indywidualnej zintegrowany z biurkiem, umożliwiający dostarczanie świeżego powietrza bezpośrednio do strefy oddychania użytkownika oraz w okolice kostek. Tak opracowane stanowisko zostało następnie zainstalowane w komorze klimatycznej, gdzie dokładnie kontrolowano parametry otoczenia. W celu określenia obiektywnego wpływu PV na człowieka w badaniach zastosowano 16-segmentowy manekin termiczny, który umożliwił pomiar temperatury na powierzchni każdego segmentu. Następnie wrażenia cieplne oceniane były przez 20 ochotników biorących udział w badaniach, którzy wypełniali kwestionariusze związane z subiektywnymi odczuciami cieplnymi. Ze względu na aklimatyzację zakres optymalnych temperatury dla okresu letniego i zimowego jest różny w związku z tym symulacje prowadzono dla lata i zimy odpowiednio w lutym i maju, ze względu na aklimatyzację organizmu ludzkiego. Uczestnicy i manekin w czasie eksperymentów mieli odpowiednio dostosowaną do warunków panujących na zewnątrz izolacyjność cieplną odzieży. Ponieważ prowadzone badania były badaniami modelowymi, skoncentrowanymi na określeniu warunków komfortu cieplnego nie uwzględniono wpływu odczuwalnej jakości powietrza oraz zastosowana stała wydajność instalacji PV (72 m³/h; 20 l/s), a tym samym stałą prędkość powietrza.

Scenariusz prowadzonych badań oraz wszystkie urządzenia i aparatura użyta w badaniach zostały opisane w dalszej części tego rozdziału.

5.1. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko pomiarowe składało się ze specjalnie skonstruowanego na potrzeby badań biurka z wbudowanymi nawiewnikami kierującymi przygotowane powietrze na twarz lub kostki użytkownika (rys.5.1.). Nawiewniki zainstalowano na wysokości głowy oraz kostek siedzącej osoby, w środkowej części biurka. Zastosowano kratki wentylacyjne o ruchomych żaluzjach poziomych umożliwiających zmianę kierunku nawiewanego powietrza w

płaszczyźnie poziomej w granicach $\pm 45^\circ$. Wykorzystanie poziomych żaluzji kierunkowych zapewniło dużą elastyczność stanowiska dzięki możliwości kierowania nawiewanego powietrza bezpośrednio na twarz niezależnie od temperatury powietrza oraz wysokości osoby siedzącej przy biurku. W celu wyrównania profili prędkości wypływającego strumienia w obu nawiewnikach zastosowano skrzynki rozprężne i deflektory. Dobór kratki przeprowadzony był przy założeniu osiągnięcia prędkości ok. $0,35 \div 0,45$ m/s na krawędzie biurka tj. w strefie, gdzie strumień dociera do osoby siedzącej. W podwójnej tylnej ścianie biurka zlokalizowany został zespół urządzeń grzewczo - chłodzących przygotowujących powietrze dostarczane przez biurko. Wykorzystane zostało zjawisko termoelektryczne, co zapewniło prostą regulację oraz małą bezwładność układu (rys.5.2.).



Rys.5.1. Skonstruowane na potrzeby badań biurko ze zintegrowaną instalacją wentylacji indywidualnej.

Fig.5.1. Testing stand with build in PV system used in measurements.

Temperatura powietrza nawiewanego przez system PV kontrolowana była za pomocą zespołu urządzeń zasilanych elektrycznie. Dostarczane świeże powietrze kierowane było na elementy grzewczo – chłodzące, a następnie na przepustnicę kierującą strumień do górnej lub dolnej kratki wentylacyjnej w zależności od potrzeb [25].

W celu kontroli temperatury powietrza dostarczanego przez system PV stanowisko zostało wyposażone w pięć czujników temperatury typu Pt1000. Trzy zanurzeniowe mierzące temperaturę przed i za urządzeniami grzewczo – chłodzącymi oraz dwa powierzchniowe kontrolujące temperaturę powierzchni elementów chłodzących i grzewczych.



Rys.5.2. Zespół urządzeń przygotowujących powietrze nawiewane przez system PV.

Fig.5.2. Back of testing stand with air handling devices for PV system.

Pomiar strumienia objętościowego dostarczanego powietrza mierzony był za pomocą ostro krawędziowej kryzy pomiarowej wykonanej zgodnie z normą PN ISO 5221 [92]. Pomiar strumienia objętości powietrza prowadzony był przez cały czas trwania doświadczeń.

W czasie badań przez system wentylacji indywidualnej dostarczana była stała ilość powietrza świeżego $72 \text{ m}^3/\text{h}$ (20 l/s), które następnie było, filtrowane i odpowiednio przygotowywane.

5.2. APARATURA SYMULACYJNA I POMIAROWA STOSOWANA W BADANIACH

Komora klimatyczna

Badania z udziałem ochotników prowadzono w komorze klimatycznej (rys.5.3.), która znajduje się w Pracowni Obciążeń Termicznych CIOP-PIB i posiada następujące parametry techniczne: wymiary wewnętrzne komory: 2,5 x 3,0 x 3,0 m. Parametry pracy komory: zakres temperatury: - 40 °C ÷ +70°C, odchylenie od ustalonej wartości: ± 0.5 °C (w czasie), ± 1.0 °C (w przestrzeni); zakres wilgotności względnej: ..20% ÷ 90%; zakres prędkości powietrza: 0.1 ÷ 3 m/s.



Rys.5.3. Komora klimatyczna (widok zewnętrzny).

Fig.5.3. Climatic chamber (outsider view).

W komorze prowadzone są badania z udziałem ochotników lub na manekinie termicznym. Układ posiada możliwość centralnego doprowadzenia świeżego powietrza do wnętrza wraz powietrzem zapewniającym utrzymanie odpowiednich parametrów. Strumień objętości

świeżego powietrza w takim przypadku może wynieść od 50 do 100 m³/h. Jednak z uwagi na charakter prowadzonych badań świeże powietrze dostarczane było wyłącznie przy użyciu nawiewników systemu wentylacji indywidualnej, a parametry powietrza komorze klimatycznej utrzymywane były z wykorzystaniem powietrza recyrkulacyjnego. W ramach pracy, w komorze klimatycznej odzwierciedlono określone warunki środowiska w celu zbadania – na podstawie ankiet - ich wpływu na odczucia cieplne ochotników. Stanowisko badawcze do prowadzenia testów przedstawiono na rys. 5.4.



Rys.5.4. Stanowisko do badań z udziałem ochotników i manekina termicznego umieszczone w komorze klimatycznej.

Fig.5.4. Testing stand in climatic chamber prepared for carrying out research.

Manekin termiczny

Wszystkie serie pomiarowe wykonano z wykorzystaniem 16-segmentowego manekina termicznego (Diana), który jest żeńskim manekinem przeznaczony do badania jawnej wymiany ciepła na stanowiskach zarówno statycznych i ruchomych. Zastosowanie manekina termicznego umożliwiło symulację i pomiar wymiany ciepła między człowiekiem a jego

otoczeniem cieplnym w sposób znacznie dokładniejszy niż jest to możliwe do osiągnięcia w bezpośrednich badaniach z udziałem ludzi. Podczas wszystkich pomiarów manekin termiczny umieszczony był w pozycji siedzącej przy biurku (rys.5.4.).

Badania prowadzono przy założeniu dwóch wartości izolacyjności cieplnej zastosowanej odzieży, tj.: „odzieży letniej” i „odzieży zimowej” oraz w wariancie z nagim manekinem. Podczas pomiarów w „odzieży letniej” manekin ubrany był w: białą bieliznę, koszulę, cienkie spodnie, obuwie. W czasie symulacji okresu zimowego manekin ubrany był w: białą bieliznę, podkoszulek, koszulę, sweter, ciepłe spodnie i półbuty.

Tab.5.1. Izolacyjność cieplna zestawów odzieży (m^2K/W) określona dla poszczególnych segmentach manekina termicznego.

Tab.5.1. Clothing thermal insulation (m^2K/W) for particular segments of thermal manikin.

Segment	Odzież zimowa [clo]	Odzież letnia [clo]
Lewa stopa	0,167	0,125
Prawa stopa	0,159	0,112
Lewa noga	0,153	0,163
Prawa noga	0,138	0,162
Lewe udo	0,195	0,206
Prawe udo	0,175	0,206
Biodra	0,219	0,280
Głowa	0,0926	0,085
Lewa dłoń	0,094	0,070
Prawa dłoń	0,0696	0,100
Lewe przedramię	0,158	0,112
Prawe przedramię	0,142	0,126
Lewe ramię	0,167	0,140
Prawe ramię	0,171	0,137
Klatka piersiowa	0,283	0,211
Plecy	0,293	0,181
Całe ciało	0,169	0,154

Przed badaniami określono izolacyjność zastosowanego zestawu odzieży dla manekina termicznego znajdującego się w pozycji siedzącej na krześle, zgodnie z ISO 9920:2007 [91]. W obu przypadkach odzież dokładnie przywierała do powierzchni manekina, nie tworzyły się dodatkowe pustki powietrzne, mogące powodować dodatkową izolację przy wymianie ciepła z otoczeniem. Wartości izolacyjności odzieży dla poszczególnych segmentów manekina termicznego przedstawiono w tab.5.1.

Mierniki mikroklimatu

Kontrola warunków środowiska modelowanych przez komorę klimatyczną została zapewniona przez zestaw mierników do pomiarów parametrów powietrza – rys.5.5.



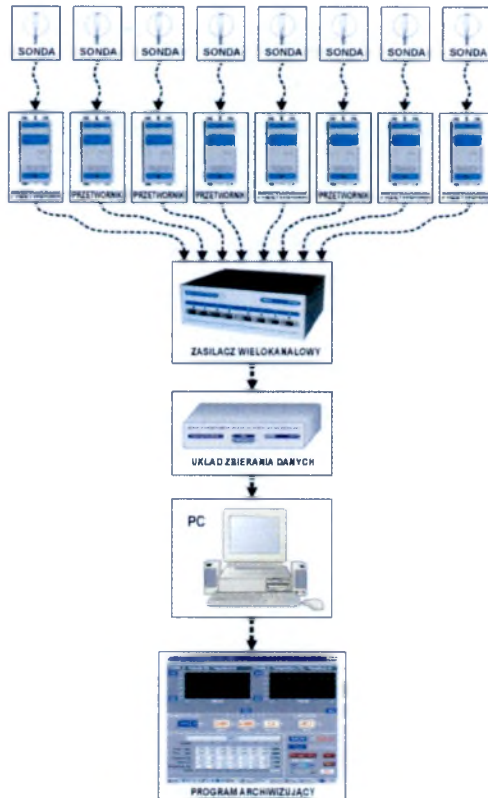
Rys.5.5. Miernik mikroklimatu.

Fig.5.5. Microclimate measuring instrument.

Sondy do pomiaru prędkości i temperatury powietrza

Charakterystykę nawiewnika zastosowanego w stanowisku badawczym wyznaczono za pomocą systemu HT-400 firmy Sensor Electrics składającego się z zestawu ośmiu termooanemometrycznych, bezkierunkowych (sferycznych) sond do pomiaru prędkości oraz

temperatury powietrza. Elementy pomiarowe wyposażone były w przetworniki prędkości i temperatury HT-428 połączone z wielokanałową jednostką zasilającą HT-470, przekazującą wartość poszczególnych wielkości pomiarowych do układu zbierania danych połączonego z komputerem. Odczyty oraz archiwizacja danych pomiarowych prowadzona była przy użyciu komputera wyposażonego w program wchodzący w skład systemu. Schemat blokowy zestawu pomiarowego przedstawiono na rys.5.6. Sondy pomiarowe zawierały kuliste, bezkierunkowe czujniki prędkości o średnicy 2 mm oraz czujniki temperatury. Sondy 1 – 4 pozwalały na pomiar prędkości powietrza w zakresie od 0,05m/s do 10m/s, natomiast sonda 5 i 6 w zakresie od 0,05m/s do 5m/s. System zapewniał także automatyczną kompensację temperatury powietrza pozwalając na pomiar w zakresie od -10°C do $+50^{\circ}\text{C}$.



Rys.5.6. Sonda pomiarowa HT – 412 oraz schemat systemu HT – 400.

Fig.5.6. Spheric meter HT – 412 and HT – 400 system.

W badaniach użyty został wielokanałowy zasilacz HT – 430 pozwalający na podłączenie maksymalnie ośmiu sond pomiarowych oraz moduł zbierania danych HT – 470. System obsługiwany był za pomocą komputera PC będącego także narzędziem do gromadzenia danych pomiarowych. Zestaw do rejestracji danych połączony z przetwornikami okablowaniem znajdował się w położeniu nie zakłócającym rozwoju strumienia.

Szczegółowe dane systemu pomiarowego HT-400 firmy Sensor Electronic przedstawiono w tabeli 5.2.

Tab.5.2. Dane dotyczące systemu pomiarowego.

Tab.5.2. Measurement system date.

Parametr	Zakres/dokładność
Czujniki prędkości, sonda HT-412, przetwornik HT-428-0	anemometryczne, sferyczne, średnica równa 2 mm
Zakres pomiarowy prędkości	0,05 ÷ 1m/s
Dokładność	0,02m/s ± 1%(0,05 ÷ 1m/s) ±3% (1 ÷ 10m/s)
Częstotliwość pasma przenoszenia	>1Hz(typ. 1,5Hz)
zakres kompensacji temperatury	-10 ÷ 50 °C
Błąd kompensacji temperatury	<±15%
Zakres pomiarowy temperatury	0 ÷ 50°C
Dokładność	±0,3°C
Wyjście analogowe	0-20mA
Moduł akwizycji danych HT-480 wejście analogowe liczba kanałów rozdzielczość przetwornika A/D rezystancja wejściowa	0-5V 8 12bit 20MΩ
Interfejs	RS232/485

Kamera termowizyjna

W celu wykonania wizualizacji strumienia nawiewanego powietrza wykorzystano kamerę termowizyjną firmy FLIR model SC660 wyposażoną w obiektyw szerokokątny (rys.5.7.).



Rys.5.7. Kamera termowizyjna model SC660 firmy FLIR [65].

Fig.5.7. Thermographic camera model SC660 FLIR [65].

Dane techniczne dotyczące obrazowania i dokładności przedstawiono w tabeli 5.3.

Tab.5.3. Dane techniczne kamery termowizyjnej SC660 firmy FLIR [64].

Tab.5.3. Technical data of thermographic camera SC660 FLIR [64].

Parametr	Zakres/dokładność
ZOBRAZOWANIE	
<u>W podczerwieni</u>	
Pole widzenia/min. ogniskowa	24x18° /0.3 m
Rozdzielczość przestrzenna (IFOV)	0,65 mrad
Czułość termiczna	45 mK przy 30°C
Częstotliwość obrazu	30 Hz bez przeplotu
Ostrość regulacja	automatyczna lub ręczna
Zoom elektroniczny/ przesuw obrazu	1- 8 x, ciągły, z funkcją przesuwu

Rodzaj detektora	matryca niechłodzonych detektorów mikrobolometrycznych (FPA), 640 x 480 pikseli
Zakres widmowy	7.5 - 13 μ m
Wzmocnienie kontrastu	zwykle, silne
<u>W świetle widzialnym</u>	
Wbudowana kamera wideo	3,2 Mpikseli, kolorowa, z wbudowanym
Standardowy obiektyw	celownikiem laserowym, wbudowana lampa, wymienne obiektywy F=8 mm / FOV 32°
POMIAR	
Zakres temperatury	-40°C to +1500°C, w 3 zakresach; do +2000°C
Dokładność	$\pm 1^\circ\text{C}$ lub $\pm 1\%$ odczytu dla obiektów o temperaturze w zakresie od +5°C do 120°C, w środowisku o temperaturze od +9°C do 35°C; w innych przypadkach $\pm 2^\circ\text{C}$ lub $\pm 2\%$.
PARAMETRY ŚRODOWISKOWE	
Zakres temperatury pracy	Od -15°C do +50°C
Zakres temperatur przechowywania	Od -40°C do +70°C
Wilgotność względna przy pracy i przechowywaniu	10% do 95%, bez kondensacji

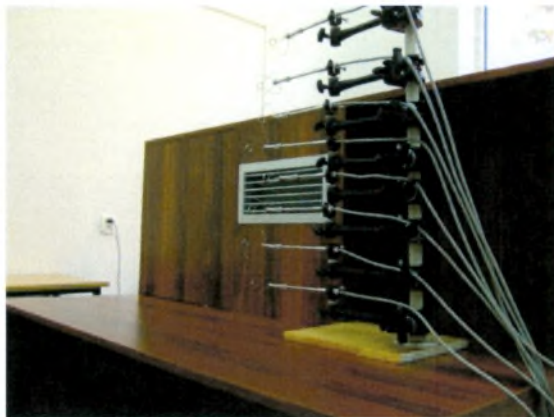
5.3. CHARAKTERYSTYKA NAWIEWANEGO STRUMIENIA POWIETRZA

Pomiar prędkości i temperatury strumienia powietrza odbywał się za pomocą siedmiu sond umieszczonych na ruchomym statywie pomiarowym o wysokości 1 m (rys.5.8.).

Ósma sonda służyła do pomiaru temperatury otoczenia. Dodatkowo pomiary powtórzono z wykorzystaniem kamery termowizyjnej oraz ekranu w postaci przepuszczalnej tkaniny syntetycznej ustawionej w osi strumienia. Pomiary wykonano przy rozstawie sond 8 cm zgodnie z punktami pomiarowymi przedstawionymi na schemacie (rys.5.9.), przy siatce pomiarowej w płaszczyźnie poziomej równej 8 cm w poprzek strumienia oraz 10 cm wzdłuż strumienia.

Pomiary obydwoma metodami prowadzona były w kilku wariantach dla różnicy temperatury pomiędzy powietrzem nawiewanym i otaczającym odpowiednio -4 K, -2 K, -1 K,

+1K, 0K, +2K, +4K i +6K odpowiadającym różnicom uzyskiwanym podczas właściwych badań z udziałem ludzi i manekina.



Rys.5.8. Statyw pomiarowy z rozmieszczonymi sondami.

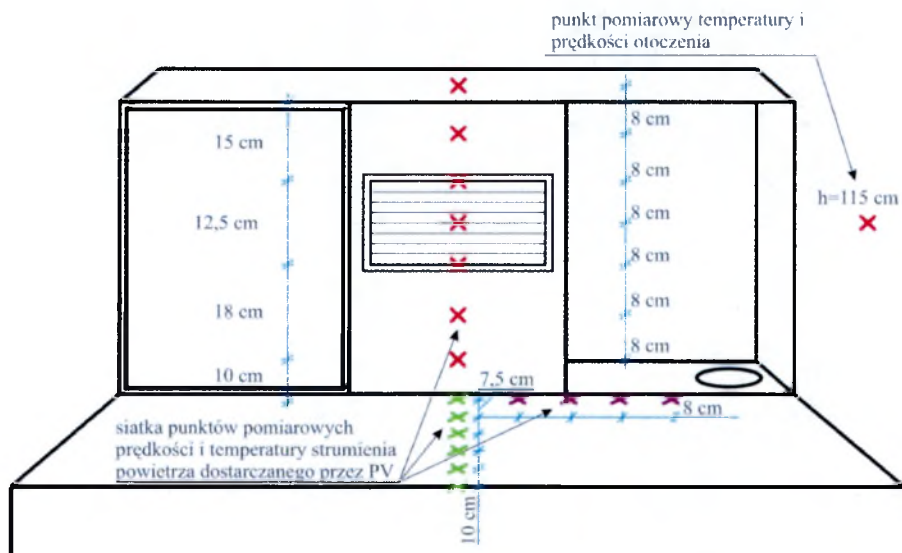
Fig.5.8. Stand with measuring instruments.

W celu wizualizacji temperatury powietrza zastosowano ekran wykonany z gęsto tkanej włókniny z tworzywa sztucznego o wymiarach 55x300 cm. Zastosowanie cienkiego, przepuszczalnego tworzywa miało na celu zminimalizowanie bezwładności cieplnej materiału oraz oddziaływania ekranu na badany strumień.

Ekran został usytuowany równolegle do nawiewanego strumienia powietrza w jego pionowej osi i rozciągał się od nawiewnika do oddalonego o 3,0 m statywu wsporcze. Kamera termowizyjna umieszczona została dokładnie prostopadle do kierunku przepływu powietrza [24].

Zadaniem przeprowadzonych pomiarów było przede wszystkim określenie prędkości powietrza, z jaką docierało świeże powietrze do użytkownika. Prędkość i temperatura nawiewanego strumienia wpływa bezpośrednio na wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, a tym samym na odczucia ciepłe. Jednocześnie z uwagi na dostarczanie powietrza bezpośrednio do strefy oddychania człowieka, nadmierna jej wartość niezależnie od

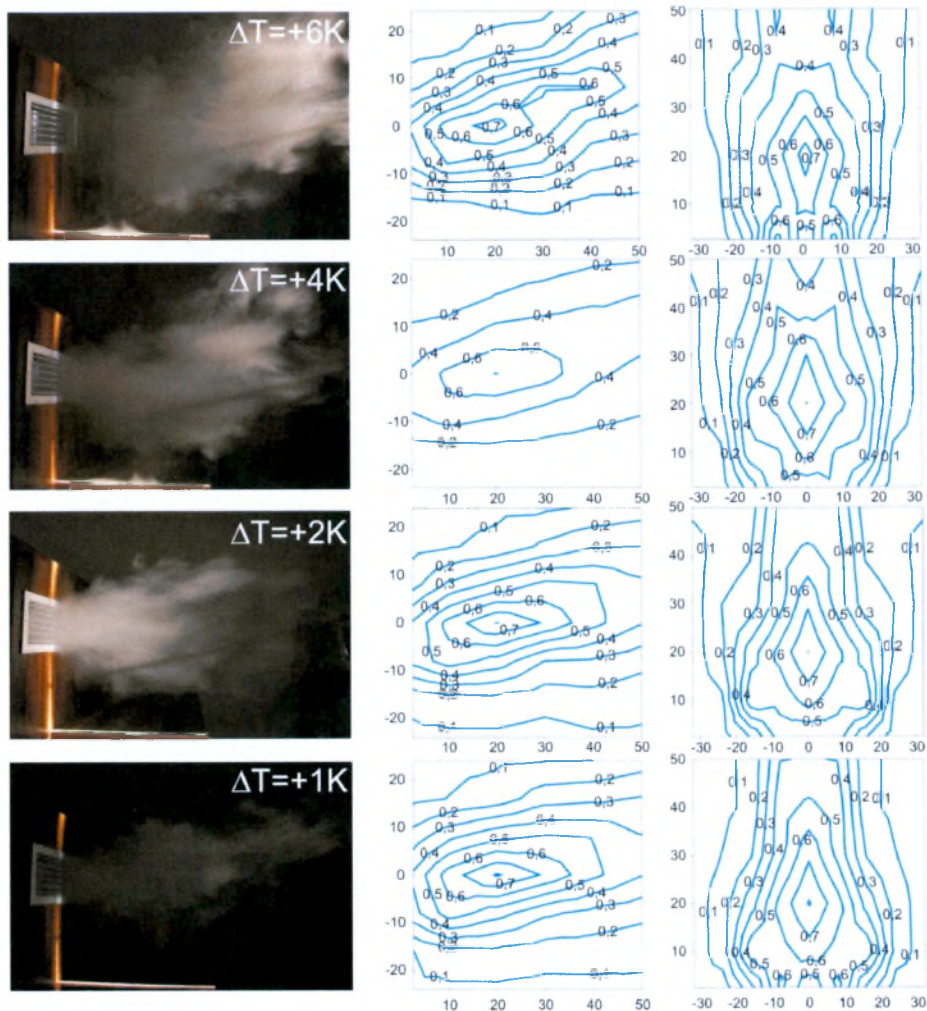
temperatury powietrza może powodować uczucie przeciągu i wysychanie śluzówki oczu i nosa.



Rys.5.9. Schemat układu punktów pomiarowych do wyznaczenia charakterystyki nawiewnika PV.

