

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA, GEODEZJI I
ENERGETYKI ODNAWIALNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

ANALIZA KOMFORTU CIEPLNEGO W
BUDYNKACH
W WARUNKACH STOSOWANIA MASEK
OCHRONNYCH

LUIZA ANNA DĘBSKA

Praca napisana pod kierunkiem:

Dr hab. inż. Łukasza J. Ormana, prof. PŚk

Kielce, 2024

Spis treści

Wykaz oznaczeń i skrótów.....	5
Wprowadzenie	7
Rozdział I.....	9
Komfort cieplny	9
1.1 Podstawowe zagadnienia związane z komfortem cieplnym	9
1.2 Komfort cieplny w warunkach pandemicznych.....	14
Rozdział II.....	38
Modelowanie komfortu cieplnego	38
Rozdział III	48
Wnioski z przeglądu literatury.....	48
Rozdział IV	50
Cele i tezy pracy.....	50
Rozdział V	51
Badania eksperymentalne	51
5.1 Przedmiot i zakres badań.....	51
5.