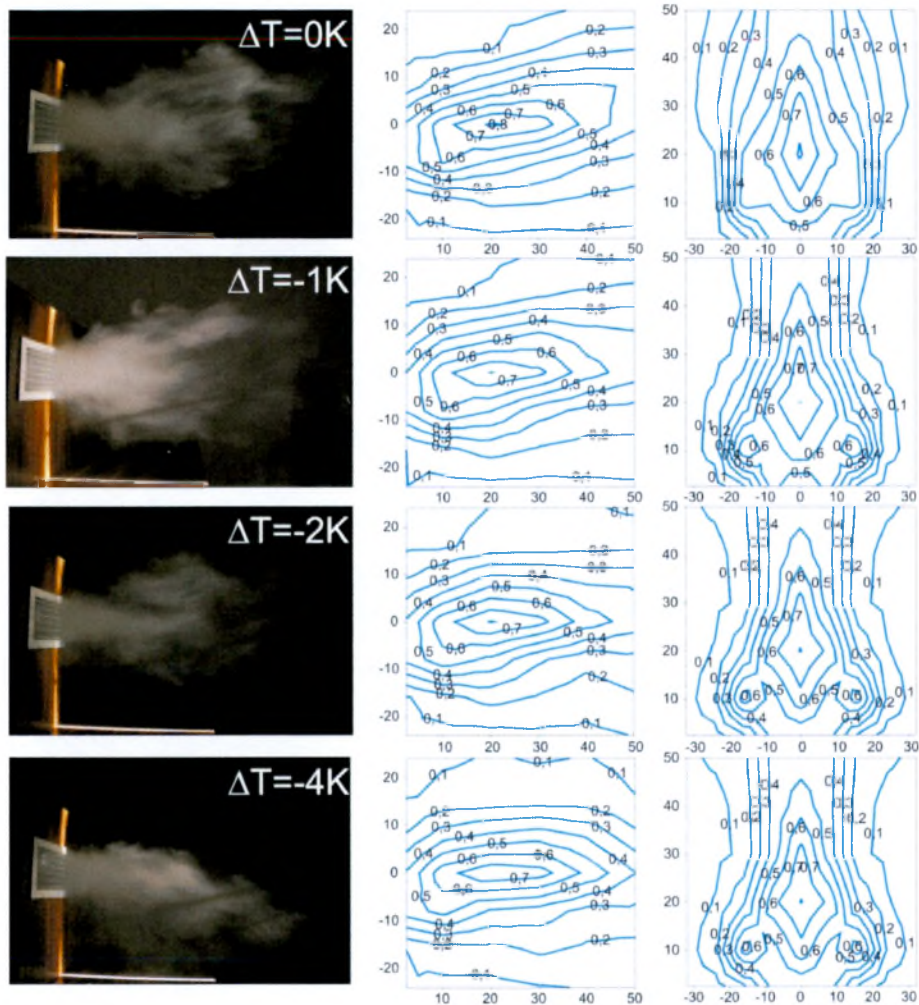
Fig.5.9. Configuration of measurement points for description PV air device air flow.

Aby zminimalizować ryzyko tego zjawiska elementy nawiewne zostały tak dobrane aby na krawędzi biurka (w płaszczyźnie kontaktu z człowiekiem) prędkość powietrza nie przekroczyła 0,45 m/s. Podczas wszystkich serii pomiarowych utrzymywany był stały strumień objętości powietrza w ilości 72 m³/h (20 l/s). Analiza otrzymanych wyników wykazała, że założenie to zostało osiągnięte a wartość prędkości na krawędzi biurka, w poziomej osi kratki wentylacyjnej wynosiła od 0,35 m/s do 0,45 m/s w zależności od wytworzonej różnicy temperatury pomiędzy powietrzem nawiewanym, a otaczającym. Wyniki uzyskanych pomiarów oraz wizualizacja przedstawione są na poniższych rysunkach 5.10.÷5.13. Wskazana na nich różnica temperatury stanowi różnicę pomiędzy powietrzem nawiewanym, a otaczającym.



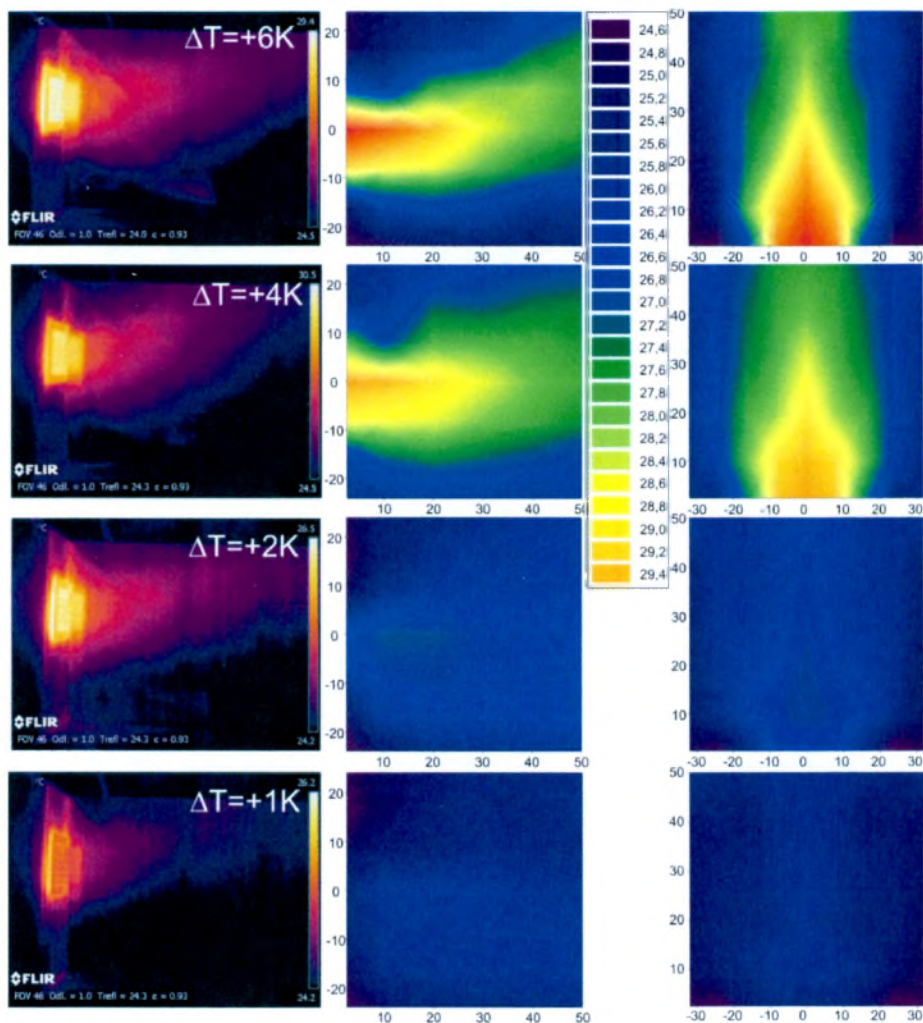
Rys.5.10. Profile prędkości nawiewanego strumienia powietrza z PV w osi, odpowiednio pionowej i poziomej kratki wentylacyjnej dla różnicy temperatury +6K, +4K, +2K, +1K oraz z lewej strony wizualizacja za pomocą wytwornicy dymu.

Fig.5.10. PV air velocity profile in vertical and horizontal axis of air device for temperature difference +6K, +4K, +2K, +1K and on the left side: air flow visualization using smoke generator.



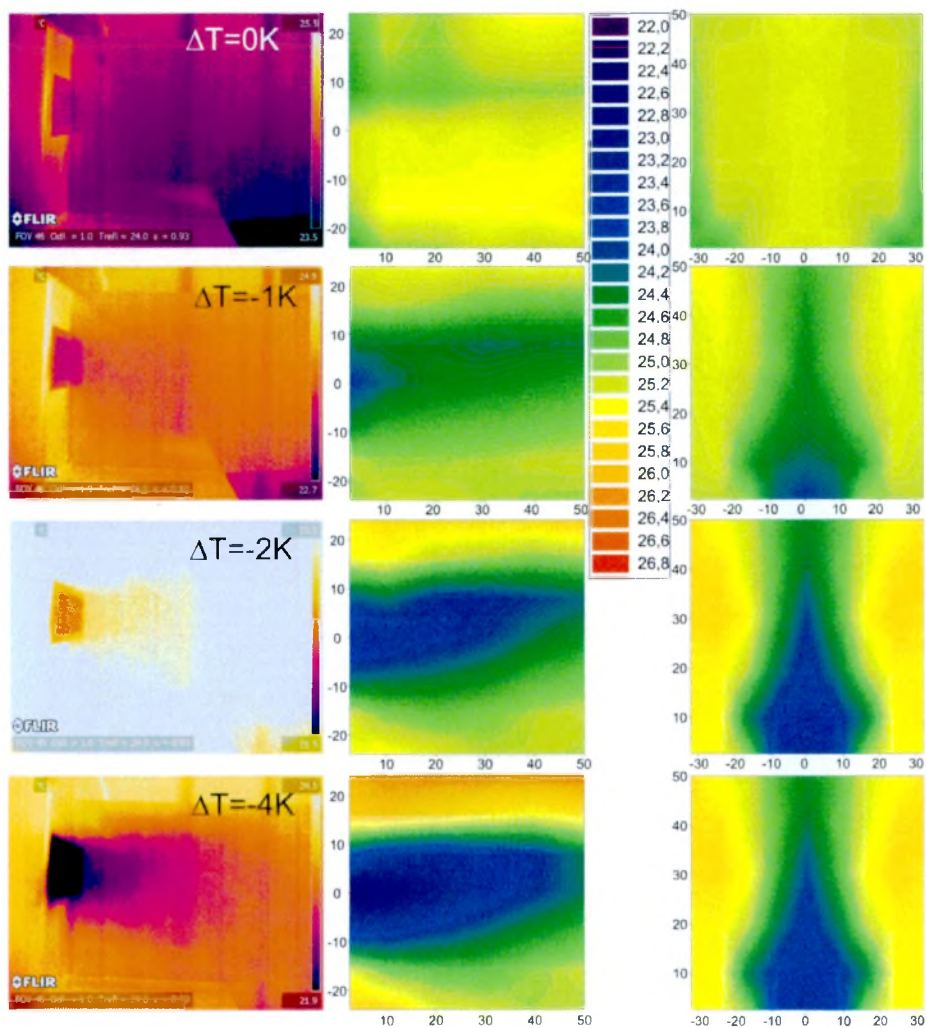
Rys.5.11. Profile prędkości nawiewanego strumienia powietrza z PV w osi, odpowiednio pionowej i poziomej kratki wentylacyjnej dla różnicy temperatury 0K, -1K, -2K, -4K oraz z lewej strony wizualizacja za pomocą wytwornicy dymu.

Fig.5.11. PV air velocity profile in vertical and horizontal axis of air device for temperature difference 0K, -1K, -2K, -4K and on the left side: air flow visualization using smoke generator.



Rys.5.12. Profile temperatury nawiewanego strumienia powietrza z PV w osi, odpowiednio pionowej i poziomej kratki wentylacyjnej dla różnicy temperatury +6K, +4K, +2K, +1K oraz z lewej strony analiza za pomocą kamery termowizyjnej [24].

Fig.5.12. PV air temperature profile in vertical and horizontal axis of air device for temperature difference +6K, +4K, +2K, +1K and on the left side: air temperature profile using thermographic camera [24].



Rys.5.13. Profile temperatury nawiewanego strumienia powietrza z PV w osi, odpowiednio pionowej i poziomej kratki wentylacyjnej dla różnicy temperatury 0K, -1K, -2K, -4K oraz z lewej strony analiza za pomocą kamery termowizyjnej [24].

Fig.5.13. PV air temperature profile in vertical and horizontal axis of air device for temperature difference 0K, -1K, -2K, -4K and on the left side: air temperature profile using thermographic camera [24].

5.4. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH OSÓB

Przed badaniami przeprowadzono wstępną klasyfikację ochotników, ze względu na ich cechy fizyczne (wiek, wzrost, waga) oraz rodzaj wykonywanej pracy (pracownicy biurowi, studenci). W badaniach wzięło udział 20 mężczyzn; średni wiek ochotników wynosił 22,4 lat ($sd=1,7$ l.), wzrost 0 1,81 m ($sd=0,04$ m) oraz waga 77,6 kg ($sd=8,5$ kg). Uczestnicy badań byli proszeni o stawienie się na badania po przespanej nocy i po śniadaniu, o nie spożywanie alkoholu przez 48 godzin poprzedzających eksperyment oraz o dostosowanie stroju do warunków panujących na zewnątrz. Każda osoba brała udział w jednym eksperymencie dziennie. Ze względu na naturalną adaptację organizmu ludzkiego do zmiany pór roku badania prowadzono w 2 miesiącach (luty i maj) oraz w 2 wariantach temperaturowych reprezentujących zimę i lato.

Metodyka pomiarów z udziałem ochotników uzyskała akceptację Komisji ds. Etyki Badań Naukowych przy CIOP-PIB.

5.5. METODYKA BADAŃ

Badania z wykorzystaniem manekina termicznego

Badania z wykorzystaniem manekina termicznego przeprowadzono w 3 seriach: nagi manekin w warunkach zimowych i letnich, manekin ubrany w warunkach zimowych i manekin ubrany w warunkach letnich. W warunkach zimowych temperatura otoczenia utrzymywana była na poziomie: 18°C, 20°C i 22°C, w warunkach wynosiła 24°C, 26°C i 28°C. Kierunek strumienia powietrza z systemu PV (twarz, kostki) oraz jego temperatura i temperatura otoczenia zmieniano w zależności od przyjętego wariantu badania.

Manekin umieszczono był przy biurku w sposób przedstawiony na rys. 5.4., gdzie ubrany jest w letnią odzież.

Każda seria badań (warunki zimowe i letnie) podzielona została na 17 wariantów w zależności od: tego czy zastosowany został nawiew z systemu PV, kierunku nawiewanego powietrza, temperatury otoczenia i powietrza nawiewanego. Temperatura nawiewanego powietrza zmieniano się w zależności od przyjętego wariantu o 1 K, 2 K, 4 K lub maksymalnie 6 K w stosunku do temperatury otoczenia. W celu określenia punktu odniesienia przeprowadzono badania również bez włączonego układu PV, tylko dla

określonej temperatury otoczenia. Na podstawie otrzymanych wyników została następnie obliczona temperatura ekwiwalentna (t_{eq}) zgodnie z poniższym równaniem:

$$t_{eq} = t_s - 0,155I_{cl} \cdot q_T \quad (5.1)$$

gdzie:

t_s – temperatura powierzchni manekina, [°C],

I_{cl} – izolacja cieplna odzieży, [m²K/W],

q_T – moc cieplna dostarczana do manekina pracującego w trybie “comfort”, [W/m²].

Zastosowanie t_{eq} podczas analizy wyników pozwoliło na porównanie wszystkich serii pomiarowych prowadzonych w różnych warunkach, tj. różnej temperaturze otoczenia, nawiewu oraz kierunku nawiewanego powietrza PV. Metodologia obliczania t_{eq} oraz analizy wyników na jej podstawie wzorowana była na informacjach zawartych w pracach [82, 104].

Badania z udziałem ochotników

Pomiary z udziałem ochotników, służące ocenie lokalnych odczuć cieplnych oraz całego ciała w czasie działania PV prowadzone były w dwóch seriach, w warunkach zimowych (w lutym) oraz w warunkach letnich (w maju). Ze względu na naturalną, sezonową adaptację organizmu ludzkiego i wykonano je zgodnie z przyjętymi wariantami, przedstawionymi w tabeli 5.4. w temperaturze otoczenia 18, 20 oraz 22°C – zima oraz 24, 26 i 28°C – lato. Temperatura powietrza w komorze klimatycznej przyjęta została zgodnie z granicznymi wartościami przedstawionymi w normie PN-76/B-03421 [87] oraz z innymi danymi literaturowymi [63, 85]. W czasie badań utrzymywana była stała wartość wilgotności względnej powietrza w otoczeniu tj. 50%.

Zgodnie z przyjętym schematem badań przed rozpoczęciem właściwych pomiarów oraz w czasie ekspozycji na działanie systemu PV w komorze klimatycznej ochotnicy proszeni byli o wypełnienie ankiet dotyczących ich odczuć cieplnych.. Ankiety rozwiązywane były w

odpowiedniej kolejności zgodnie ze schematem badania przedstawionym w tab.5.5. Zestawienie parametrów kolejnych 14 serii pomiarowych przedstawiono w tabeli 5.4.

Tab.5.4. Charakterystyka kolejnych serii pomiarowych.

Tab.5.4. Temperature and direction of supplied air in particular test variants.

Nr wariantu:	Pora roku	Kierunek napływu powietrza	Temperatura powietrza w pom.	Temperatura nawiewu powietrza
1	Lato	twarz	24°C	24°C
			26°C	25°C
				24°C
				22°C
			28°C	27°C
				26°C
24°C				
2	Lato	kostki	24°C	24°C
			26°C	25°C
				24°C
				22°C
			28°C	27°C
				26°C
24°C				
1	Zima	twarz	18°C	22°C
			20°C	24°C
				21°C
				22°C
			22°C	24°C
				23°C
24°C				
2	Zima	kostki	18°C	22°C
			20°C	24°C
				21°C
				22°C
			22°C	24°C
				23°C
24°C				

Tab.5.5. Schemat pojedynczego badania.

Tab.5.5. Schematic diagram of single test.

Czas badania:	10min	20min	10min
Miejsce badania:	Na zewnątrz komory klimatycznej	W komorze klimatycznej	
Rodzaj testów:	1.Skala odczuć cieplnych wg ASHRAE 2.Ocena lokalnego dyskomfortu termicznego 3.Ocena subiektywnego odczucia komfortu	Aklimatyzacja	1.Skala odczuć cieplnych wg ASHRAE 2.Ocena lokalnego dyskomfortu termicznego 3.Ocena subiektywnego odczucia komfortu

Subiektywna ocena odczuć cieplnych, realizowana była poprzez wypełnienie testów od 1 do 3 tj.: skali odczuć cieplnych wg ASHRAE, oceny lokalnego dyskomfortu termicznego oraz oceny subiektywnego odczucia komfortu, składające się z przedstawionych poniżej pytań.

Skala odczuć cieplnych wg ASHRAE:

Określ swoje wrażenia ciepłe zaznaczając odpowiednią pozycję w 7-stopniowej skali.

-3	zimno
-2	chłodno
-1	lekko chłodno
0	obojętnie
+1	lekko ciepło
+2	ciepło
+3	gorąco

Ocena subiektywnego odczucia komfortu:

1. Chciałbyś aby było tu teraz

- a) cieplej +1
- b) bez zmian 0
- c) chłodniej -1

3. Czujesz się tu:

- a) ożywiony +1
- b) normalny 0
- c) śpiący -1

2. Chciałbyś aby było tu teraz:

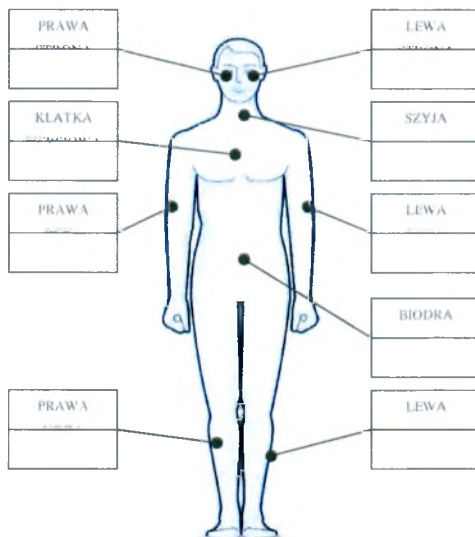
- a) mniej przewiewnie +1
- b) bez zmian 0
- c) przewiewnej -1

4. W pomieszczeniu tym czujesz się

- a) dobrze +1
- b) obojętnie 0
- c) źle -1

Ocena lokalnego dyskomfortu termicznego:

Określ, za pomocą + (komfortowe) oraz - (niekomfortowe), wrażenia cieplne poszczególnych partii ciała [68]:



Odpowiedzi udzielone przez uczestników badań poddane zostały następnie analizie statystycznej. Test kolejności par Wilcoxon'a posłużył do porównania różnic pomiędzy wynikami ankiet prowadzonych przed rozpoczęciem właściwych badań oraz tymi przeprowadzonymi w czasie pobytu w komorze klimatycznej oddzielnie dla każdego z 29 wariantów. W celu sprawdzenia jednorodności wariancji badań prowadzonych w komorze klimatycznej użyto testu Levene'a. Dla wyników, które nie spełniały warunku jednorodności wariancji przeprowadzono dalsze rozważania w postaci nieparametrycznego testu Friedeman'a służącego do sprawdzenia różnic pomiędzy kolejnymi wariantami oraz test post hoc dla testu Friedeman'a. W przypadkach, gdy wynik spełniał warunek jednorodności wariancji zastosowana została analiza wariancji ANOVA oraz test post hoc NIR. Ponadto wykonano test normalności rozkładu Shapiro-Wilka dla każdego z realizowanych wariantów oraz dla wyników, które nie miały rozkładu normalnego, nieparametryczny test korelacji R-Spearman'a pozwalający określić zależności pomiędzy kierunkiem nawiewu powietrza, temperaturą otoczenia oraz nawiewu (oddzielnie), a odpowiedziami ankietowanych. Na tej podstawie określono liczebność poszczególnych odpowiedzi dotyczących zmienności wrażeń cieplnych w zależności od zmiany temperatury powietrza otaczającego oraz kierunku i temperatury powietrza dostarczanego przez system PV w zależności od sezonu oraz przeprowadzono dalszą interpretację rezultatów badań.

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

6.1. WARIANTY Z WYKORZYSTANIEM MANEKINA TERMICZNEGO

Na podstawie przeprowadzonych badań określono wykresy zmienności wartości t_{eq} w zależności od warunków i wariantu badania dla każdego z 16 segmentów manekina termicznego (rys. 6.11 – 6.12.). Obliczono również wartości zmiany t_{eq} przy zastosowanym nawiewie PV w stosunku do wariantu bez nawiewu PV, które przedstawiono w tabelach 6.1. i 6.2.

Tab.6.1. Różnica pomiędzy t_{eq} dla wariantu z nawiewem i bez nawiewu PV odniesiona do całej powierzchni manekina (nagi manekin).

Tab.6.1. Equivalent temperature difference between PV and no PV supply variants (nude manikin).

	Warunki zimowe			Warunki letnie	
	Wariant	Temperatura ekwiwalentna t_{eq} , [K]		Wariant	Temperatura ekwiwalentna t_{eq} , [K]
	twarz/18/22	-0,42		twarz/24/24	-0,80
	kostki/18/22	-0,96		kostki/24/24	-0,75
	twarz/18/24	-0,49		twarz/26/24	-0,64
	kostki/18/24	-0,79		kostki/26/24	-0,66
	twarz/20/21	-0,29		twarz/26/25	-0,40
	kostki/20/21	-0,84		kostki/26/25	-0,31
	twarz/20/22	-0,29		twarz/26/22	-0,60
	kostki/20/22	-0,62		kostki/26/22	-0,51
	twarz/20/24	-0,39		twarz/28/24	-1,32
	kostki/20/24	-0,88		kostki/28/24	-0,77
	twarz/22/23	-0,54		twarz/28/26	-1,02
	kostki/22/23	-1,05		kostki/28/26	-0,76
	twarz/22/24	-0,42		twarz/28/27	-0,99
	kostki/22/24	-0,70		kostki/28/27	-0,74

Tab.6.2. Różnica pomiędzy t_{eq} dla wariantu z nawiewem i bez nawiewu PV odniesiona do całej powierzchni manekina (ubrany manekin).

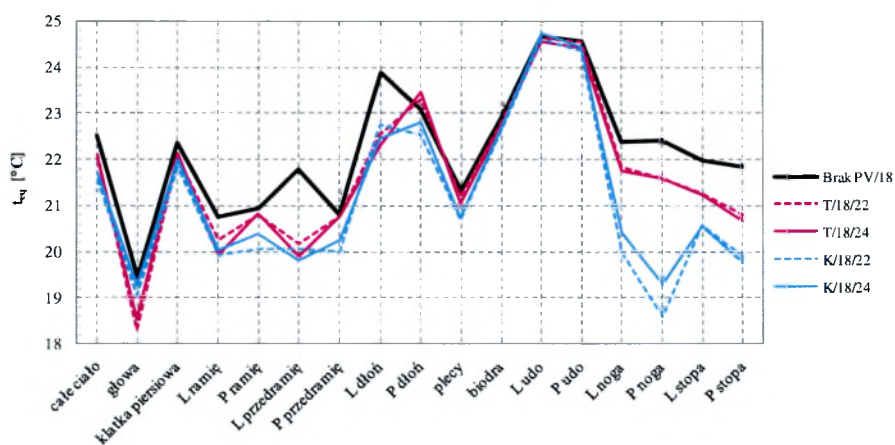
Tab.6.2. Equivalent temperature difference between PV and no PV supply variants (clothed manikin).

	Wariant	Temperatura ekwiwalentna t_{eq} , [K]		Wariant	Temperatura ekwiwalentna t_{eq} , [K]
	Warunki zimowe	twarz/18/22		2,36	Warunki letnie
kostki/18/22		2,68	kostki/24/24	1,57	
twarz/18/24		2,74	twarz/26/24	0,41	
kostki/18/24		2,38	kostki/26/24	1,12	
twarz/20/21		0,94	twarz/26/25	0,48	
kostki/20/21		1,11	kostki/26/25	0,46	
twarz/20/22		0,95	twarz /26/22	0,77	
kostki/20/22		1,15	kostki/26/22	1,11	
twarz/20/24		0,52	twarz/28/24	0,74	
kostki/20/24		0,54	kostki/28/24	1,20	
twarz/22/23		0,95	twarz/28/26	0,97	
kostki/22/23		0,79	kostki/28/26	-0,13	
twarz/22/24		0,87	twarz/28/27	-0,44	
kostki/22/24		0,79	kostki/28/27	-0,13	

Wpływ wentylacji indywidualnej na wartość t_{eq} dla nagiego manekina w warunkach zimowych i letnich.

We wszystkich wariantach z nagim manekinem zastosowanie nawiewu PV zarówno na wysokości głowy oraz kostek spowodowało obniżenie wartości t_{eq} na wszystkich segmentach manekina (rys.6.1. – 6.6.). Można zatem przypuszczać, iż wprowadzenie lokalnego strumienia powietrza o prędkości wyższej niż w przypadku wentylacji ogólnej skutkuje obniżeniem wartości t_{eq} a co za tym idzie wystąpieniem efektu ochłodzenia poszczególnych części ciała.

Wariantach, w których temperatura otoczenia wynosiła 18°C (rys.6.1.) różnica pomiędzy t_{eq} dla wariantu bez PV i wariantów z PV wynosi od 0,05 K do 0,8 K dla nawiewu na twarz oraz maksymalnie 3,9 K dla nawiewu na wysokości kostek. Największe różnice pomiędzy t_{eq} przy braku PV i przy wariantach z nawiewem PV występowały na wysokości nóg i stóp manekina, przy czym dla nawiewu PV na wysokości kostek wartość t_{eq} była niższa niż w wariantach z nawiewem PV na wysokości twarzy. Na pozostałych segmentach manekina wartości t_{eq} przy nawiewie PV powietrza o temperaturze wyższej o 2 K lub 6 K od temperatury otoczenia były zbliżone niezależnie od kierunku nawiewanego powietrza.

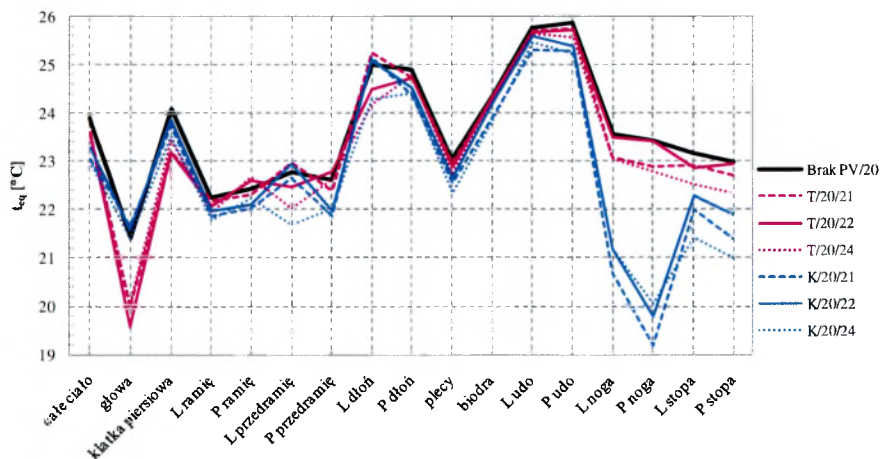


Rys. 6.1. Zmiana wartości t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 18°C (warunki zimowe).

Fig.6.1. Change in t_{eq} for the nude manikin and ambient temperature 18°C (winter conditions).

Analogiczna sytuacja wystąpiła w temperaturze otoczenia równej 20°C (rys.6.2.). Największą różnicę pomiędzy t_{eq} dla wariantu bez nawiewu PV a wariantu z nawiewem PV zaobserwowano na dolnych segmentach manekina, tj. stopach (0,6 K przy nawiewie na twarz) i nogach (4,2 K przy nawiewie na kostki). Znaczną różnicę zanotowano również na twarzy manekina przy nawiewie PV na tej samej wysokości (1,3 K). Na pozostałych segmentach różnica t_{eq} wynosiła od 0,04 K do 1,1 K. Należy również zauważyć, iż zmiana temperatury

nawiewanego powietrza z PV nie wpłynęła znacząco na zmianę wartości t_{eq} , tak więc istotniejszym parametrem w tym przypadku okazała się prędkość nawiewanego powietrza.

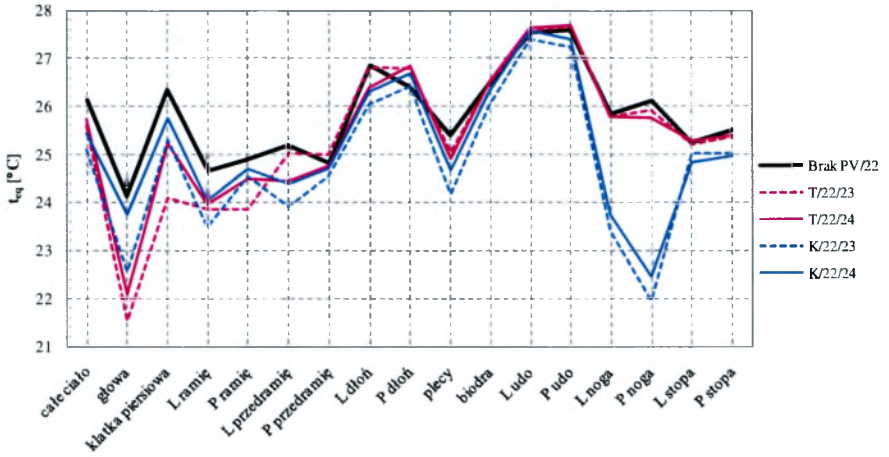


Rys. 6.2. Zmiana wartości t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 20°C (warunki zimowe).

Fig.6.2. Change in t_{eq} for the nude manikin and ambient temperature 20°C (winter conditions).

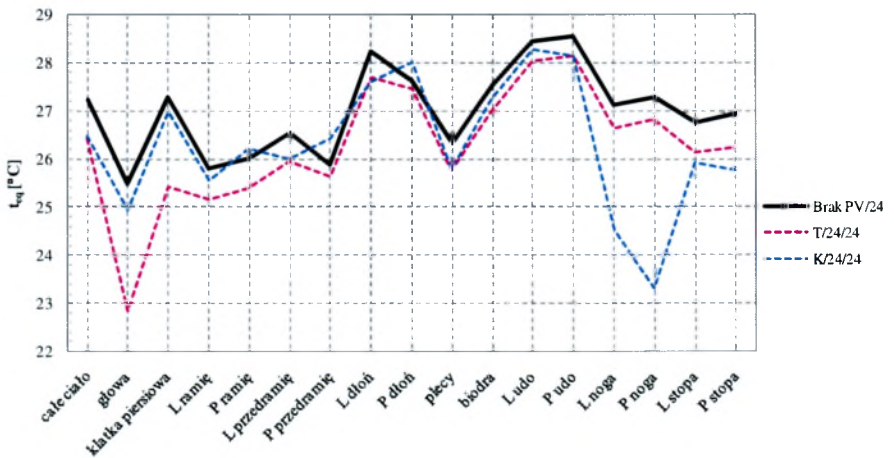
W temperaturze otoczenia równej 22°C (rys.6.3.) wystąpiły znacznie większe różnice w wartościach t_{eq} pomiędzy nawiewem na wysokości twarzy i kostek. Nawiew na wysokości kostek spowodował spadek t_{eq} na dolnych segmentach manekina nawet o 4 K w stosunku do wariantu bez nawiewu PV, natomiast na tych samych segmentach nawiew PV realizowany na twarz nie wpłynął znacząco na wartość t_{eq} . Jednocześnie na głowie manekina nawiew na wysokości twarzy spowodował obniżenie t_{eq} o 2,6 K, przy czym ponownie, wartość temperatury nawiewanego powietrza nie zmieniała znacząco wartości t_{eq} .

Wpływ prędkości powietrza na wartość t_{eq} można zaobserwować na rys.6.4., gdzie przedstawiono wartość t_{eq} dla wariantu, w którym temperatura nawiewanego powietrza z PV jest równa temperaturze otoczenia.



Rys. 6.3. Zmiana wartości t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 22°C (warunki zimowe).

Fig.6.3. Change in t_{eq} for the nude manikin and ambient temperature 22°C (winter conditions).

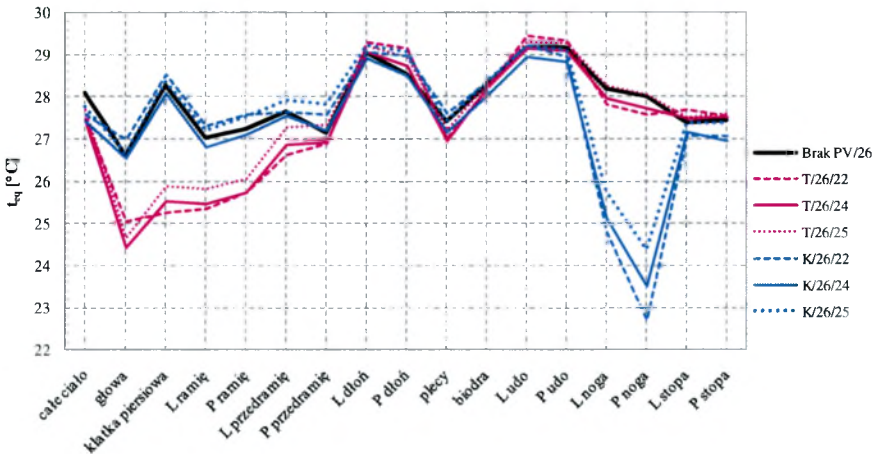


Rys. 6.4. Zmiana wartości t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 24°C (warunki letnie).

Fig.6.4. Change in t_{eq} for the nude manikin and ambient temperature 24°C (summer conditions).

Wprowadzenie przepływu powietrza o tej samej temperaturze spowodowało spadek wartości t_{eq} maksymalnie o 2.6 K (na głowie przy nawiewie na wysokości twarzy) oraz o 3,9 K (na wysokości nóg przy nawiewie na wysokości kostek) w stosunku do wariantu bez PV.

Dla temperatury otoczenia wynoszącej 26°C (rys.6.5.) zastosowanie nawiewu na wysokości twarzy spowodowało obniżenie t_{eq} dla głowy maksymalnie o 1,9 K, znaczne obniżenie t_{eq} odnotowano również dla pozostałych segmentów manekina znajdujących się nad powierzchnią biurka, tj. rąk i klatki piersowej. Nawiew na wysokości kostek spowodował obniżenie t_{eq} na nogach manekina maksymalnie o 4,8 K.

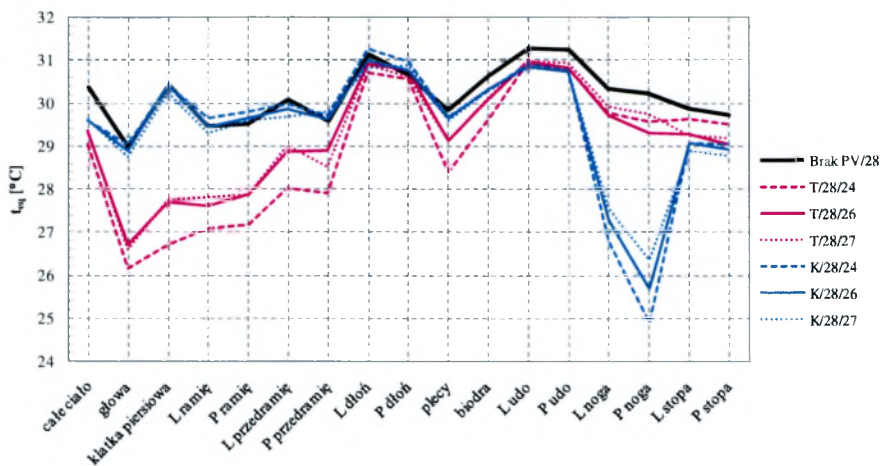


Rys. 6.5. Zmiana wartości t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 26°C (warunki letnie).

Fig.6.5. Change in t_{eq} for the nude manikin and ambient temperature 26°C (summer conditions).

Podczas eksperymentów prowadzonych w temperaturze otoczenia równej 28°C (rys.6.6.) wystąpiła analogiczna sytuacja, jak w 26°C, tj. największy efekt chłodzenia – obniżenie wartości t_{eq} na segmentach manekina od głowy do bioder zanotowano dla nawiewu na wysokości twarzy. Maksymalne obniżenie t_{eq} zanotowano na głowie manekina – 2,8 K w

stosunku do t_{eq} bez nawiewu PV. Nawiew PV na wysokości kostek powodował chłodzenie wyłącznie na segmentach znajdujących się pod blatem biurka.



Rys. 6.6. Zmiana wartości t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 28°C (warunki letnie).

Fig.6.6. Change in t_{eq} for the nude manikin and ambient temperature 28°C (summer conditions).

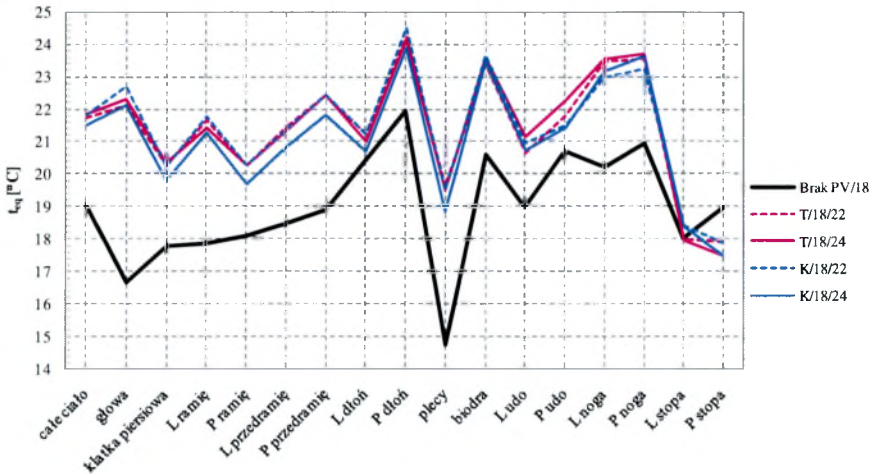
Wpływ wentylacji indywidualnej na wartość t_{eq} dla ubranego manekina w warunkach zimowych.

Wyniki badań przeprowadzonych na manekinie ubranym w odzież zimowa przedstawiono na rys. 6.7. – 6.9.

Porównując wyniki badań dla manekina nagiego i ubranego można zauważyć, że zastosowanie nawiewu PV powoduje wzrost t_{eq} dla warunków zimowych, odwrotnie niż w przypadku wariantów z nagim manekinem, tak więc dla ubranego manekina prędkość powietrza nawiewanego jest parametrem mniej istotnym niż jego temperatura.

W temperaturze otoczenia równej 18°C (rys.6.7.) zastosowanie lokalnego nawiewu z systemu PV spowodowało wzrost t_{eq} w stosunku do wartości określonej dla wariantu bez nawiewu. Jednakże wartości t_{eq} dla nawiewu PV na wysokości twarzy i kostek oraz przy różnych wartościach temperatury nawiewanego powietrza, były zbliżone, w zakresie 0,5 K.

Maksymalna różnica w wartości t_{eq} pomiędzy wariantem bez nawiewu lokalnego i z nawiewem PV wystąpiła na głowie (6,1 K) oraz na plecach (4,6 K) manekina. Na pozostałych segmentach wartość t_{eq} wzrosła średnio o 2,3 K.

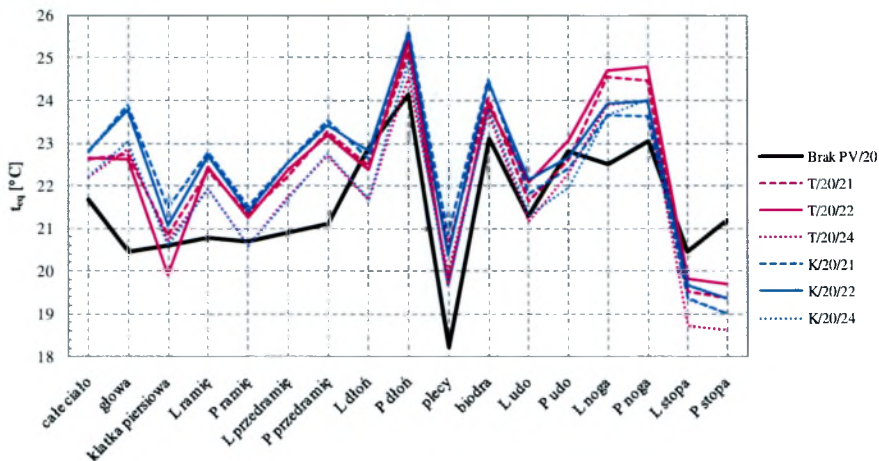


Rys. 6.7. Zmiana wartości t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 18°C (warunki zimowe).

Fig.6.7. Change in t_{eq} for the clothed manikin and ambient temperature 18°C (winter conditions).

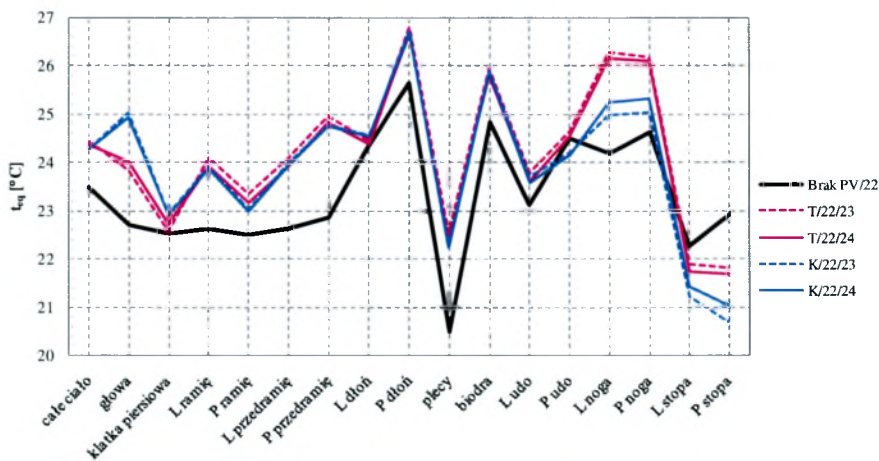
W przypadku temperatury otoczenia równej 20°C (rys.6.8.) różnice pomiędzy wartościami t_{eq} określoną przy lokalnym nawiewie z systemu PV i bez nawiewu z PV były znacznie mniejsze.

Jednak również można zaobserwować ogólnie wyższe wartości t_{eq} dla wariantu z nawiewem PV. Maksymalny wzrost t_{eq} dla wariantów z nawiewem PV odnotowano również na głowie manekina (3,4 K) przy czym różnica ta była większa dla nawiewu na poziomie kostek niż dla nawiewu PV na poziomie twarzy (2,1 K). Ciepłsze, od otoczenia, powietrze nawiewane na poziomie kostek unosi się do góry i powoduje ogrzanie całej powierzchni manekina.



Rys.6.8. Zmiana wartości t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 20°C (warunki zimowe).

Fig.6.8. Change in t_{eq} for the clothed manikin and ambient temperature 20°C (winter conditions).



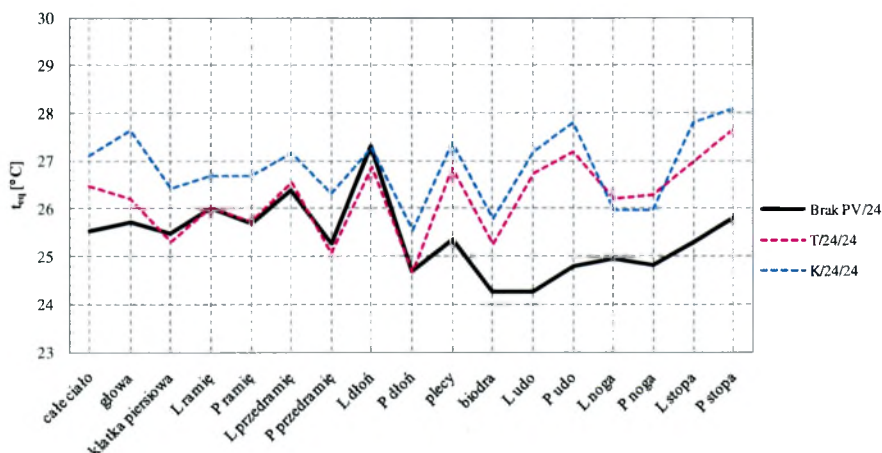
Rys. 6.9. Zmiana wartości t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 22°C (warunki zimowe).

Fig.6.9. Change in t_{eq} for the clothed manikin and ambient temperature 22°C (winter conditions).

W temperaturze otoczenia równej 22°C (rys.6.9.) nawiew z PV realizowany na twarz lub kostki powodował zbliżone wartości t_{eq} na większości segmentów manekina, oprócz stóp, które, ze względu na niską izolację cieplną zastosowanego obuwia były bardziej wrażliwe na zmiany prędkości i temperatury nawiewanego powietrza. Maksymalna różnica t_{eq} pomiędzy wariantem bez nawiewu, a z nawiewem PV wystąpiła ponownie na głowie manekina i wynosiła 1,3 K dla nawiewu na twarz i 2,2 K dla nawiewu na wysokości kostek.

Wpływ wentylacji indywidualnej na wartość t_{eq} dla ubranego manekina w warunkach letnich.

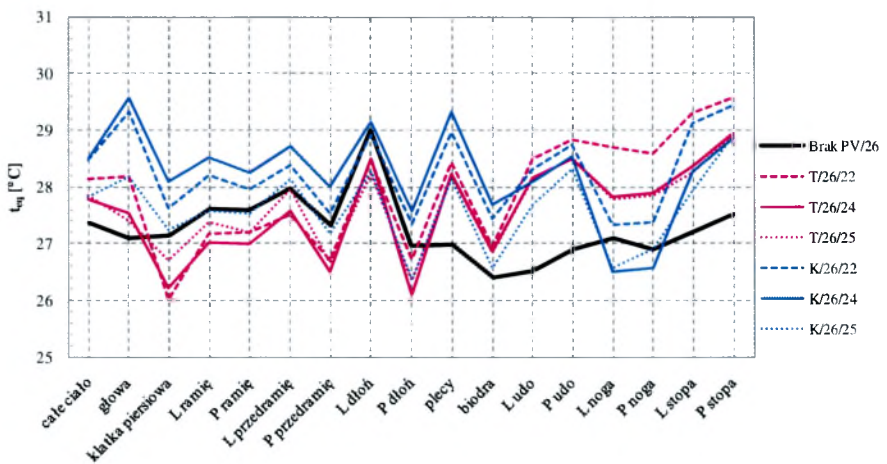
Wyniki badań przeprowadzonych na manekinie ubranym w odzież letnią przedstawiono na rys. 6.10. – 6.12. Dla temperatury otoczenia wynoszącej 24°C (rys.6.10.) i przy izotermicznym nawiewie powietrza z PV t_{eq} wzrosła znacznie na dolnych segmentach manekina oraz biodrach i głowie, natomiast na górnych segmentach manekina wzrost t_{eq} odnotowano tylko przy nawiewie PV realizowanym na wysokości kostek.



Rys.6.10. Zmiana wartości t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 24°C (warunki letnie).

Fig.6.10. Change in t_{eq} for the clothed manikin and ambient temperature 24°C (summer conditions).

W przypadku temperatury otoczenia równej 26°C (rys.6.11.) zastosowanie nawiewu PV na wysokości twarzy spowodowało zbliżone wartości t_{eq} niezależnie od temperatury nawiewanego powietrza. Nawiew na wysokości kostek, mimo, że temperatura nawiewanego powietrza była niższa od temperatury otoczenia, spowodował wzrost t_{eq} na większości segmentów manekina, tak więc można wnioskować, że powietrze wpływające z nawiewnika PV szybko uległo ogrzaniu i na manekina nie powodowało już chłodzenia. Na wysokości głowy manekina przy nawiewie PV na wysokości twarzy wartość t_{eq} była zbliżona do wartości bez nawiewu PV, natomiast przy nawiewie na wysokości kostek t_{eq} na głowie wzrosło o 2,4 K.



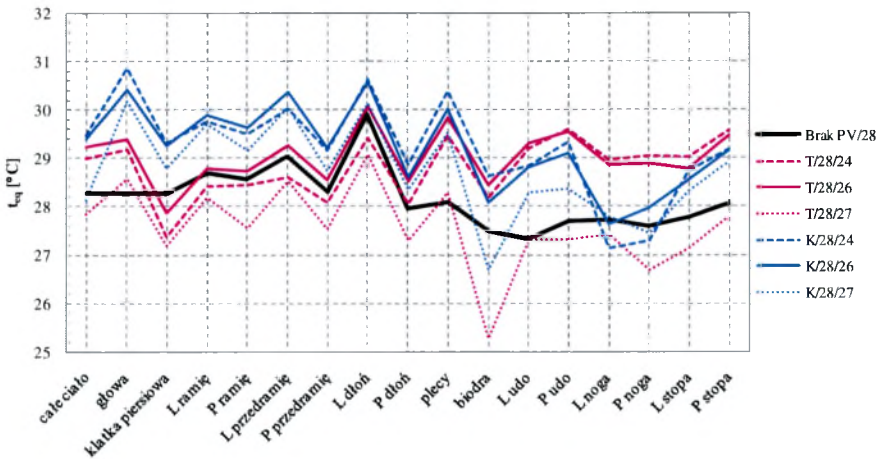
Rys.6.11. Zmiana wartości t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 26°C (warunki letnie).

Fig.6.11. Change in t_{eq} for the clothed manikin and ambient temperature 26°C (summer conditions).

W temperaturze otoczenia równej 28°C (rys.6.12.) analogicznie jak w wariantach dla temperatury równej 26°C , zastosowanie nawiewu na wysokości kostek spowodowało wzrost t_{eq} na segmentach manekina.

Wyraźne obniżenie wartości t_{eq} na wszystkich segmentach manekina odnotowano wyłącznie dla nawiewu PV o temperaturze równej 24°C . W pozostałych przypadkach nawiew

PV na wysokości twarzy powodował zbliżone wartości t_{eq} , jak w wariantach bez nawiewu PV.



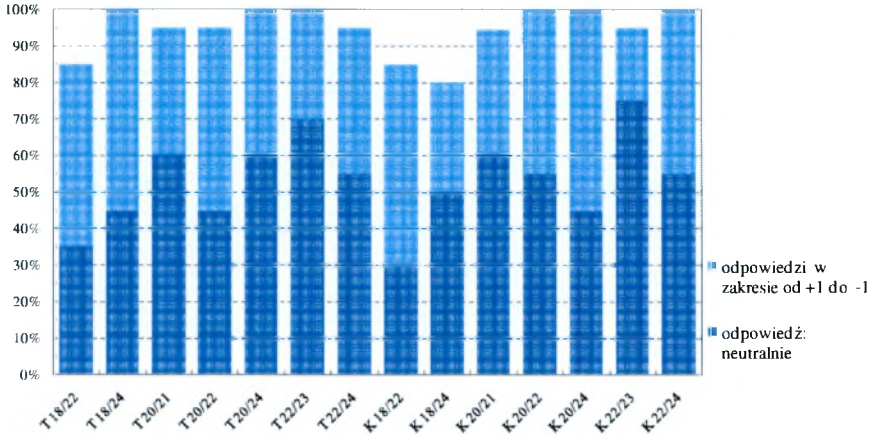
Rys.6.12. Zmiana wartości t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 28°C (warunki letnie).

Fig.6.12. Change in t_{eq} for the clothed manikin and ambient temperature 28°C (summer conditions).

6.2. WARIANTY Z UDZIAŁEM OCHOTNIKÓW

Wpływ wentylacji indywidualnej na odczucia cieplne człowieka w warunkach zimowych.

Wyniki badań w sezonie zimowym przedstawiono na rys. 6.13. – 6.18. Niezależnie od temperatury otoczenia, w jakiej realizowane były warianty badań oraz temperatury i kierunku nawiewu powietrza z PV od 80-100% uczestników deklaruowało uczucie komfortu cieplnego tzn. ich odpowiedzi zawierały się w zakresie $-1 \div +1$ w skali ASHRAE, przy czym od 30 do 75% osób odczuwało komfort na poziomie 0, czyli neutralnie. Najniższy odsetek osób odczuwających komfort odnotowano w temperaturze otoczenia 18°C i temperaturze nawiewu 22°C, jednak nadal zawierał się na wysokim poziomie ponad 80%. Odsetek ten zwiększał się wraz ze wzrostem temperatury nawiewu i nie zależał od kierunku nawiewanego powietrza.



Rys.6.13. Odsetek osób odczuwających komfort cieplny całego ciała w czasie działania PV – warunki zimowe.

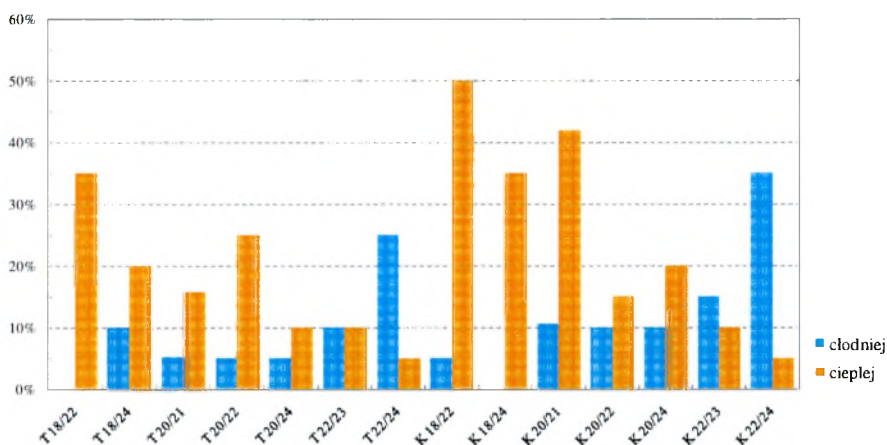
Fig.6.13. Percentage of subjects reporting thermal comfort of whole body using PV – winter conditions.

W temperaturze otoczenia 20°C niezależnie od kierunku nawiewanego powietrza odsetek osób odczuwających komfort zawierał się w granicach 95 – 100% przy czym liczba odpowiedzi na poziomie neutralnym (0) wzrosła w porównaniu z wariantami w temperaturze otoczenia 18°C i wynosiła ok. 55%. W czasie nawiewu powietrza na twarz nie odnotowano zależności zmiany odsetka osób odpowiadających na poziomie 0, jednakże korelacja taka widoczna jest w czasie nawiewu powietrza na kostki użytkowników, gdzie wraz ze wzrostem temperatury powietrza nawiewanego maleje liczba osób deklarujących odczucia neutralne z wartości 60% do 45%.

Jeden z najwyższych odsetek osób deklarujących odczucia neutralne (0) zauważono w przypadku wariantów realizowanych przy temperaturze otoczenia 22°C. Dodatkowo zauważono również spadek osób odczuwających komfort w zależności od wzrostu temperatury nawiewu powietrza, niezależnie od kierunku nawiewu powietrza.

Na rys.6.14. przedstawiono liczebność odpowiedzi użytkowników dotyczące subiektywnego odczucia komfortu analizowanego na podstawie preferencji cieplejszych lub

chłodniejszych warunków w pomieszczeniu, w porównaniu do tych kształtowanych podczas określonego wariantu.



Rys.6.14. Odsetek osób preferujących cieplejsze lub chłodniejsze warunki w pomieszczeniu w czasie działania PV – warunki zimowe.

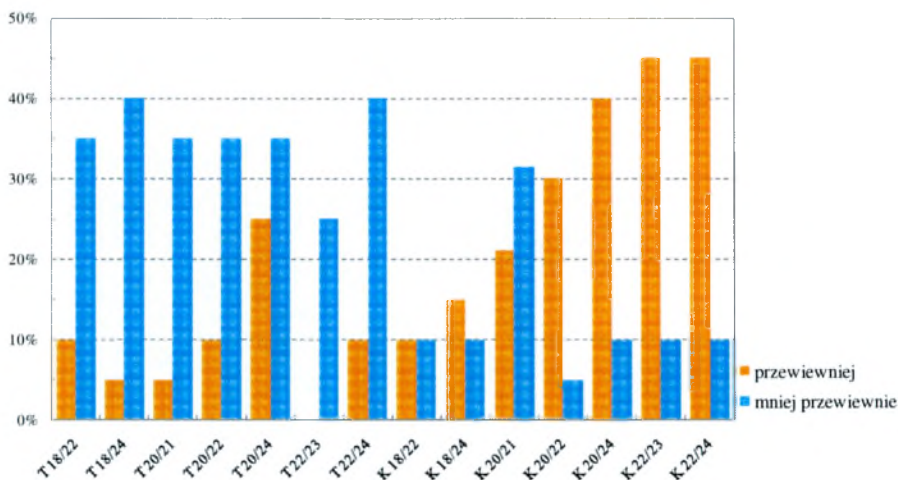
Fig.6.14. Percentage of subjects preferring warmer or cooler conditions using PV – winter conditions.

Na rysunku tym pokazano wyraźną zależność zmniejszenia preferencji cieplnych warunków wraz ze wzrostem temperatury otoczenia i nawiewu niezależnie od kierunku nawiewu powietrza. Jednocześnie podczas nawiewu powietrza na kostki więcej osób wyrażało życzenie wzrostu parametrów cieplnych w pomieszczeniu, co może wskazywać na skuteczniejsze ogrzewanie poprzez nawiew powietrza na twarz. Zaobserwowano również skuteczniejsze chłodzenie ciała przez kierowanie strumienia na twarz.

Zmiana odsetka osób deklarujących chęć obniżenia temperatury nie jest tak wyraźna jak w przypadku odpowiedzi *cieplej*. Wzrost liczby osób preferujących chłodniejsze warunki nieznacznie rośnie wraz ze wzrostem temperatury otoczenia ($p < 0,001$) i nawiewu ($p < 0,01$) w przypadku skierowania strumienia na twarz oraz nieco wyraźniej w przypadku nawiewu powietrza na kostki. Jednocześnie powodem tego może być równoczesny z nawiewem na

twarz, nawiew na klatkę piersiową, a więc istotniejsze z punktu widzenia na układ termoregulacji części ciała niż w przypadku nawiewu na kostki.

Rysunek 6.15. przedstawia liczebność odpowiedzi ochotników udzielonych w ramach oceny subiektywnych odczuć komfortu w zakresie zwiększenia lub zmniejszenia przewodności pomieszczenia.



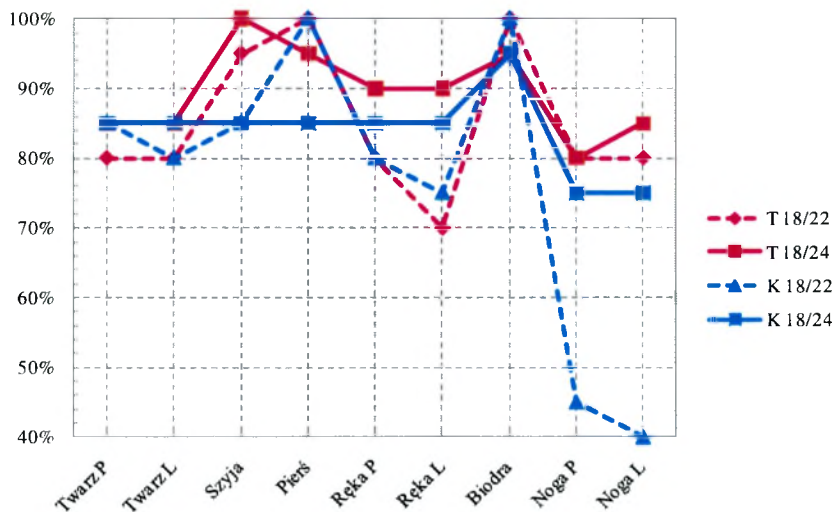
Rys.6.15. Odsetek osób preferujących mniejszy lub większy przepływ powietrza w pomieszczeniu w czasie działania PV – warunki zimowe.

Fig.6.15. Percentage of subjects preferring lower or higher air movement using PV – winter conditions.

Powyższy wykres wskazuje na pewien dyskomfort spowodowany nawiewem powietrza na twarz objawiający się stałym, wysokim odsetkiem (35-40%) osób deklarujących zmniejszenie przewodności w pomieszczeniu. Po zmianie kierunku nawiewu powietrza na kostki wraz ze wzrostem temperatury otoczenia i nawiewu wyraźnie rósł odsetek osób preferujących zwiększenia przewodności w pomieszczeniu ($p < 0,001$). Jednocześnie blisko 50% osób niezależnie od wariantu badania było zadowolonych z panujących warunków i nie chciało wpływać na przewiew w pomieszczeniu.

Dodatkowo wraz ze wzrostem temperatury powietrza otaczającego oraz nawiewanego, a tym samym wzrostu uczucia ciepła zaobserwowano zwiększenie odsetka osób odczuwających senności ($p < 0,001$).

Liczebność osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w zależności od temperatury powietrza otaczającego i wariantu przedstawiono na rys.6.16. – 6.18.



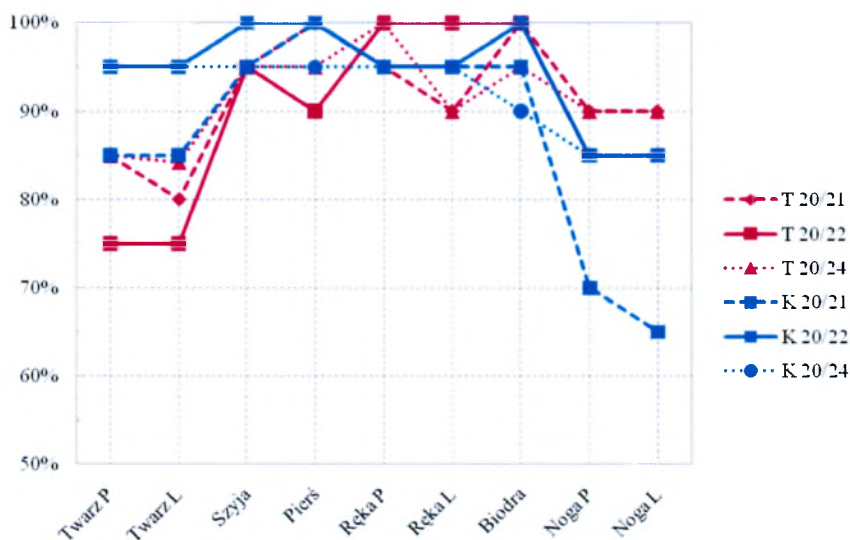
Rys.6.16. Odsetek osób odczuwających komfort cieplny na poszczególnych częściach ciała w temperaturze otoczenia 18°C w czasie działania PV – warunki zimowe.

Fig.6.16. Percentage of subjects reporting thermal comfort on particular body parts in ambient temperature 18°C using PV – winter conditions.

W temperaturze otoczenia równej 18°C najkorzystniejszym wariantem okazał się wariant T 18/24 (nawiew na twarz w temperaturze otoczenia 18°C i temperaturze nawiewu 24°C), podczas którego na wszystkich częściach ciała ponad 80% ochotników odczuwało komfort. Zbliżone odpowiedzi otrzymano w przypadku wariantu K 28/24 (nawiew na kostki w temperaturze otoczenia 18°C i temperaturze nawiewu 24°C). Ze względu na sposób rozdziału powietrza w systemie PV najbardziej narażonymi częściami ciała na odczucie dyskomfortu wynikającego z uczucia przeciągu są: twarz, ręce oraz nogi (w zależności od kierunku

nawiewu powietrza). Efekt ten zaobserwowano podczas pomiarów przy temperaturze powietrza nawiewanego równej 22°C, gdzie skierowanie strumienia na kostki spowodowało wyraźny wzrost liczby osób odczuwających dyskomfort na nogach (ok. 60%). Podobne zjawisko w nieco mniejszej skali dotyczyło rąk, gdzie blisko 30% osób deklaroowało dyskomfort.

Prowadzenie badań w temperaturze otoczenia 20°C (rys.6.17.) pozwoliło osiągnąć uczucie komfortu przez 95-100% ochotników na wszystkich częściach ciała z wyjątkiem twarzy i nóg, narażonych na bezpośrednie działanie strumienia. W zależności od wybranego kierunku nawiewu powietrza liczba osób odczuwających lokalny dyskomfort rosła, jednak nie przekraczała 25%. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na wrażenia cieplne była temperatura nawiewanego powietrza. Wzrost temperatury nawiewu zmniejszał odsetek niezadowolonych.

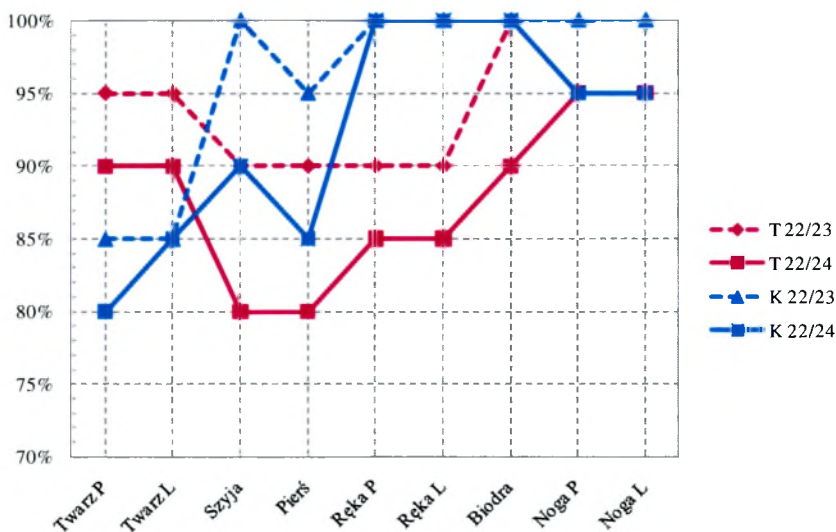


Rys.6.17. Odsetek osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w temperaturze otoczenia 20°C w czasie działania PV – warunki zimowe.

Fig.6.17. Percentage of subjects reporting thermal comfort on particular body parts in ambient temperature 20°C using PV – winter conditions.

Powyższe wykresy pokazują, że niezależnie od zastosowanych parametrów w czasie badań najmniej osób odczuwało komfort na twarzy oraz nogach.

Zastosowanie temperatury otoczenia na poziomie 22°C (rys.6.18.) i odpowiednio wyższej temperatury nawiewu zniwelowało efekt ten jedynie na nogach. Nieosłonięta ubraniami twarz jest bardziej narażona na odczucie przeciągu i niezależnie od wariantu odsetek osób deklarujących komfort był niższy niż w przypadku pozostałych części ciała.



Rys.6.18 Odsetek osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w temperaturze otoczenia 22°C w czasie działania PV – warunki zimowe.

Fig.6.18. Percentage of subjects reporting thermal comfort on particular body parts in ambient temperature 22°C using PV – winter conditions.

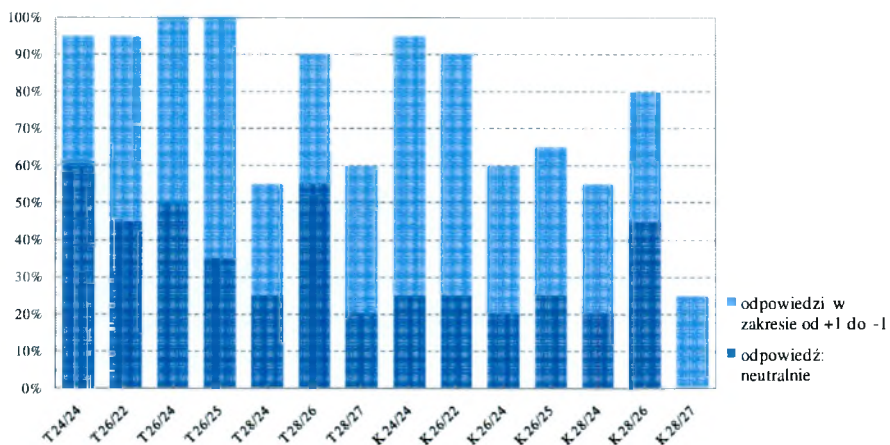
Jednocześnie podniesienie temperatury otoczenia do 22°C i utrzymywanie temperatury nawiewu o 1-2K wyższej spowodowało obniżenie odsetka osób odczuwających komfort w porównaniu do wariantów w temperaturze otoczenia 20°C.

Dodatkowym potwierdzeniem prawidłowo przeprowadzonych badań jest otrzymanie za pomocą korelacji R-Spearmana, istotnej statystycznie na poziomie $p < 0,001$, zależności wzrostu odczuć ciepłych wraz ze wzrostem temperatury otoczenia lub temperatury nawiewu. Pozostałe zależności otrzymane w czasie badań przedstawiono w załącznikach.

Wpływ wentylacji indywidualnej na odczucia ciepłe człowieka w warunkach letnich.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych dla sezonu letniego przedstawiono na rys. 6.19. – 6.24.

Analiza odsetka osób odczuwających komfort w czasie badań w warunkach letnich (rys.6.19.) wykazała jego spadek wraz ze wzrostem temperatury otoczenia i nawiewu niezależnie od kierunku nawiewu powietrza.

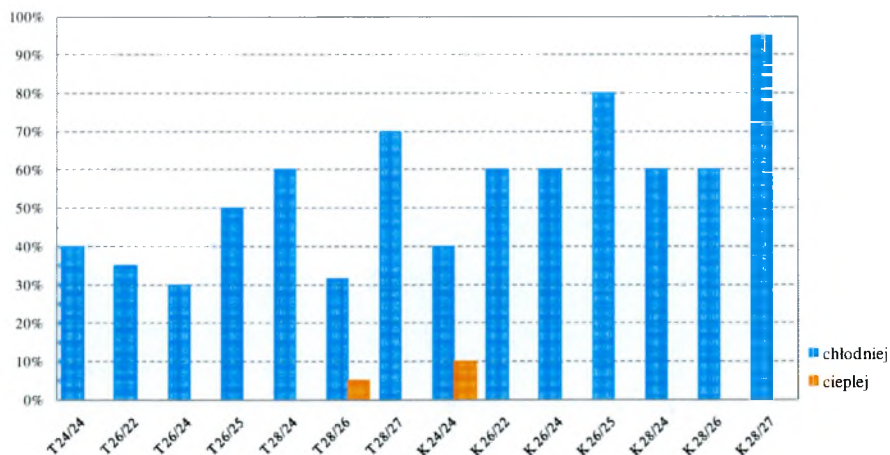


Rys.6.19. Odsetek osób odczuwających komfort cieplny całego ciała w czasie działania PV – warunki letnie.

Fig.6.19. Percentage of subjects reporting thermal comfort of whole body using PV – summer conditions.

Najwyższe wartości odnotowano dla temperatury otoczenia 24°C przy dowolnym kierunku nawiewu oraz 26°C w przypadku nawiewu na twarz, gdzie udział osób odczuwających komfort – odpowiedzi w zakresie -1 ÷ +1 – wyniósł ponad 90%. W pozostałych przypadkach odsetek ten był niższy i wynosił ok. 55%. Podobną zależność zaobserwowano analizując odsetek osób czujących się komfortowo na poziomie neutralnie w przypadku nawiewu powietrza na twarz. Odsetek ten maleł wraz ze wzrostem temperatury otoczenia i nawiewu w zakresie wartości 60% dla wariantu T 24/24, do wartości 25% dla wariantu T 28/27. Warianty, w których powietrze kierowane było na kostki odbierane były jako mniej komfortowe. Odsetek osób deklarujących odczucia na poziomie neutralne był stały i wynosił ok. 25%. W porównaniu z wariantami przeprowadzonymi w warunkach zimowych odczucia ciepłe dla całego ciała prowadzone w podwyższonej temperaturze otoczenia, w stosunku do wartości zawartych w PN-B-03421 [87], równej 28°C okazały się nieco mniej korzystne w porównaniu do wariantów prowadzonych w obniżonej temperaturze otoczenia tj. 18°C.

Analogicznie do wariantów zimowych, ochotnicy proszeni byli o wypełnienie ankiet zawierających m.in. subiektywną ocenę komfortu cieplnego.



Rys.6.20. Odsetek osób preferujących cieplejsze lub chłodniejsze warunki w pomieszczeniu w czasie działania PV – warunki letnie.

Fig.6.20. Percentage of subjects preferring warmer or cooler conditions using PV – summer conditions.

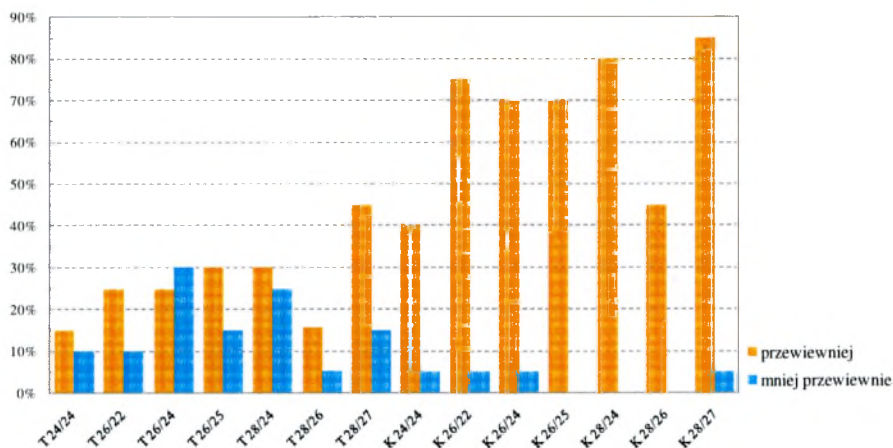
Na rys.6.20. przedstawiono liczebność odpowiedzi użytkowników dotyczące preferencji cieplejszych lub chłodniejszych warunków w pomieszczeniu, w porównaniu do tych wytworzonych podczas określonego wariantu. Około 50% ochotników, podczas wszystkich przeprowadzanych wariantów deklarowała chęć wytworzenia chłodniejszych warunków. Wartość ta rosła wraz ze wzrostem temperatury otoczenia i nawiewu ($p<0,01$), przy czym ok. 25% osób więcej preferowało chłodniejsze warunki w przypadku nawiewu na kostki, w porównaniu do analogicznego wariantu z nawiewem na twarz.

Dodatkowo zaobserwowano wyraźnie mniejszy odsetek osób preferujących chłodniejsze warunki w wariantach, w których temperatura powietrza nawiewanego na twarz była niższa o 2 K. Zarówno w temperaturze otoczenia 26°C, jak i 28°C wartość ta wynosiła 20%, a więc 80% osób nie chciało, żadnych zmian i zgodnie z rys.6.20. odczuwało komfort cieplny. Jednocześnie nawiew powietrza na twarz w temperaturze otoczenia 28°C, niezależnie od temperatury powietrza nawiewanego charakteryzował się zbliżonym, a nawet większym odsetkiem osób zadowolonych z panujących warunków, co może być wskazaniem większej skuteczności nawiewu na twarz i preferencji tego kierunku. Zmiana kierunku nawiewanego powietrza na *kostki* bądź wzrost temperatury nawiewu również powodował wzrost odpowiedzi preferujących chłodniejsze warunki (na poziomie istotności $p<0,01$).

Ilość osób deklarujących chęć cieplejszych warunków była incydentalna i uznana została za pomijalną.

Analogicznie, jak w warunkach zimowych zmiana kierunku nawiewanego powietrza przez system PV na kostki powodował wzrost liczebności odpowiedzi preferujących zwiększenie przewodności w pomieszczeniu ($p<0,001$) rys.6.21.

Warianty ze strumieniem powietrza kierowanym na kostki odznaczały się bardzo wysokim odsetkiem osób preferujących zwiększenie przepływu powietrza w pomieszczenia – ok. 70%. W wariantach tych przeciwne odpowiedzi, deklarujące chęć zmniejszenia przewodności stanowiły wyjątki i uznano je za nieistotne. Nawiew powietrza na twarz spowodował zmniejszenie liczby odpowiedzi dążących do wzrostu prędkości powietrza (ok. 25%) oraz pojawiły się odpowiedzi preferujące zmniejszenie prędkości powietrza (ok. 20%). Zjawisko to mogło być spowodowane intensyfikacją wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem oraz głową i klatką piersiową, posiadającymi największą liczbę termoreceptorów, a tym samym stanowiącymi najbardziej wrażliwe części ciała.



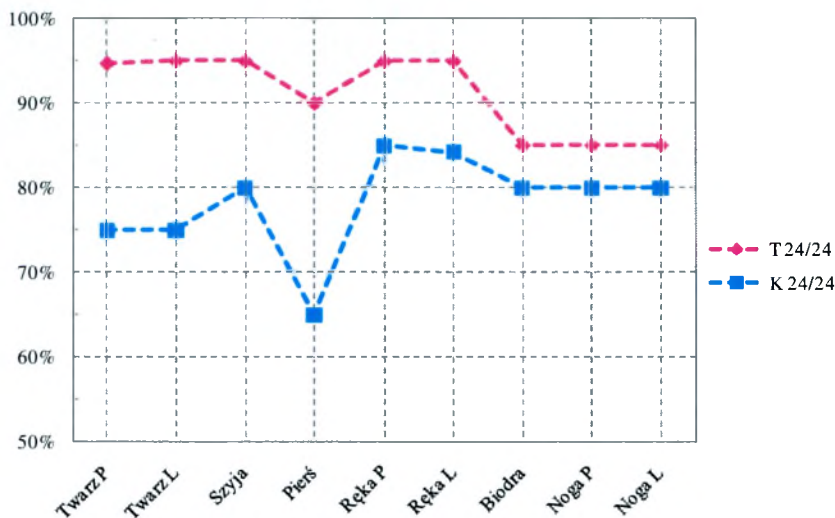
Rys.6.21. Odsetek osób preferujących mniejszy lub większy przepływ powietrza w pomieszczeniu w czasie działania PV – warunki letnie.

Fig.6.21. Percentage of subjects preferring lower or higher air movement using PV – summer conditions.

W zestawieniu z wynikami pozostałych pytań można przypuszczać, że zwiększony przepływ powietrza w okolicach twarzy, pomimo bardzo wysokiego odsetka osób odczuwających komfort cieplny dla tych wariantów, mógł powodować wśród bardziej wrażliwych ochotników uczucie przeciągu.

Przeprowadzone ankiety umożliwiły określenie odsetka osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w zależności od temperatury powietrza otaczającego i wariantu przedstawionych na rys. 6.22. – 6.24.

Izotermiczny nawiew powietrza na twarz, w temperaturze 24°C (rys.6.22.) powodował korzystniejsze odczucia w porównaniu z nawiewem na kostki.

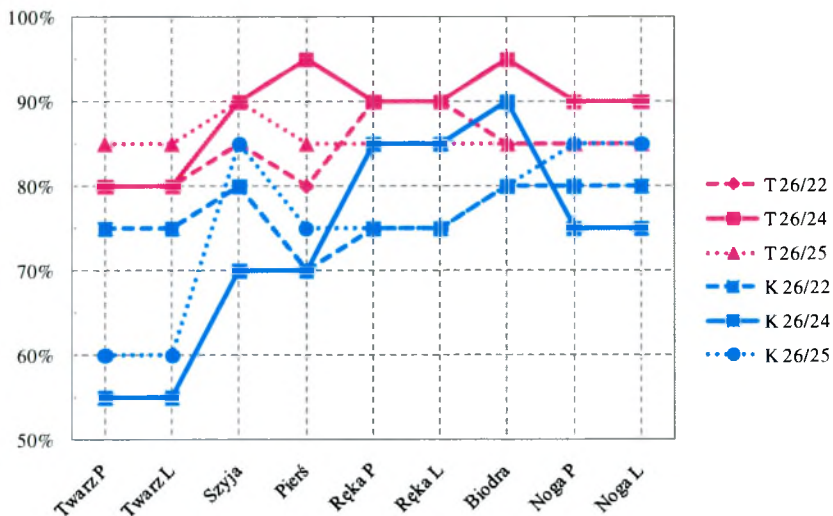


Rys.6.22. Odsetek osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w temperaturze otoczenia 24°C w czasie działania PV – warunki letnie.

Fig.6.22. Percentage of subjects reporting thermal comfort on particular body parts in ambient temperature 24°C using PV – summer conditions.

Ok. 90% osób na każdej części ciała odczuwała komfort. W przypadku nawiewu na kostki odsetek osób odczuwających komfort niezależnie od segmentu był niższy. Warianty te wykazały, że pomimo pewnego dyskomfortu spowodowanego wysychaniem spojówek przy nawiewie powietrza na twarz większa ilość osób, bo aż 95% odczuwało komfort na twarzy w tych warunkach, jedynie 75% przy nawiewie na kostki.

W temperaturze otoczenia równiej 26°C odnotowano wyraźnie mniejszy odsetek osób zadowolonych z warunków cieplnych na twarzy w przypadku nawiewu powietrza na kostki (45-75%) w stosunku do nawiewu na twarz (80-85%). Zjawisko to może wskazywać na pozytywny efekt nawiewu powietrza na twarz pomimo pewnego dyskomfortu wywołanego podrażnieniem spojówek.



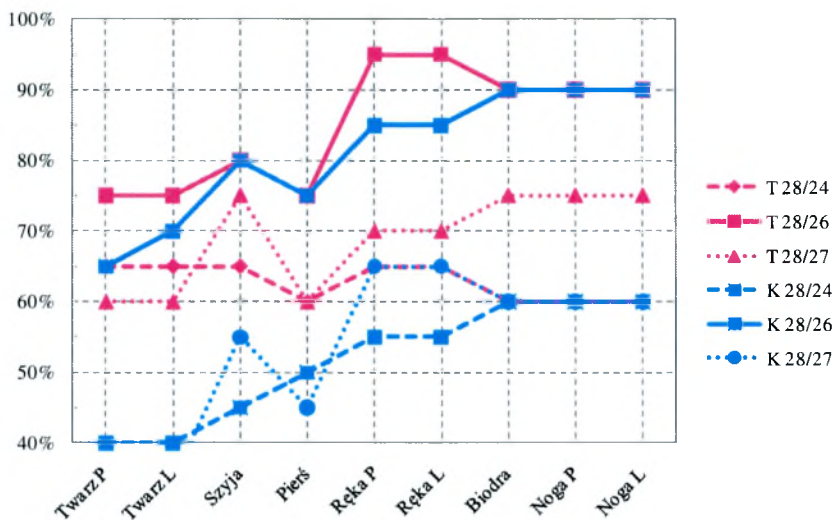
Rys.6.23. Odsetek osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w temperaturze otoczenia 26°C w czasie działania PV – warunki letnie.

Fig.6.23. Percentage of subjects reporting thermal comfort on particular body parts in ambient temperature 26°C using PV – summer conditions.

Najkorzystniejszy okazał się wariant T 26/24, gdzie odsetek odpowiedzi *komfortowo* na twarzy wynosił 80%, a na pozostałych częściach ciała w granicach 90-95%. Zbliżone wyniki uzyskano dla wariantu T 26/25, gdzie odnotowano nieco wyższy odsetek osób odczuwających komfort na twarzy (85%) i niższy na pozostałych (85-90%). Zaobserwowano również pozytywniejsze wyniki uzyskiwane na wszystkich segmentach poza twarzą.

Pomiary prowadzone w temperaturze otoczenia 28°C wykazały podobny charakter jak w przypadku 26°C. Pomimo mniejszego odsetka osób deklarujących komfortowe odczucia na twarzy (ok. 70%) w porównaniu do pozostałych części ciała (80%) nawiew na twarz okazał się korzystniejszy w porównaniu do wariantów z nawiewem na kostki. Warianty te uzyskały jedynie 40% odpowiedzi *komfortowo* w przypadku twarzy, a odsetek ten rósł dla pozostałych części ciała. Taki charakter odpowiedzi wskazuje na duże znaczenie głowy w procesach termoregulacji i korzystniejszy nawiew w kierunku twarzy, a zmniejszenie odsetka odczuć

komfortu na twarzy w porównaniu z pozostałymi częściami ciała jest wywołane podrażnieniem spojówek, nie odczuciami wyłącznie ciepłymi.



Rys.6.24. Odsetek osób odczuwających komfort na poszczególnych częściach ciała w temperaturze otoczenia 28°C w czasie działania PV – warunki letnie.

Fig.6.24. Percentage of subjects reporting thermal comfort on particular body parts in ambient temperature 28°C using PV – summer conditions.

Jak pokazują powyższe analizy najkorzystniejszymi wariantami okazały się: T 24/24, T 26/24 oraz T 28/26, zarówno analizując odczucia cieplne na całym ciele, jak i na poszczególnych jego częściach. Jednocześnie warianty T 26/25 oraz T 28/27 charakteryzowały się zbliżonym odsetkiem osób odczuwających komfort, a analiza statystyczna za pomocą testu Friedman'a nie wykazała istotnych statystycznie różnic w odpowiedziach ochotników pomiędzy tymi wariantami. Na tej podstawie można uznać, że zwiększona prędkość przepływu powietrza spowodowana lokalnym nawiewem na głowę i klatkę piersiową ma większy wpływ na wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem i otoczeniem niż wartość temperatury nawiewanego powietrza z PV.

Podobnie jak w warunkach zimowych, za pomocą korelacji R-Spearmana, otrzymano istotną statystycznie zależność wzrostu odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury otoczenia lub temperatury nawiewu na poziomie $p < 0,001$, co potwierdziło poprawność przeprowadzonych pomiarów.

Pozostałe zależności otrzymane w czasie badań przedstawiono w załącznikach.

6.3. KLASYFIKACJA ODCZUĆ CIEPLNYCH WG STREF KOMFORTU NILSSON'A

Wykorzystanie manekina termicznego w badaniach umożliwiło określenie wartości temperatury na powierzchni każdego segmentu, a następnie obliczenie temperatury ekwiwalentnej (t_{eq}) dla poszczególnych segmentów zgodnie ze wzorem [5.1].

Zastosowanie t_{eq} podczas analizy wyników pozwoliło na porównanie wszystkich serii pomiarowych prowadzonych w różnych warunkach, tj. różnej temperaturze otoczenia, nawiewu oraz kierunku nawiewanego powietrza PV. Dodatkowo otrzymane wyniki zostały zestawione ze strefami komfortu wyznaczonymi przez H. Nilsson'a [80].

Nilsson podczas swoich badań z wykorzystaniem manekina termicznego oraz z udziałem 50 ochotników określił strefy komfortu w zależności od wartości temperatury ekwiwalentnej dla poszczególnych części ciała oraz izolacyjności ubrania noszonego przez człowieka. W swoich badaniach, w ankietach zastosował skalę odczuć cieplnych LMV (*Local Mean Vote*) [99] składającą się z 11 stopni, przedstawioną w tabeli 6.3.

Na tej podstawie stworzył strefy komfortu dla warunków określonych jako: *brak ubrania*, *lekkie ubranie letnie*, *ubranie zimowe*. Warunki te odpowiadały izolacyjności odzieży łącznie z warstwą powietrza odpowiednio: *brak ubrania* – 0,9 clo, *lekki ubranie letnie* – 1,1 clo, *ubranie zimowe* – 1,6 clo. Stworzone strefy komfortu odpowiadały podziałowi zgodnemu ze skalą wg ASHRAE, tj. *za zimno* (-2 i więcej), *komfortowo chłodno* (-1), *komfortowo neutralnie* (0), *komfortowo ciepło* (+1), *za ciepło* (+2 i więcej).

Na wykresach 6.26. – 6.30. przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów dla ubranego manekina prowadzone w warunkach zimowych i letnich w korelacji z wyznaczonymi przez Nilsson'a strefami komfortu. Wykresy dotyczące badań z wykorzystaniem nagiego manekina termicznego zamieszczono w załącznikach.

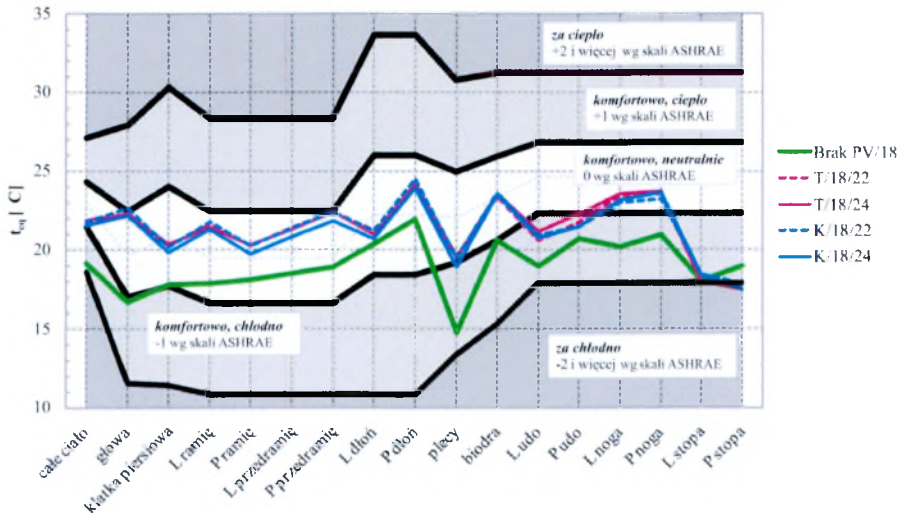
Tab.6.3. Skala odczuć cieplnych LMV (*Local Mean Vote*).

Tab.6.3. Thermal sensation scale LMV (*Local Mean Vote*).

Chłód nie do zaakceptowania	-5
Bardzo zimno	-4
Zimno	-3
Chłodno	-2
Lekko chłodno	-1
Obojętnie	0
Lekko ciepło	1
Ciepło	2
Gorąco	3
Bardzo gorąco	4
Ciepło nie do zaakceptowania	5

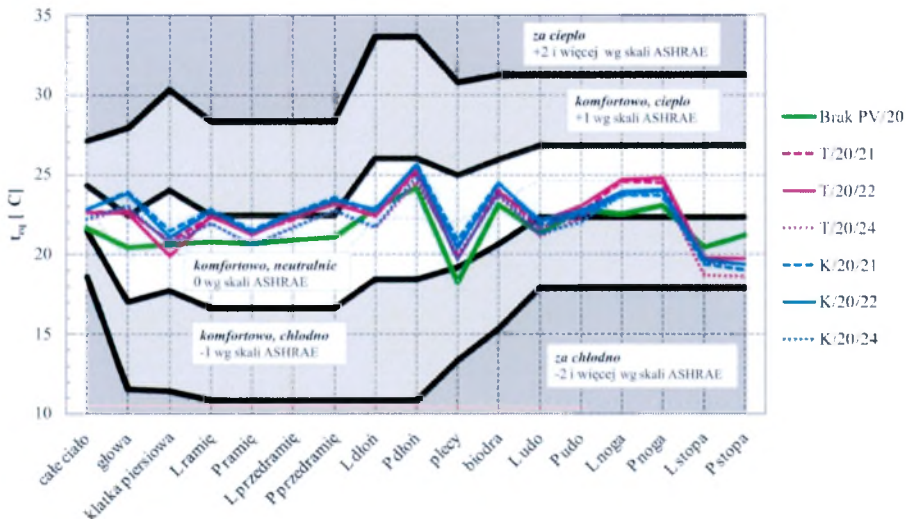
Rys.6.25. opisujący warunki zimowe z wariantami w temperaturze otoczenia 18°C pokazuje, iż zastosowanie PV o temperaturze nawiewu wyższej o 4-6 K umożliwia uzyskanie korzystniejszych odczuć cieplnych i utrzymanie parametrów na poziomie komfortu (*neutralnie*) niemalże wszystkich segmentów ciała. Wyjątek stanowiły stopy, w przypadku których niezależnie od pracy systemu PV odczucia ciepłe, zgodnie ze skalą Nilsson'a, kształtowały się na granicy *komfortowo chłodno* i *za zimno*.

Zbliżone wyniki otrzymano w przypadku wariantów wykonanych w temperaturze otoczenia wynoszącej 20°C – rys. 6.26.



Rys.6.25. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 18°C (warunki zimowe 1,6 clo).

Fig.6.25. Comfort zones and t_{eq} value for clothed manikin in ambient temperature 18°C (winter conditions 1,6 clo).

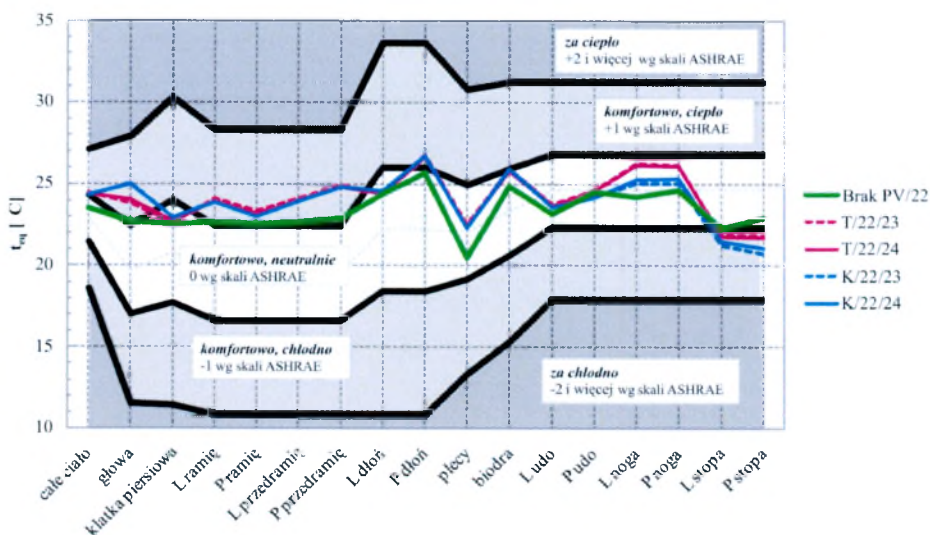


Rys.6.26. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 20°C (warunki zimowe 1,6 clo).

Fig.6.26. Comfort zones and t_{eq} value for clothed manikin in ambient temperature 20°C (winter conditions 1,6 clo).

System PV umożliwił osiągnięcie na poszczególnych segmentach wartości t_{eq} odpowiadającej zakresowi *komfortowo neutralnie* wg stref komfortu Nilsson'a, z wyłączeniem stóp, których t_{eq} , zarówno w wariantach z działającą, jak i nie działającą wentylacją indywidualną osiągała wartości odpowiadające odczuciu *komfortowo chłodno*. Jednak działanie systemu PV w przypadku $t_a=20^\circ\text{C}$ nie podniosło wartości temperatury ekwiwalentnej w takim stopniu, jak w wariantach prowadzonych w temperaturze otoczenia 18°C . Różnica w wartościach temperatury dla $t_a=18^\circ\text{C}$ dochodziła do 5 K dla głowy i pleców, a w $t_a=20^\circ\text{C}$ nie przekraczała 3 K. Jednocześnie zarówno w $t_a=18^\circ\text{C}$ jak i $t_a=20^\circ\text{C}$ działanie PV zapewniało osiągnięcie bardzo zbliżone wartości t_{eq} . Co świadczy o możliwości nieznacznego obniżenia temperatury otoczenia (do wartości 18°C) w czasie działania PV, a tym samym obniżenie zapotrzebowania na moc grzewczą w okresach zimowych.

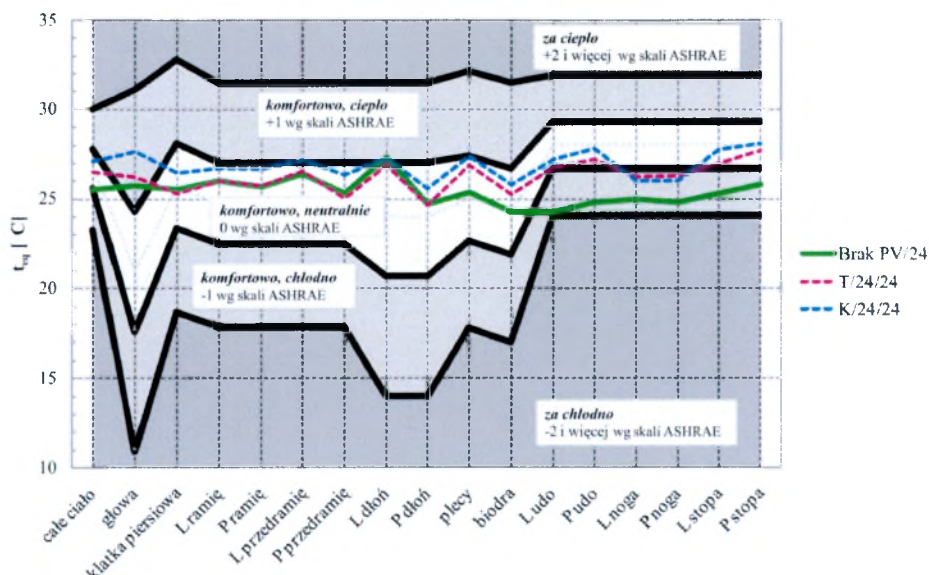
Utrzymywanie temperatury otoczenia 22°C (rys.6.27.) niezależnie od działania PV, wg klasyfikacji Nilsson'a, pozwalało zapewnić odczucie *komfortowo ciepło* dla górnych części ciała oraz *komfortowo neutralnie* dla dolnych części ciała.



Rys.6.27. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 22°C (warunki zimowe 1,6 clo).

Fig.6.27. Comfort zones and t_{eq} value for clothed manikin at ambient temperature 22°C (winter conditions 1,6 clo).

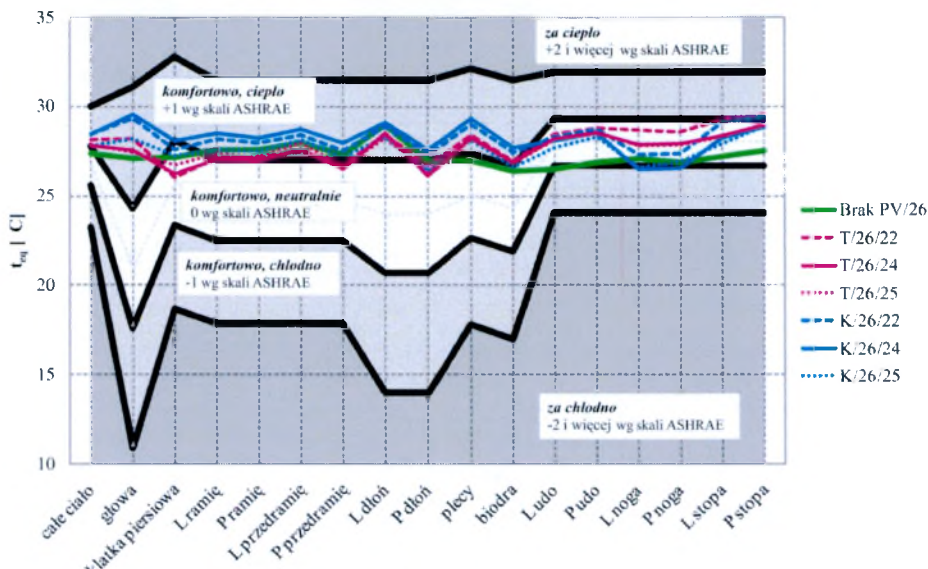
Analogicznych obserwacji dokonano dla warunków letnich. W wariantach prowadzonych w temperaturze 24°C (rys.6.28.) działanie systemu PV powodowało wzrost temperatury ekwiwalentnej i utrzymanie większości segmentów w strefie odczuć neutralnych. Brak lokalnego nawiewu spowodował obniżenie wartości temperatury ekwiwalentnej zwłaszcza na dolnych segmentach manekina, co w odniesieniu do stref komfortu wskazywało na odczucia *lekko chłodno*, które zgodnie ze skalą traktowane są jako komfortowe.



Rys.6.28. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 24°C (warunki letnie 1,1 clo).

Fig.6.28. Comfort zones and t_{eq} value for clothed manikin in ambient temperature 24°C (summer conditions 1,1 clo).

Opisane w rozdziale 6.1 zmiany t_{eq} podczas wariantów w temperaturze otoczenia wynoszącej 26°C (rys.6.29.) w zestawieniu ze strefami komfortu wykazały warunki na granicy *neutralnie* i *lekko ciepło*. Zastosowanie nawiewu lokalnego na twarz spowodowało nieznacznie obniżenie wartości t_{eq} na górnych segmentach manekina, a tym samym osiągnięcie obszaru *neutralnie*.



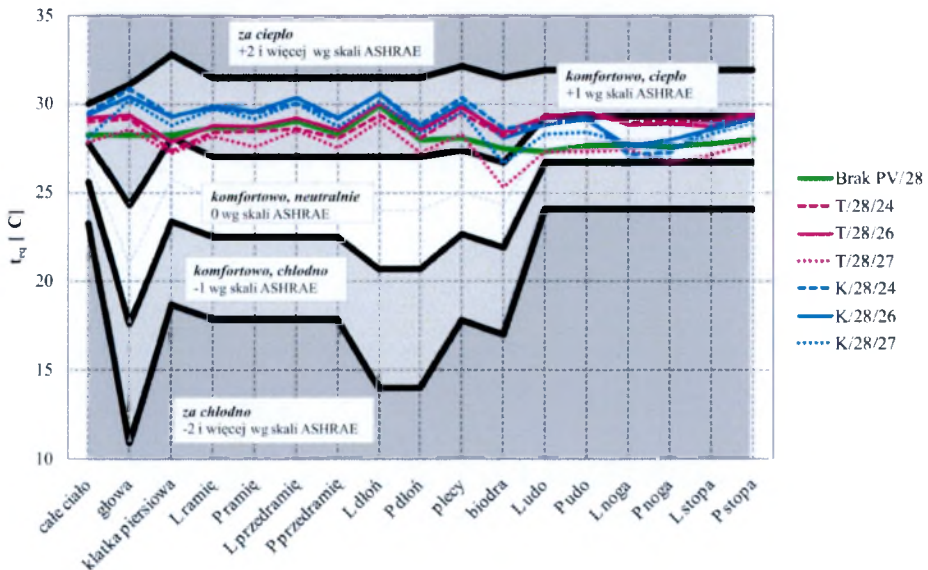
Rys.6.29. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 26°C (warunki letnie 1,1 clo).

Fig.6.29. Comfort zones and t_{eq} value for clothed manikin in ambient temperature 26°C (summer conditions 1,1 clo).

Utrzymywanie temperatury otoczenia na poziomie 28°C (rys.6.30) dla górnych segmentów manekina niezależnie od zastosowanej kombinacji nawiewu PV powodowało osiągnięcie obszaru *lekkie ciepło* i lokowało się nieco wyżej w porównaniu z wariantami w 26°C. Natomiast nie odnotowano różnic w przypadku dolnych segmentów, które w każdym przypadku osiągały zakres *neutralnie*.

Odnosząc jednak powyższe analizy stref komfortu do odpowiedzi jakich udzielili ochotnicy w czasie badań, zwłaszcza w temperaturze otoczenia 26 i 28°C można uznać, że wartość temperatury ekwiwalentnej dla granicy stref *komfortowo neutralnie* i *komfortowo ciepło* jest zbyt niska. Odpowiedzi ankietowanych ochotników w wariantach prowadzonych w temperaturze otoczenia 26°C zawierały się w granicach $+0,1 \div +1,3$, przy czym wartości powyżej +1 odpowiadające strefie *komfortowo ciepło* odnotowano jedynie na twarzy i szyi, a wartości dla pozostałych segmentów nie przekraczały +0,65. Dodatkowo niższe wartości odnotowano na segmentach, na które następował bezpośredni nawiew powietrza z PV. W

przypadku pomiarów prowadzonych w temperaturze 28°C ankietowani oceniali swoje odczucia cieplne na poziomie 0,6÷1,65, przy czym ponownie maksymalne wartości dotyczyły twarzy i szyi podczas nawiewu powietrza PV na kostki, a w przypadku pozostałych segmentów odpowiedzi wynosiły ok. 0,85, nie przekraczał więc granicy *komfortowo ciepło*.



Rys.6.30. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla ubranego manekina i temperatury otoczenia równej 28°C (warunki letnie 1,1 clo).

Fig.6.30. Comfort zones and t_{eq} value for clothed manikin in ambient temperature 28°C (summer conditions 1,1 clo).

Podobnie jak w przypadku temperatury otoczenia 26°C niższe wartości odpowiedzi odnotowano na częściach ciała, na które następował bezpośredni nawiew powietrza z PV.

7. WYZNACZENIE ZMIENNOŚCI ODCZUĆ CIEPLNYCH W ZALEŻNOŚCI OD TEMPERATURY OTOCZENIA ORAZ TEMPERATURY NAWIEWU I KIERUNKU NAWIEWANEGO POWIETRZA PRZEZ SYSTEM PV.

Przeprowadzone badania z udziałem ochotników oraz z wykorzystaniem manekina termicznego wykazały istnienie zależności pomiędzy odczuciami cieplnymi, a temperaturą oraz kierunkiem powietrza nawiewanego przez PV i temperaturą otoczenia. Aby możliwe było dokładne porównanie wszystkich przeprowadzonych wariantów badań oraz sformułowanie zależności matematycznych na podstawie danych pomiarowych obliczono wartości t_{eq} dla poszczególnych serii pomiarowych. Posłużenie się t_{eq} pozwoliło określić jednym parametrem zróżnicowane warunki środowiska wewnętrznego wytwarzane w czasie kolejnych wariantów badań i w konsekwencji umożliwiło określenie zależności matematycznych pomiędzy odczuciami cieplnymi, a t_{eq} .

Dzięki zastosowaniu w badaniach manekina termicznego uzyskano wartości temperatury na powierzchni każdego z 16 segmentów. Dane te pozwoliły na wyznaczenie temperatury ekwiwalentnej (t_{eq}) zarówno dla pojedynczych segmentów jak również dla całego ciała (rozdział 6.1). Odczucia ciepłe uzyskane dzięki przeprowadzonym, w tych samych warunkach, ankietom umożliwiły zestawienie obydwu parametrów i określenie ich wzajemnej korelacji. Opisanie punkty umożliwiły wykreślenie linii trendu i określenie zależności matematycznych w postaci liniowych korelacji poziomu odczuć cieplnych w siedmiostopniowej skali ASHRAE (-3÷+3) od wartości temperatury ekwiwalentnej.

Na podstawie rezultatów badań sformułowano zależność w ogólnej postaci:

$$f(t_{eq}) = a \cdot t_{eq} + b, \quad (7.1)$$

gdzie:

t_{eq} – wartość temperatury ekwiwalentnej [°C],

a – współczynnik kierunkowy,

b – współrzędna punkty przecięcia z osią Oy.

Dla każdego równania wyznaczono współczynnik korelacji liniowej (R^2), który opisuje siłę liniowego związku pomiędzy dwiema zmiennymi – wartością odczuć cieplnych wg skali ASHRAE oraz wartością temperatury ekwiwalentnej.

Na rys.7.1. – 7.10. przedstawiono otrzymane wyniki badań wraz z zależnościami matematycznymi dla całego ciała w warunkach letnich i zimowych dla nawiewu powietrza na twarz i kostki oraz dla poszczególnych części ciała w warunkach letnich w przypadku nawiewu powietrza na twarz i kostki. Dodatkowo rezultaty analizy wszystkich zależności przedstawiono w tabelach 7.1 i 7.2.

Zmienność odczuć ciepłych całego ciała w zależności od t_{eq} w warunkach zimowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć ciepłych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla całego ciała w warunkach zimowych dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,13 \cdot t_{eq} - 3,13 \quad (7.2)$$

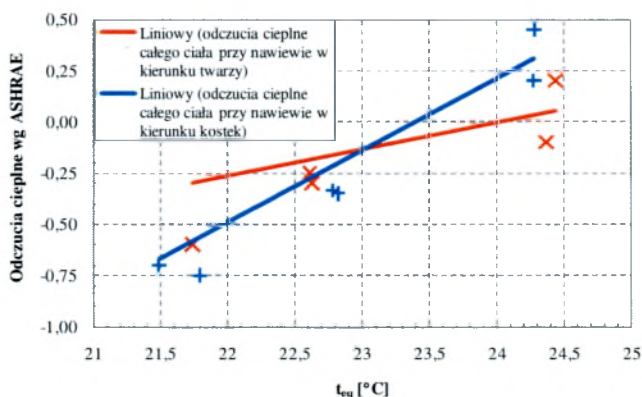
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,33$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,35 \cdot t_{eq} - 8,21 \quad (7.3)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,74$.

Na rysunku 7.1. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.1. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć ciepłych całego ciała w warunkach zimowych, $R^2=0,33$ – nawiew na twarz, $R^2=0,74$ – nawiew na kostki.

Fig.7.1. Influence of t_{eq} on thermal sensation of whole body in winter conditions, $R^2=0,33$ – PV air flow at face level, $R^2=0,74$ – PV air flow at ankles level.

Zmienność odczuć ciepłych całego ciała w zależności od t_{eq} w warunkach letnich.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć ciepłych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla całego ciała w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,035 \cdot t_{eq} - 0,56 \quad (7.4)$$

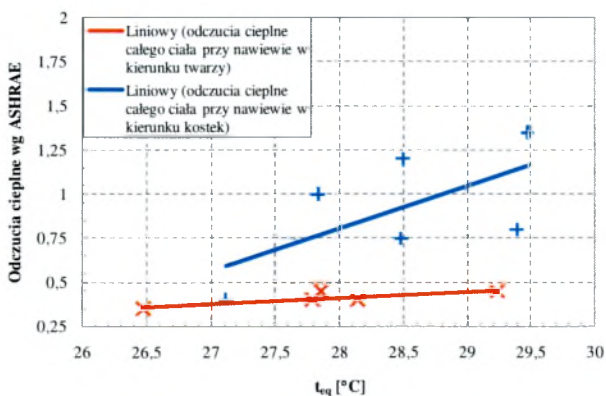
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,68$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,24 \cdot t_{eq} - 5,89 \quad (7.5)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,40$.

Na rysunku 7.2. przedstawiono punkty pomiarowe wraz ze sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.2. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć ciepłych całego ciała w warunkach letnich, $R^2=0,68$ – nawiew na twarz, $R^2=0,40$ – nawiew na kostki.

Fig.7.2. Influence of t_{eq} on thermal sensation of whole body in summer conditions, $R^2=0,68$ – PV air flow at face level, $R^2=0,40$ – PV air flow at ankles level.

Analiza otrzymanych zależności dla całego ciała w okresie zimowym (rys.7.1.) wykazała podczas nawiewu powietrza na kostki większy wzrost odczuć cieplnych przy wzroście t_{eq} w porównaniu z nawiewem powietrza na twarz. Korelacja ta wskazuje na korzystniejsze właściwości nawiewu powietrza w kierunku kostek, dzięki któremu przy niższych wartościach t_{eq} , a więc przy niższych rzeczywistych parametrach cieplnych w pomieszczeniu, możliwe jest osiągnięcie komfortu cieplnego. Jednak w obszarze odczuć *lekko chłodno* nawiew powietrza na twarz odbierany jest jako cieplejszy i bardziej komfortowy.

Nieco odmienne wyniki uzyskano dla całego ciała w warunkach letnich (rys.7.2.). W tym przypadku również, wyższym współczynnikiem kierunkowym charakteryzuje się zależność sformułowana dla nawiewu na kostki, co powoduje większy wzrost odczuć cieplnym ze wzrostem t_{eq} w porównaniu do serii pomiarowych z nawiewem na twarz. Jednak poziom odczuć cieplnych w danej t_{eq} dla obu przypadków jest wyraźnie różny. Nawiew powietrza na twarz powoduje niższe odczucia ciepłe w tej samej t_{eq} w porównaniu do wariantu z nawiewem powietrza na kostki. Zjawisko to wskazuje na korzystniejszy w okresie letnim nawiew na twarz, który zapewni odczucie komfortu cieplnego również przy wyższych wartościach temperatury w otoczeniu. Dodatkowo wyznaczona zależność wskazuje na bardzo znikomy wzrost odczuć cieplnych w analizowanym zakresie (od +0,3 – +0,5), nie przekraczający wartości +0,5, co dowodzi możliwości zapewnienia komfortu cieplnego za pomocą systemu PV z nawiewem na twarz również przy temperaturze otoczenia na poziomie 28°C.

Zmienność odczuć cieplnych poszczególnych części ciała w zależności od t_{eq} w warunkach letnich.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **twarzy** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,17 \cdot t_{eq} - 4,05 \quad (7.6)$$

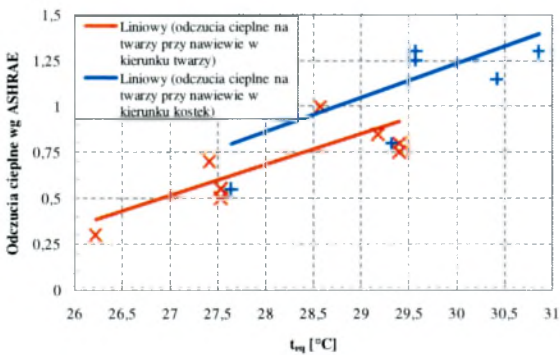
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,68$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,19 \cdot t_{eq} - 4,35 \quad (7.7)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,40$.

Na rysunku 7.3. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.3. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć cieplnych na twarzy w warunkach letnich, $R^2=0,68$ – nawiew na twarz, $R^2=0,40$ – nawiew na kostki.

Fig.7.3. Influence of t_{eq} on thermal sensation of face in summer conditions, $R^2=0,68$ – PV air flow at face level, $R^2=0,40$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla szyi w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,17 \cdot t_{eq} - 4,09 \quad (7.8)$$

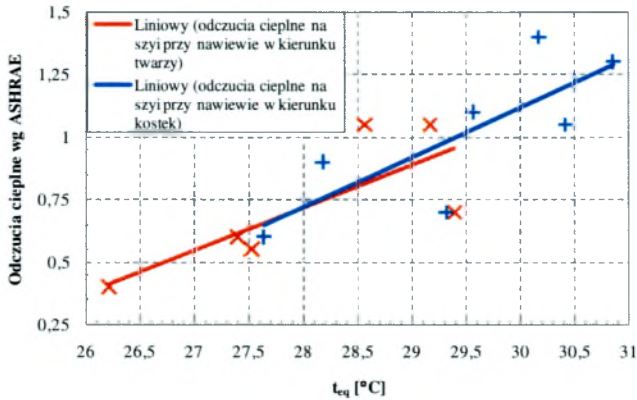
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,60$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,20 \cdot t_{eq} - 4,85 \quad (7.9)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,63$.

Na rysunku 7.4. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.4. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć cieplnych na szyi w warunkach letnich, $R^2=0,60$ – nawiew na twarz, $R^2=0,63$ – nawiew na kostki.

Fig.7.4. Influence of t_{eq} on thermal sensation of neck in summer conditions, $R^2=0,60$ – PV air flow at face level, $R^2=0,63$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **klatki piersiowej** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,23 \cdot t_{eq} - 5,24 \quad (7.10)$$

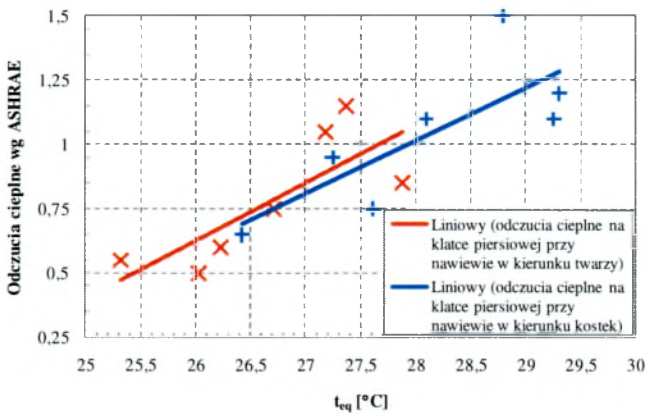
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,63$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,21 \cdot t_{eq} - 4,75 \quad (7.11)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,61$.

Na rysunku 7.5. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.5. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć cieplnych na klatce piersiowej w warunkach letnich, $R^2=0,63$ – nawiew na twarz, $R^2=0,61$ – nawiew na kostki.

Fig.7.5. Influence of t_{eq} on thermal sensation of chest in summer conditions, $R^2=0,63$ – PV air flow at face level, $R^2=0,61$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **lewej reki** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,18 \cdot t_{eq} - 4,37 \quad (7.14)$$

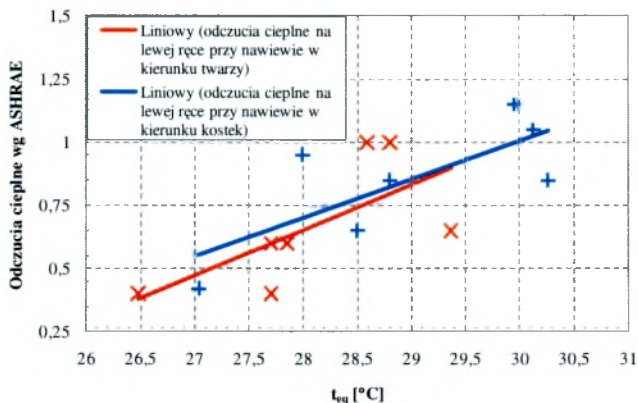
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,46$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,15 \cdot t_{eq} - 3,54 \quad (7.15)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,56$.

Na rysunku 7.6. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.6. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć cieplnych na lewym ręku w warunkach letnich, $R^2=0,46$ – nawiew na twarz, $R^2=0,56$ – nawiew na kostki.

Fig.7.6. Influence of t_{eq} on thermal sensation of left arm in summer conditions, $R^2=0,46$ – PV air flow at face level, $R^2=0,56$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następującą zależność liniową opisującą zmianę odczuć ciepłych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **prawej ręki** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = 0,14 \cdot t_{eq} - 3,12 \quad (7.16)$$

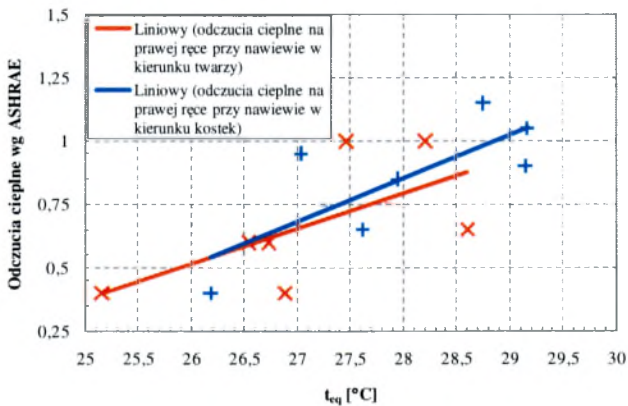
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,41$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,17 \cdot t_{eq} - 3,97 \quad (7.17)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,59$.

Na rysunku 7.7. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowaną zależnością matematyczną.



Rys.7.7. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć ciepłych na prawym ręku w warunkach letnich, $R^2=0,41$ – nawiew na twarz, $R^2=0,59$ – nawiew na kostki.

Fig.7.7. Influence of t_{eq} on thermal sensation of right arm in summer conditions, $R^2=0,41$ – PV air flow at face level, $R^2=0,59$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **bioder** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = -0,018 \cdot t_{eq} - 1,31 \quad (7.12)$$

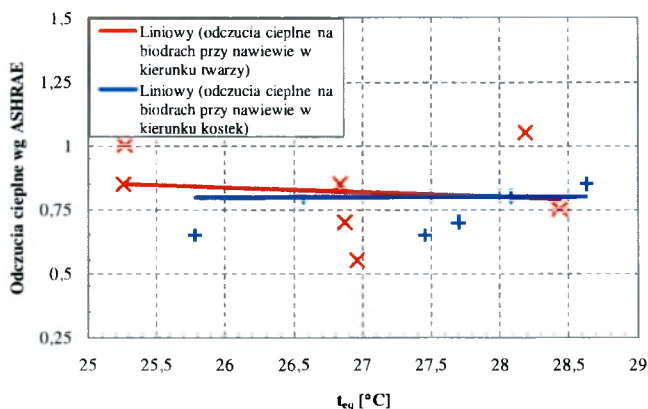
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,02$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,0028 \cdot t_{eq} - 0,72 \quad (7.13)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,0003$.

Na rysunku 7.8. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.8. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć cieplnych na biodrach w warunkach letnich, $R^2=0,02$ – nawiew na twarz, $R^2=0,0003$ – nawiew na kostki.

Fig.7.8. Influence of t_{eq} on thermal sensation of pelvis arm in summer conditions, $R^2=0,02$ – PV air flow at face level, $R^2=0,0003$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **lewej nodze** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = -0,034 \cdot t_{eq} + 1,65 \quad (7.18)$$

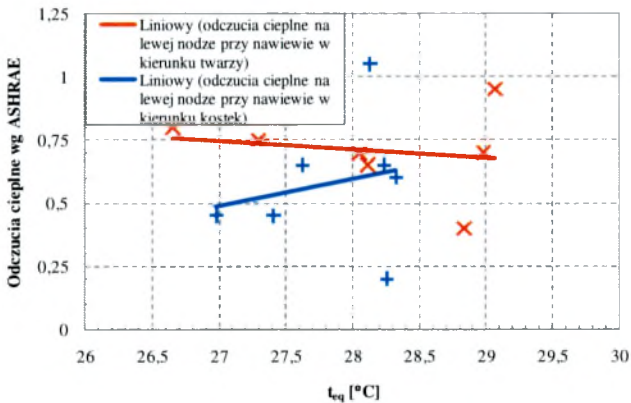
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,03$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,10 \cdot t_{eq} - 2,29 \quad (7.19)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,04$.

Na rysunku 7.9. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.9. Wpływ t_{eq} na poziom odczuć cieplnych na lewej nodze w warunkach letnich,

$R^2=0,03$ – nawiew na twarz, $R^2=0,04$ – nawiew na kostki.

Fig.7.9. Influence of t_{eq} on thermal sensation of left leg in summer conditions, $R^2=0,03$ – PV air flow at face level, $R^2=0,04$ – PV air flow at ankles level.

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano następujące zależności liniowe opisujące zmianę odczuć cieplnych wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej dla **prawej nodze** w warunkach letnich dla nawiewu powietrza na twarz i kostki:

Dla nawiewu na twarz:

$$f(t_{eq}) = -0,023 \cdot t_{eq} + 1,36 \quad (7.20)$$

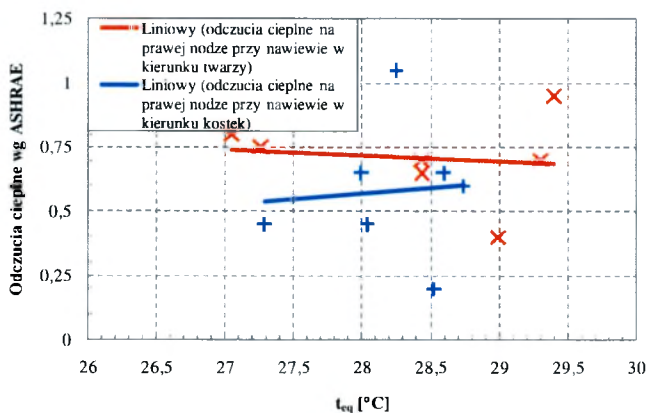
Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,02$.

Dla nawiewu na kostki:

$$f(t_{eq}) = 0,044 \cdot t_{eq} - 0,67 \quad (7.21)$$

Zależność tą wyznaczono przy współczynniku korelacji $R^2=0,01$.

Na rysunku 7.10. przedstawiono punkty pomiarowe wraz z sformułowanymi zależnościami matematycznymi.



Rys.7.10. Wpływ t_{eq} na poziomy odczuć cieplnych na prawej nodze w warunkach letnich, $R^2=0,02$ – nawiew na twarz, $R^2=0,01$ – nawiew na kostki.

Fig.7.10. Influence of t_{eq} on thermal sensation of right leg in summer conditions, $R^2=0,02$ – PV air flow at face level, $R^2=0,01$ – PV air flow at ankles level.

Analiza otrzymanych rezultatów badań prowadzona dla poszczególnych segmentów wykazała zbliżone zależności odczuć cieplnych i t_{eq} dla górnych części ciała tj. twarz, szyi, klatki piersiowej oraz rąk. Korelacje te mają podobny charakter do tych otrzymanych dla całego ciała w warunkach letnich, przy czym największy wpływ kierunku nawiewu powietrza na odczucia cieplne (jak w przypadku zależności dla całego ciała) widoczny jest dla twarzy i maleje w przypadku pozostałych części ciała w kolejności: szyja, klatka piersiowa i ręce. W przypadku twarzy wyraźnie widoczne są niższe odczucia cieplne podczas nawiewania powietrza przez system PV w jej kierunku. Różnica ta maleje dla pozostałych, górnych części ciała, co wynika z mniejszej ekspozycji tych elementów na bezpośrednie działanie strumienia powietrza nawiewanego. W przypadku zależności dla klatki piersiowej oraz rąk różnice pomiędzy nawiewem na twarz i kostki są nieznaczne i można je uznać za pomijalnie małe dla zakresu prowadzonych badań. Ponadto wykazano nawet w najbardziej niekorzystnym wariancie prowadzonych badań, czyli $t_a=28^{\circ}\text{C}$ oraz $t_n=27^{\circ}\text{C}$ odczucia cieplne na tych segmentach wynosiły ok. +0,8 co odpowiada odczuciu *komfortowo ciepło*.

Tab.7.1. Rezultaty analizy regresji dla zależności t_{eq} i odczuć cieplnych w wariantach z nawiewem na twarz.

Tab.7.1. Results of analysis of the regression for t_{eq} and thermal sensations for PV air flow at face level variants.

Część ciała		Współczynnik kierunkowy a	współrzędna punkty przecięcia z osią Oy b	Współczynnik korelacji R^2
Twarz		0,17	-4,05	0,68
Szyja		0,17	-4,09	0,60
Klatka piersiowa		0,23	-5,24	0,63
Ręka prawa		0,14	-3,12	0,41
Ręka lewa		0,18	-4,37	0,46
Biodra		-0,02	1,31	0,02
Noga prawa		0,02	1,36	0,02
Noga lewa		-0,03	1,65	0,03
Całe ciało	Zima	0,13	-3,13	0,33
	Lato	0,035	-0,56	0,68

Tab. 7.2. Rezultaty analizy regresji dla zależności t_{eq} i odczuć cieplnych w wariantach z nawiewem na kostki.

Tab.7.2. Results of analysis of the regression for t_{eq} and thermal sensations for PV air flow at ankles level variants.

Część ciała		Współczynnik kierunkowy a	współrzędna punkty przecięcia z osią Oy b	Współczynnik korelacji R^2
Twarz		0,19	-4,35	0,40
Szyja		0,20	-4,85	0,63
Klatka piersiowa		0,21	-4,75	0,61
Ręka prawa		0,17	-3,98	0,59
Ręka lewa		0,15	-3,54	0,56
Biodra		0,003	+0,72	0,0003
Noga prawa		0,04	-0,67	0,007
Noga lewa		0,10	-2,29	0,04
Całe ciało	Zima	0,35	-8,21	0,74
	Lato	0,24	-5,89	0,40

Również dla górnych części ciała, będących w bezpośrednim zasięgu strumienia powietrza, odnotowano najwyższe współczynniki korelacji dla sformułowanych zależności. Obszary te, zwłaszcza twarz, szyja i klatka piersiowa cechują się największą liczbą termoreceptorów, a utrzymanie w nich odpowiedniej temperatury wewnętrznej jest głównym zadaniem układu termoregulacji. Dlatego zmiana temperatury ekwiwalentnej dla tych części ciała wyraźnie wpływa na odczucia cieplne.

Na dolnych częściach ciała tj. biodra oraz nogi współczynniki korelacji dla wyznaczonych równań są zbliżone do zera, co w połączeniu z wcześniejszymi analizami wskazuje na brak zależności pomiędzy zmianą t_{eq} a odczuciami cieplnymi. Powodem takiego zjawiska w przypadku bioder może być między innymi osłonięcie i dodatkowa izolacyjność cieplna krzesła oraz osłonięcie biurkiem, które uniemożliwiało swobodny przepływ powietrza nawiewanego systemem PV. Nogi pomimo bliskiego sąsiedztwa nawiewnika charakteryzują

się małą liczbą termoreceptorów oraz często osłonięte są odzieżą o znacznej izolacyjności cieplnej co mogło być powodem znikomej wrażliwością na zmianę parametrów.

Zależności matematyczne zostały wyznaczone przy współczynnikach korelacji w granicach $R^2=0,40 \div 0,74$. Na wartości współczynników korelacji dla wyznaczonych zależności liniowych mogły wpłynąć czynniki takie jak:

- Subiektywne odczuwanie wrażeń cieplnych,
- Samopoczucie i ogólna kondycja ochotnika,
- Subiektywna interpretacja skali komfortu wg ASHRAE.

Elementy te mogły w znaczący sposób wpłynąć na zróżnicowanie udzielanych przez ochotników odpowiedzi, a tym samym na ich współzależność.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na potrzeby badań zostało wykonane stanowisko badawcze składające się z biurka z wbudowanymi dwoma nawiewnikami dostarczającymi powietrze bezpośrednio do strefy oddychania człowieka (okolice twarzy) lub na kostki. Pomiary prowadzono przy wykorzystaniu jednego rodzaju nawiewników oraz przy stałym strumieniu objętości powietrza wynoszącym $72 \text{ m}^3/\text{h}$ (20 l/s) w warunkach lata oraz zimy.

Weryfikacja odczuć cieplnych, w zadanych warunkach otoczenia, realizowano z udziałem 20 ochotników (mężczyzn), którzy zostali poproszeni o wypełnienie ankiet zawierających skale służące do określania lokalnego i całościowego komfortu cieplnego. Wyniki tych ankiet zostały następnie porównane z odczytami uzyskanymi podczas badań prowadzonych przy wykorzystaniu 16 – segmentowego manekina termicznego.

Na podstawie badań przeprowadzonych z zastosowaniem manekina termicznego zaobserwowano, iż wartości t_{eq} dla manekina ubranego i nagiego znacznie się różniły. Zastosowanie nawiewu PV powodowało u manekina nagiego spadek wartości t_{eq} niezależnie od przyjętego wariantu badania, u manekina ubranego występowało obniżenie lub wzrost wartości t_{eq} , zależnie od temperatury powietrza nawiewanego. W czasie badań z nagim manekinem efekt chłodzenia manekina zależał głównie od prędkości nawiewanego powietrza z PV, bardziej niż od temperatury tego powietrza. W czasie badań z ubranym manekinem największe różnice w wartościach t_{eq} zaobserwowano na nieosłoniętych segmentach manekina, tj. głównie głowie i dłoniach. Na dolnych segmentach manekina (stopy i nogi) występowała większa zmiana wartości t_{eq} niż na wyższych segmentach, co mogło być spowodowane większą prędkością powietrza omywającego ze względu na pozycje zajmowaną przy biurku. Można zatem przypuszczać, że głównym parametrem wpływającym na wartość t_{eq} była izolacyjność cieplna zastosowanej odzieży oraz prędkość powietrza omywającego manekin. Na tej podstawie można przypuszczać, iż projektowanie systemu PV powinno umożliwiać użytkownikom regulację głównie prędkości powietrza, w większym zakresie niż jego temperatury, w celu dopasowania tych parametrów do zmieniającej się sezonowo izolacyjności cieplnej odzieży.

Do podobnych obserwacji doprowadziła analiza wyników badań prowadzonych z udziałem ochotników. Rezultaty wariantów letnich wykazały, że nawiew powietrza o niższej temperaturze niż otoczenie nie wpływa w dużym stopniu na poprawę odczuć cieplnych. Warianty najbliższe warunkom izotermicznym charakteryzowały się zbliżonym odsetkiem

osób odczuwających komfort w porównaniu z pozostałymi a analiza statystyczna za pomocą testu Friedman'a nie wykazała istotnych statystycznie różnic w odpowiedziach ochotników pomiędzy tymi wariantami, a seriami o niższej temperaturze nawiewu powietrza. Na tej podstawie można uznać, że prędkość lokalnie nawiewanego powietrza ma większy wpływ na wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem i otoczeniem, a tym samym na możliwość zapewnienia komfortu cieplnego niż jego temperatura. W okresie zimowym obniżenie temperatury otoczenia poniżej 20°C (powszechnie przyjmowanej dla okresu zimowego jak optymalna) jest możliwe jednak powoduje zmniejszenie odsetka osób akceptujących takie warunki jako komfortowe. Dlatego niezbędna w takich przypadkach jest kompensacja poprzez zastosowanie lokalnego ogrzewania.

Wnioski:

1. Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie zależności matematycznych (7.2 – 7.21) opisujących korelację pomiędzy wartościami odczuć cieplnych człowieka (w skali odczuć ASHRAE), a temperaturą ekwiwalentną (t_{eq}), dla całego ciała oraz poszczególnych jego części w zależności od kierunku nawiewanego powietrza z systemu PV.
2. Zależności dla całego ciała wskazują większe zmiany odczuć cieplnych wraz ze wzrostem t_{eq} w przypadku nawiewu powietrza na kostki. Nawiew powietrza na twarz charakteryzuje się mniejszą wartością współczynnika kierunkowego (a).
3. Działanie systemu PV z nawiewem na twarz w okresie letnim powoduje obniżenie odczuć cieplnych w stosunku do nawiewu powietrza na kostki o ok. 0,5 (wg skali ASHRAE), przy czym różnica ta rośnie wraz ze wzrostem t_{eq} .
4. W przypadku poszczególnych części ciała zależności sformułowane zostały dla twarzy, szyi, klatki piersiowej oraz rąk, czyli górnych części ciała, decydujących dla układu termoregulacji człowieka. Na biodrach oraz nogach nie stwierdzono zależności zmiany odczuć cieplnych od kierunku i temperatury nawiewanego przez system PV powietrza.
5. Zależności sformułowane dla poszczególnych części ciała mają zbliżony charakter, przy czym bezpośrednia ekspozycja na strumień powietrza z systemu PV powoduje obniżenie odczuć cieplnych w przypadku nawiewu powietrza na twarz, w stosunku do wariantów z nawiewem na kostki. Różnica ta maleje wraz z oddziaływaniem strumienia na daną część ciała i praktycznie zanika na rękach.

6. Na podstawie opisanych zależności określono preferowany kierunek nawiewu powietrza. Dla okresu letniego, podczas pracy w trybie chłodzenia korzystniejszy jest nawiew powietrza w kierunku twarzy, który zapewnia intensyfikację wymiany ciepła na istotnych z punktu widzenia układu termoregulacji częściach ciała. W okresie zimy korzystniejszy okazuje się nawiew cieplejszego powietrza na kostki, który pozwala na kompensację niższych wartości temperatury otoczenia.
7. Zastosowanie wentylacji indywidualnej daje możliwość utrzymywania w pomieszczeniach temperatury otoczenia na poziomie 26-28°C latem oraz 19-20°C zimą bez wpływu na zwiększenie odsetka osób niezadowolonych, co potencjalnie pozwala na redukcję zapotrzebowania na moc chłodniczą i grzewczą. Dodatkowo w połączeniu z nawiewem świeżego powietrza w kierunku twarzy umożliwia również wysokoskuteczną wentylację.
8. Analiza odpowiedzi udzielonych przez ochotników biorących udział w badaniu wykazała, iż parametry środowiska wewnętrznego utrzymywane w czasie wszystkich serii pomiarowych zapewniały komfort cieplny.
9. Samodzielne sterowanie prędkością oraz kierunkiem nawiewu w systemach PV przez każdego użytkownika pozwalają na dokładne dostosowanie parametrów do preferencji użytkowników. Obserwacje te potwierdzają możliwość dostosowania lokalnych parametrów środowiska wewnętrznego do indywidualnych potrzeb, utrzymując jednocześnie bardzo wysoki odsetek osób w pełni zadowolonych z panujących warunków.
10. Wyniki pracy wskazują kierunki dalszych badań, które swym zakresem powinny objąć m.in. odpowiednią konstrukcję nawiewników zapewniającą szeroki zakres indywidualnej kontroli oraz systemy regulacji.

Warszawa, 2010

9. BIBLIOGRAFIA

1. Akimoto T., Tanabe S., Yanai T., Sasaki M. (2010) Thermal comfort and productivity - Evaluation of workplace environment in a task conditioned office. *Building and Environment*, Volume 45, Issue 1, January 2010, Pages 45-50.
2. Alexei A., Georgescu S. (1971) *Komfort cieplny w budynkach*, tłum. W. Grzegorzewski, Arkady, Warszawa.
3. Amai H., Tanabe S., Akimoto T., Genma T. (2007) Thermal sensation and comfort with different task conditioning systems, *Building and Environment* 42 (2007) 3955-3964.
4. Arens E., Turner S., Zhang H., Paliaga G. (2009) Moving air for comfort, *Ashrae Journal*, vol. 51 no. 5, May 2009, 18 -28.
5. Arsen E.A., Bauman F.S., Johnson L.P., Zhang H. (1991) Testing of localized ventilation system in a new controlled environmental chamber, *Indoor Air*, 3, 263-281.
6. ASHRAE (2001) *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
7. ASHRAE (2004) *Thermal environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE Standard 55-1992).
8. ASHRAE (2009) *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
9. "Bako-Biro Z., Wargocki P., Weschler C.J., Fanger P.O. (2004) Effects of pollution from personal computers on perceived air quality, SBS symptoms and productivity in Office, *Indoor Air*, 14, 178-187."
10. Bauman F.S., Carter T.G., Baughman A.V. i in. (1998) Field study of the impact of a desktop Task/Ambient Conditioning System in office buildings, *ASHRAE Transactions: Symposia*, vol. 104, 1153-1171.
11. Bauman F.S., Zhang H., Arens E.A., Benton C.C. (1993) Localized comfort control with a desktop task conditioning system: laboratory and field measurements, *ASHRAE Transactions: Symposia*, vol. 99 part 2, 733-749.
12. Bedford T. (1936) *The warmth factor in comfort at work: A physiological study of heating and ventilation*, Industrial Health Reaserch Board Report nr 76, London: HMSO.

13. Bolashikov Z., Nikolaev L., Melikov A., Kaczmarczyk J., Fanger P.O. (2003) New air terminal devices with high efficiency for personalized ventilation application, Proceedings of Healthy Buildings 2003, Singapore 2:850-55.
14. Bolashikov Z., Nikolaev L., Melikov A., Kaczmarczyk J., Fanger P.O. (2003) Personalized ventilation: air terminal devices with high efficiency, Proceedings of Healthy Buildings 2003, Singapore, 850-855.
15. Brosseau L.M., Vesley D., Kuehn T.H., Goyal S.M., Cheng S., Gabel C.L. (1994) Identification and control of viral aerosols in indoor environments, ASHRAE Transactions 100 (2), pp. 368-79.
16. Cermak R., Melikov A.K. (2004) Design strategies for personalized ventilation, PhD thesis, International Center for Indoor Environment and Energy, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark.
17. Cermak R., Melikov A.K. (2007) Protection of Occupants from Exhaled Infectious Agents and Floor Material Emissions in Rooms with Personalized and Underfloor Ventilation, HVAC&R Research, vol. 13, nr 1, pp. 23-38.
18. Cermak R., Melikov A.K., Forejt L., Kovar O. (2006) Performance of Personalized Ventilation in Conjunction with Mixing and Displacement Ventilation, HVAC&R Research vol. 12 nr 2.
19. Cermak R., Melikov A.K. (2003) Performance of Personalized Ventilation in a Room with an Underfloor Air Distribution System, Proceedings of Healthy Buildings 2003, Singapore, 2, 486-491.
20. Cermak R., Melikov A.K. (2004) Transmission of Exhaled Air between Occupants in Rooms with Personalized and Underfloor Ventilation, Proceedings of Roomvent 2004, Coimbra: DEM-FCT, Univ. Coimbra.
21. Chludzińska M., Bogdan A. (2008) Utrzymanie komfortu użytkowników w środowisku pracy przy wykorzystaniu wentylacji indywidualnej, Air Conditioning, Protection and District heating 2008, 26 - 29 czerwca 2008, Szklarska Poręba.
22. Chludzińska M., Bogdan A. (2008) Wentylacja indywidualna – kaprys użytkownika czy uzasadniona ekonomicznie oszczędność, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 2(455) 2008.
23. Chludzińska M., Bogdan A. (2008) Zastosowanie wentylacji indywidualnej w pomieszczeniach biurowych, Chłodnictwo i Klimatyzacja 11 (125) 2008, Warszawa.

24. Chludzińska M., Bogdan A. (2010) Ocena przepływu powietrza z nawiewnika wentylacji indywidualnej za pomocą termowizji, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* – 2/2010.
25. Chludzińska M., Bogdan A., Mizieliński B. (2009) Technique for measuring personalized ventilation comfort using thermal manikin, The 11th International Conference „Air Distribution in Rooms – Roomvent 2009”, 24 – 27 maja 2009, Busan, Korea Południowa.
26. Cho S.H., Kim W.T., Zaheeruding M. (2001) Thermal characteristics of a personal environmental module task air conditioning system: an experimental study, *Energy Conversion and Management*, 42, pp. 1023-1031.
27. Chojnacka A. (2006) Warunki komfortu cieplnego świetle obowiązujących norm, *Chłodnictwo i Klimatyzacja* 11/2006, Warszawa.
28. Chojnacka A., Chludzińska M. (2007) Wentylacja indywidualna jako rozwiązanie komfortu w pomieszczeniach biurowych, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 9/(450)2007.
29. DIN 1946 – 6 (2006) Development of a ventilation concept, instructions and calculation methodology for architects and planners with consideration of the building airtightness.
30. Dufton A. F. (1929) The eupatheostat, *Journal of Scientific Instruments*, 6, 249-251.
31. Dufton A. F. (1936) The equivalent temperature of a warmed room, *JIHVE* (obecnie *Journal of CIBSE*), Wielka Brytania, cz. 4, 227-229.
32. Duguid J.F. (1945) The numbers and the sites of origin of the droplets expelled during expiratory activities, *Edinburg Med. J.* 52, pp. 335-40.
33. Dyrektywa 2002/91/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Europy dotycząca jakości energetycznej budynków, 16.12.2002.
34. Fang L., Clausen G., Fanger P.O. (1998) Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposure, *Indoor Air* 1998, 8: 276-284.
35. Fanger P.O. (1967) Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation, *ASHRAE Transactions* 73(2):III.4.1.
36. Fanger P.O. (1974) *Komfort cieplny*, tłumaczenie Kostyrko K., Kostyrko A., Arkady, Warszawa.
37. Fanger P.O. (2001) Human requirements in future air-conditioned environments, *Journal of Refrigeration* 24(2):148-53.

38. Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H., Ring J. (1988) Air turbulence and sensation of draught. *Energ and buildings*, 12, 21-39.
39. Faulkner D., Fisk W.J., Sullivan D.P. (1993) Indoor airflow and pollutant removal in a room with desktop ventilation, *ASHRAE Transactions*, 99, 750-758.
40. Faulkner D., Fisk W.J., Sullivan D.P., Lee S.M. (2002) Ventilation efficiencies of a desk-edge-mounted task ventilation system, *Proceedings of Indoor Air 2002*, 4, 1060-1065.
41. Faulkner D., Fisk W.J., Sullivan D.P., Woyng D.P. (1999) Ventilation efficiency of desk-mounted task/ambient conditioning systems, *Indoor Air*, 9, pp. 273-281.
42. Fountain M. i in. (1994) Locally controlled air movement preferred in warm isothermal environments, *ASHRAE Transactions*, 100, pp. 937-952.
43. Gao N., Niu J. (2005) Modeling the Performance of Personalized Ventilation under Different Conditions of Room Air and Personalized Air, *International Journal of Heating, Ventilation, Air-Conditioning and Refrigerating Reserch* vol. 11 nr 4.
44. Gao N., Niu J. (2005) Modeling the Performance of Personalized Ventilation under Different Conditions of Room Airflows, *Proceedings of of Building Simulation 2005, Ninth International IBPSA Conference, Montral, Kanada*.
45. Grivel F., Candas V. (1991) Ambient temperatures preferred by young European males anf females at rest, *Ergonomics*, 34, 365-378.
46. Gwóźdź B. (2004) Człowiek w środowisku wielkoprzemysłowym i elementy ergonomii. W: *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii stosowanej i klinicznej*. Red: Traczyk W, Trzebisk A., Warszawa, PZWL.
47. Hardy J.D., Wolf H.G., Goodell H. (1952) Pain sensation and reactions, *Williams and Wilkins, Baltimore*.
48. Hinds W.C. (1999) *Aerosol Technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles*, 2d ed. New York, John Wiley and Sons.
49. Holmér I., Nilsson H., Havenith G., Parsons K.C. (1999) Clothing convective heat exchange. Proposal for improved representation in standards and models, *Annals of Occupational Hygiene*, 43(5) 329-337.
50. Houghton F.C., Yagloglou C.P. (1923) Determining equal comfort lines, *Journal of ASHVE*, 29, 165-176.
51. Houghton F.C., Yagloglou C.P. (1924) Cooling effect on human beings produced by various air velocities, *Journal of ASHVE*, 30, 193.

52. Kaczmarczyk J., Melikov A. K., Sliva D. (2010) Effect of warm air supplied facially on occupants' Comfort, *Building and Environment* 45 (2010) 848-855.
53. Kaczmarczyk J., Melikov A., Bolashikov Z., Nikolaev L., Fanger P.O. (2004) Thermal sensation and comfort with five different air terminal devices for personalized ventilation, *Proceedings of Roomvent 2004, Coimra: DEM-FCT*.
54. Kaczmarczyk J., Melikov A., Bolashikov Z., Nikolaev L., Fanger P.O. (2006) Human response to Five Designs of personalized ventilation, *HVAC&R Research*, vol. 12, nr 2.
55. Kaczmarczyk J., Melikov A., Fanger P.O. (2004) Human response to personalized ventilation and mixing ventilation, *Indoor Air*, 14 (Suppl 8): 17-29.
56. Kaczmarczyk J., Zeng Q., Melikov A., Fanger P.O. (2002) Individual control and people's preferences in experiments with personalized ventilation system, *Proceedings of Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark*, 57-60.
57. Kaczmarczyk J., Zeng Q., Melikov A., Fanger P.O. (2002) The effect of personalized ventilation system on perceived air quality and SBS symptoms, *Proceedings Indoor Air 2002, Monterey, USA*, 4:1042-1047.
58. Karjalainen S., Koistinen O. (2007) Users problems with individual temperature controls in Office, *Building and Environment* 42, 2880 – 2887."
59. Kroner W.M., Stark-Martin J.A. (1994) Environmentally responsive workstations and office-worker productivity, *ASHRAE Transactions: Symposia*, vol. 102 part 2, 750-755.
60. Lampe G. i in. (1981) Projekt klimatyzacja a projekt budynku. Arkady, Warszawa.
61. Li Y., Leung G.M., Tang J.W., Yang X., Chao C., Lin J.Z., Lu J.W., Nielsen P.V., Niu J., Qian H., Sleigh A.C., Su H-J.J., Sundell J., Wong T.W., Yuen P.L. (2007) Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment -A multidisciplinary systematic review, *Indoor Air* 17 (1), pp. 2-18.
62. Madsen T., Olesen B., Kristensen N. (1984) Comparison between operative and wquivalent temperature under typical indoor conditions, *ASHRAE Transactions* 90 (1) 1077-1090.
63. Malicki M. (1980) *Wentylacja i Klimatyzacja*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, wydanie trzecie.
64. Materiały informacyjne portalu www.flir.com.pl.
65. Materiały informacyjne portalu www.grimas.hu.
66. McIntyre D.A. (1980) *Indoor Climate*, London, Applied Science.

67. Melikov A., Kaczmarczyk J. (2006) Measurement and prediction of indoor air quality using a breathing thermal manikin, *Indoor Air* 2007, 17: 50-59.
68. Melikov A., Kaczmarczyk J. (2007) Measurement and prediction of indoor air quality using a breathing thermal manikin, *Indoor Air*, 2007, vol. 17, no1, pp. 50-59.
69. Melikov A., Pitchurov G., Naydenov K., Langkilde G. (2005) Field study on occupant comfort and the office thermal environment in rooms with displacement ventilation, *Indoor Air* 15, nr 3, pp. 205-214 .
70. Melikov A.K. (2004) Personalized ventilation, *Indoor Air* 2004, 14:157 - 167.
71. Melikov A.K., Arakelian R.S., Halkjaer L., Fanger P.O. (1994) Spot cooling - part 2: Recommendations for design of spot cooling systems, *ASHRAE Transactions*, 100, 500-510.
72. Melikov A.K., Cermak R., Kovar O., Forejt L. (2003) Impact of airflow interaction on inhaled air quality and transport of contaminant in rooms with personalised and total volume ventilation, *Proceedings of Healthy Buildings 2003, Singapore*, 2, 592-597.
73. Melikov A.K., Cermak R., Majer M. (2002) Personalized ventilation: evaluation of diferent air terminal divices, *Energy and Buildings* 34, 829-836.
74. Melikov A.K., Knudsen G.L. (2007) Hunam rpsonce to an Individually Controlled Microenvironment, *HVAC&R Research*, vol. 13, nr 4.
75. Missenard A. (1948) A thermique des ambience: équivalences de passage, équivalence de séjours, *Chaleur et Industrie*, 276, 159-172 oraz 277, 189-198.
76. Missenard A. (1959) On thermally equivalent environments, *JIHVE*, 27, 231-237.
77. Muhič S., Mazej M., Butala V. (2008) Verification od dC(1) Parameter for Measuring the Effectiveness of a Personalized Ventilation System, *HVAC&R Research*, vol. 14, nr 4, pp. 535-544.
78. Naydenov K., Pitchurov G., Langkilde G., Melikov A. (2002) Performance of displacement ventilation in practice, *Preceedings of Roomvent 2002, Copenhagen*, Technical Univercity Denmark and DANVAK, 483-486.
79. Nielsen P.V., Hyldgaard C.E., Melikov A., Andersen H., Soennichsen M. (2006) Personal Exposure Between People in a a Room Ventilated by Textile Terminals - with and without Personalized Ventilation, *HVAC&R Reserch*, vol. 13 nr 4, pp. 635-643.

80. Nilsson H. (2004) Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models, Ph. Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden.
81. Nilsson H., Holmér I., Bohm M., Norén O. (1999) Definition and theoretical background of the equivalent temperature, Międzynarodowa Konferencja ATA, 17-19 Listopada, Florencja, W1999A4082.
82. Nilsson H.O., Holmér I. (2003) Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. International Journal of Indoor Air Quality and Climate (Copenhagen, Denmark), 13, pp28-37.
83. Niu J., Gao N., Phoebe M., Huigang Z. (2007) Experimental study on a chair-based personalized ventilation system, Building and Environment 42, 913-925.
84. Parsons K.C. (2003) Human thermal Environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance, second edition, Taylor and Francis, London and New York.
85. Pelech A. (2008) Wentylacja i klimatyzacja. Podstawy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, wydanie pierwsze.
86. Peter H. i inni (2006): Mitigating The Adverse Impact of Particulates on Indoor Air - Views and Conclusions from the FINE Particles – Technology, Environment and Health Technology Programme, Tekes.
87. PN-B-03421:1978 Wentylacja i klimatyzacja - Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi.
88. PN-B-03430:1983/Az3:2000 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej -- Wymagania.
89. PN-EN 15251:2007 Kryteria środowiska wewnętrznego, obejmujące warunki cieplne, jakość powietrza wewnętrznego, oświetlenie i hałas.
90. PN-EN ISO 7730:2006 Ergonomia środowiska termicznego - Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego.
91. PN-EN ISO 9920:2007 Ergonomia środowiska termicznego -- Określanie izolacyjności cieplnej i oporu dla pary wodnej zestawu odzieżowego.
92. PN-ISO 5221:1994 Rozprowadzanie i rozdział powietrza -- Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie.

93. Recknagel H., Sprenger E., Schramek E.R. (2008) Kompendium wiedzy - Ogrzewnictwo, Klimatyzacja, Ciepła woda, Chłodnictwo 2008/2009. Omni Scala, Wrocław.
94. Riethel H., Raiss W. (1961) *Traité de chauffage et de ventilation*, Paris.
95. Rohles F.H. Jr. (1973) The revised modal comfort envelope, *ASHRAE Transactions* 79(2):52.
96. Rohles F.H. Jr., Nevins R.G. (1971) The nature of thermal comfort for sedentary man, *ASHRAE Transactions* 77(1):239.
97. Schiavon S., Melikov A. (2008) Energy saving and improved comfort by increased air movement, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1954-1960.
98. Schiavon S., Melikov A.K. (2008) Energy saving and improved comfort by increased air movement, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1954-1960.
99. Schwab R., Conrad W., Mayer E. (1999) Correlation between objective and subjective measurements of thermal comfort. EQUIV Report nr 4, Holtzkirchen, Germany, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
100. Sekhar S.C., Gong N., Tham K.W., Cheong K.W., Melikov A.K., Wyon D.P., Fanger P.O. (2005) Findings of Personalized Ventilation Studies in a Hot and Humid Climate, *International Journal of Heating, Ventilation, Air-Conditioning and Refrigerating Reserch* vol. 11 nr 4.
101. Sudoł-Szopińska I., Sobolewski A., Chojnacka A. (2006) Ocena obciążenia termicznego pracowników za pomocą wskaźnika WBGT - aspekty praktyczne, *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*. 10 (421) październik 2006.
102. Sun W., Tham K. W., Zhou W., Gong N. (2007) Thermal performance of a personalized ventilation air terminal device at two different turbulence intensities. *Building and Environment* 42 (2007) 3974-3983.
103. Śliwowski L. (2000) *Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach*. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
104. Tanabe S., Arens E.A., Bauman F.S., Zhang H., Madsen T.L. (1994) Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature, *ASHRAE Transactions* 100, Pt., pp.39-48.
105. Tanabe S., Hayashi J. i in.(2004) The effect of isothermal task unit on thermal comfort, *Proceedings of Roomvent 2004*.

106. Toftum J., Zhou G., Melikov A. K. (2000) Effect of airflow direction on human perception of draught, CLIMA 2000, 30 sierpnia - 2 wrzesnia 2000r., Brussels, sesja 1.
107. Traczyk W.Z., Trzebski A. (2004) Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej i stosowanej. Warszawa, PZWL.
108. Tsuzuki K., Arens E., Bauman F., Wyon D. (1999) Individual Thermal Comfort Control with Desk-Mounted and Floor-Mounted Task/ Ambient Conditioning (TAC) System, Proceedings of Indoor Air 1999, Edinburgh.
109. Vernon H.M., Warner C.G. (1932) The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures, Journal Hygiene Cambridge, 32, 431-462.
110. Wargorcki P., Seppänen O. i inni (2002) Indoor climate and productivity in offices, REHVA guidebook.
111. Wyon D.P. (1996) Individual microclimate control: Required range, probable benefits and current feasibility, Proceedings of Indoor Air 1996, Nagoya, Japan 1:1067-72.
112. Wyon D.P. (1996) Indoor environmental effects on productivity, Proceedings of IAQ 1996: Paths to better building environments, W. Kroner, ed. Atlanta: ASHRAE, pp 5-15.
113. Wyon D.P., Tennstedt J.C., Lundgren I., Larsson S. (1985) A new method for the detailed assessment of human heat balance in vehicles, Volvo's thermal minikin Voltman, SEA, nr 850042.
114. Xia Y.Z., Niu J.L., Zhao R.Y., Burnett J. (2000) Effect of Turbulent Air on Human Thermal Sensations in a Warm Isothermal Environment, Indoor Air 2000, 10, pp. 289-296.
115. Yagloglou C.P., Miller W.E. (1925) Effective temperature with clothing, ASHVE Transactions, 31, 89.
116. Yang J., Melikov A., Fanger P.O., Li X., Yan Q. (2002) Impact of personalized ventilation on human response: comparison between constant and fluctuating airflows under warm condition, Proceedings of Roomvent 2002.
117. Zeng Q., Kaczmarczyk J., Melikov A i in. (2002) Perceived air quality and thermal sensation with a personalized ventilation system, Proceedings of Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark.

118. Zeng Q., Zhao R. (2005) Prediction of Perceived Air Quality for Personalized Ventilation Systems, *Tsinghua Science and Technology*, vol 10, nr 2 2005, pp227-232.
119. Zhang H. (2004) Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. PhD. Thesis, University of California 2004.

Oryginalne publikacje stanowiące podstawę do powyższej pracy

Artykuły w recenzowanych czasopiśmie

Chludzińska M., Bogdan A. (2010) Ocena przepływu powietrza z nawiewnika wentylacji indywidualnej za pomocą termowizji, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* – 2/2010

Bogdan A., Chludzińska M. (2009) Ocena działania wentylacji indywidualnej przy zastosowaniu manekina termicznego. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* – 4(469)/2009

Chludzińska M., Bogdan A. (2008) Zastosowanie wentylacji indywidualnej w pomieszczeniach biurowych *Chłodnictwo i Klimatyzacja* – 11 (125) 2008

Bogdan A., Chludzińska M. (2008) Wybrane aspekty dot. strumieni konwekcyjnych kształtujących się nad człowiekiem. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* – 12/2008

Bogdan A., Chludzińska M. (2008) Oddziaływanie człowieka na środowisko w pomieszczeniach, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 5(458) 2008

Chludzińska M., Bogdan A. (2008) Wentylacja indywidualna – kaprys użytkownika czy uzasadniona ekonomicznie oszczędność, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 2(455) 2008

Chojnacka A., Chludzińska M. (2007) Wentylacja indywidualna jako rozwiązanie komfortu w pomieszczeniach biurowych, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 9/(450)2007;

Referaty konferencyjne

Chludzińska M., Bogdan A., Mizieliński B. (2010) Comfort and thermal sensation with two-direction air terminal device for personalized ventilation, 10th REHVA World Congress CLIMA 2010, 09-12 maja 2010, Antalya, Turcja.

Bogdan A., Chludzińska M. (2009) Komfort cieplny użytkowników pomieszczeń biurowych przy zastosowaniu wentylacji indywidualnej, X Ogólnopolska Konferencja "Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce", 3 – 4 grudnia 2009, Warszawa

Chludzińska M., Bogdan A., Mizieliński B. (2009) Technique for measuring personalized ventilation comfort using thermal manikin, The 11th International Conference „Air Distribution in Rooms – Roomvent 2009”, 24 – 27 maja 2009, Busan, Korea Południowa.

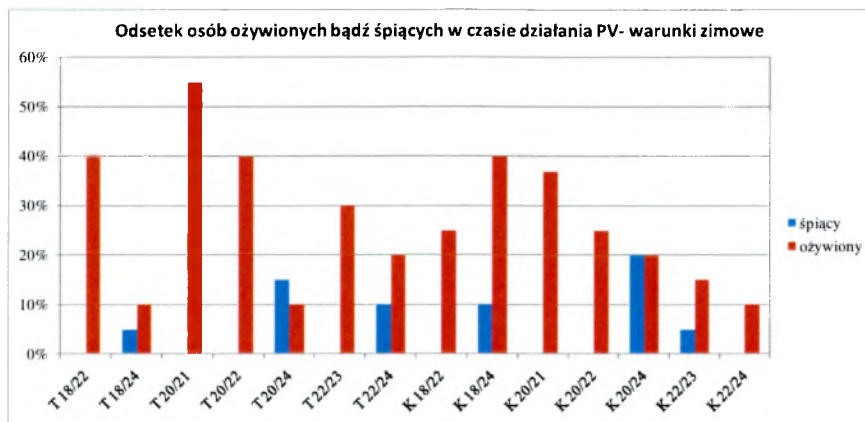
Bogdan A., Chludzińska M. (2009) Thermal comfort in office rooms using personalized ventilation, 9th International Conference & Exhibition Healthy Buildings 2009, 13-17 września 2009, Syracuse, USA.

Chludzińska M., Bogdan A., Mizieliński B. (2009) Application of the thermal manikin for ventilation and air-conditioning system assessment, III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska, 13 – 17 września 2009, Lublin.

Chludzińska M., Bogdan A. (2008) Utrzymanie komfortu użytkowników w środowisku pracy przy wykorzystaniu wentylacji indywidualnej, Air Conditioning, Protection and District heating 2008, 26 - 29 czerwca 2008, Szklarska Poręba

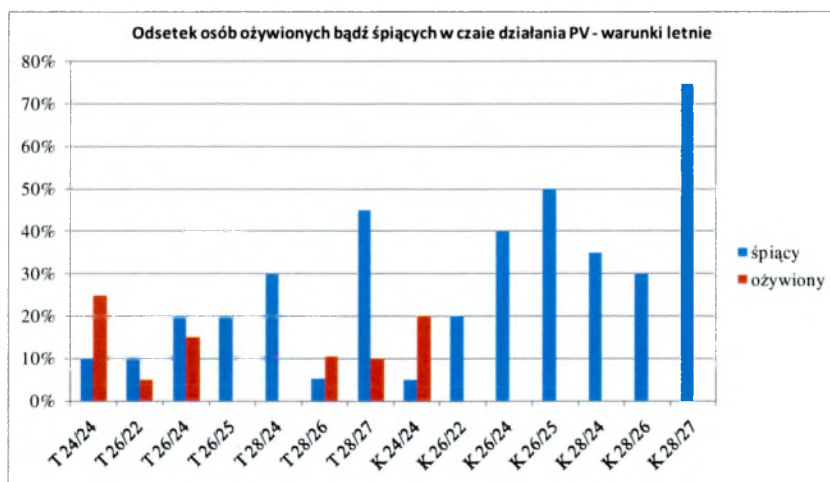
Bogdan A., Chludzińska M. (2008) Comparative evaluation of thermal plumes formed above a thermal manikin and humans – the pilot study results, Indoor air 2008, 17-22 sierpnia 2008, Kopenhaga

10. ZAŁĄCZNIKI



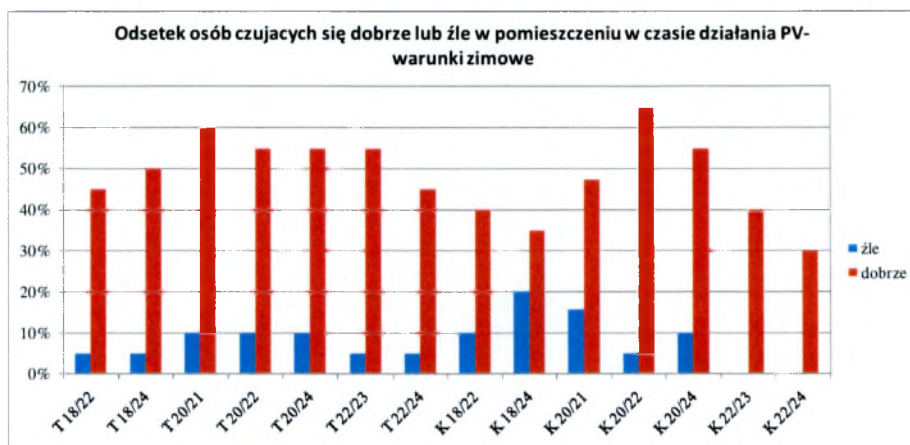
Rys.10.1. Odsetek osób odczuwających ożywienie bądź senność podczas działania PV w warunkach zimowych.

Fig.10.1. Percentage of subjects reporting liveliness or sleepiness using PV – winter conditions.



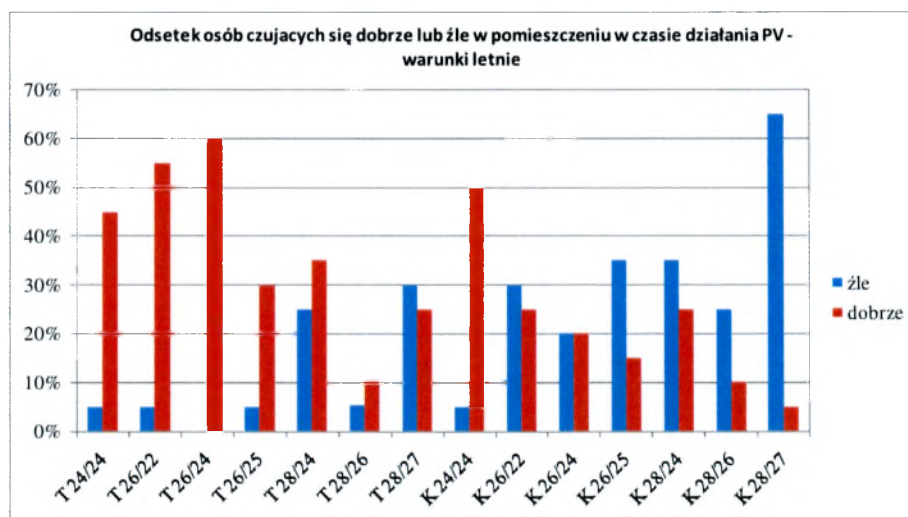
Rys.10.2. Odsetek osób odczuwających ożywienie bądź senność podczas działania PV w warunkach letnich.

Fig.10.2. Percentage of subjects reporting liveliness or sleepiness using PV – summer conditions.



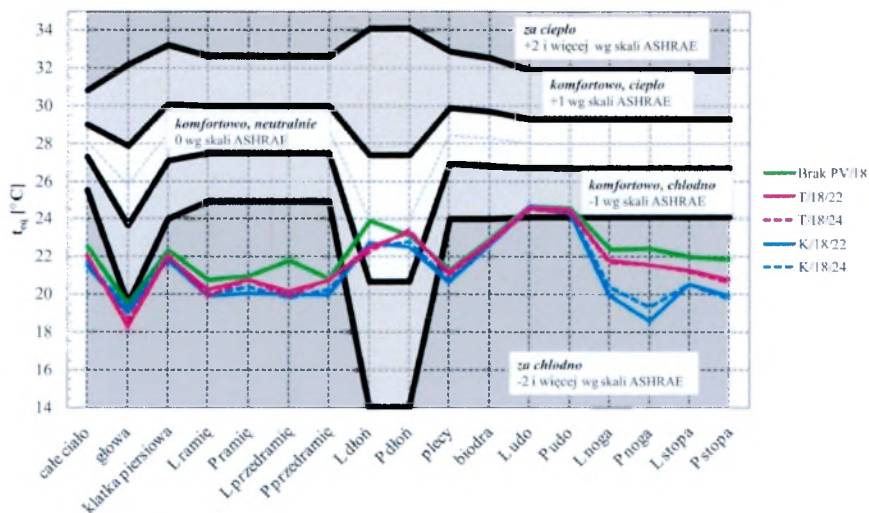
Rys.10.3. Odsetek osób czujących się źle lub dobrze podczas działania PV w warunkach zimowych.

Fig.10.3. Percentage of subjects reporting feeling bad and good using PV – winter conditions.



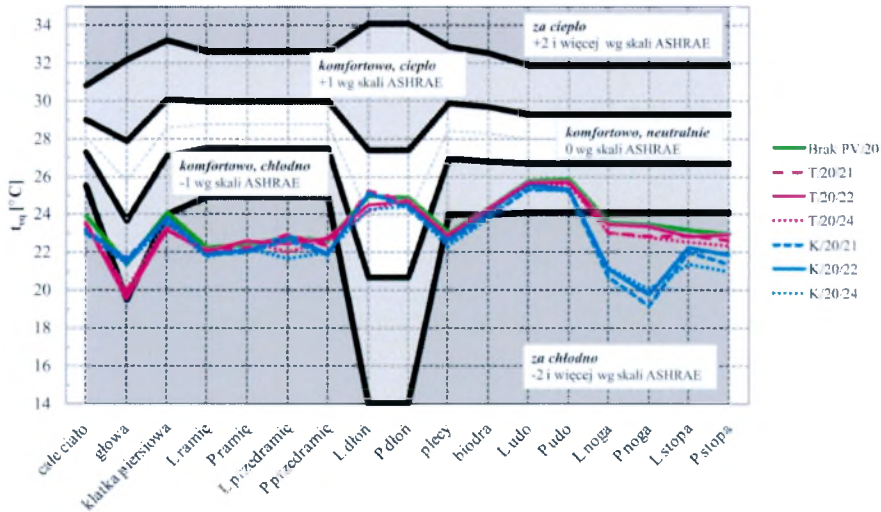
Rys.10.4. Odsetek osób czujących się źle lub dobrze podczas działania PV w warunkach letnich.

Fig.10.4. Percentage of subjects reporting feeling bad and good using PV – summer conditions.



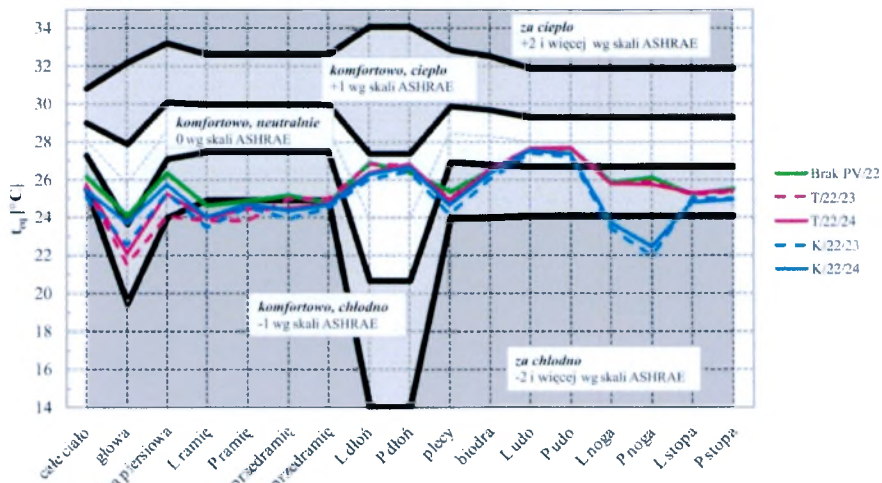
Rys.10.5. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 18°C (0,9 clo).

Fig.10.5. Comfort zones and t_{eq} value for nude manikin in ambient temperature 18°C (0,9 clo).



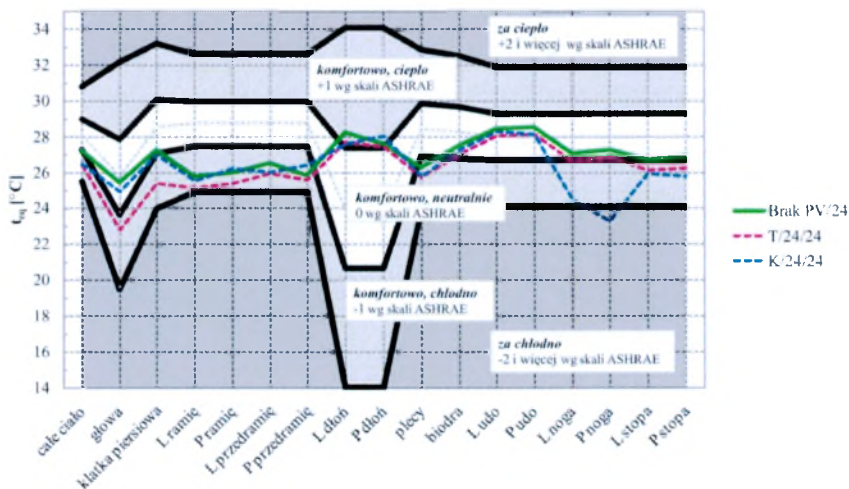
Rys.10.6. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 20°C (0,9 clo).

Fig.10.6. Comfort zones and t_{eq} value for nude manikin in ambient temperature 20°C (0,9 clo).



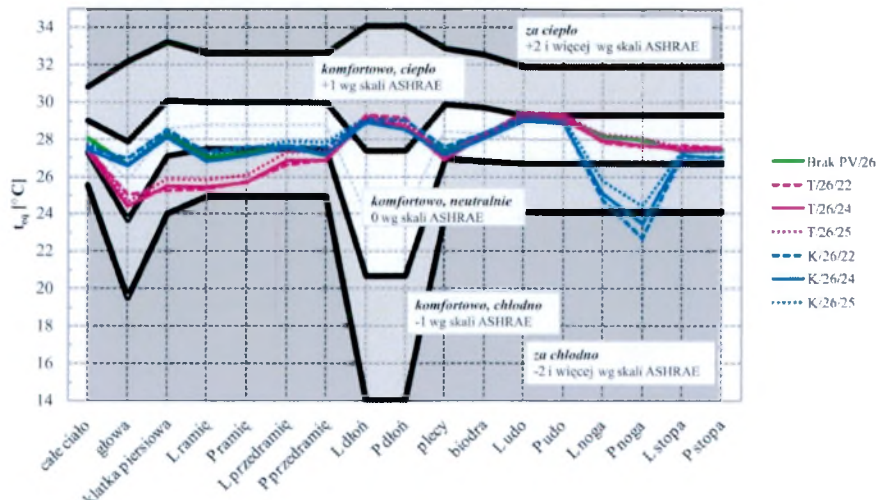
Rys.10.7. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 22°C (0,9 clo).

Fig.10.7. Comfort zones and t_{eq} value for nude manikin in ambient temperature 22°C (0,9 clo).



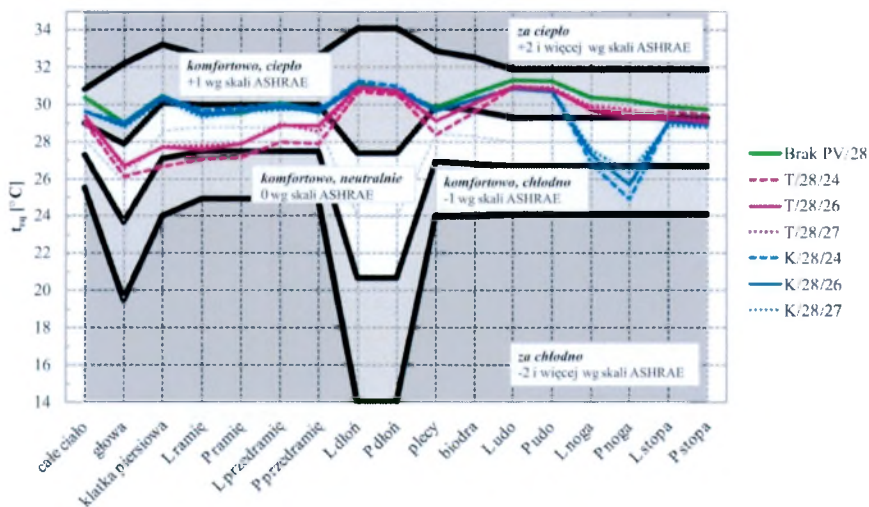
Rys.10.8. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 24°C (warunki letnie 0,9 clo).

Fig.10.8. Comfort zones and t_{eq} value for nude manikin in ambient temperature 24°C (0,9 clo).



Rys.10.9. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 26°C (warunki letnie 0,9 clo).

Fig.10.9. Comfort zones and t_{eq} value for nude manikin in ambient temperature 26°C (0,9 clo).



Rys.10.10. Strefy komfortu wraz z wartościami t_{eq} dla nagiego manekina i temperatury otoczenia równej 28°C (warunki letnie 0,9 clo).

Fig.10.10. Comfort zones and t_{eq} value for nude manikin in ambient temperature 28°C (0,9 clo).

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Warszawskiej

C. 140920



40000000176476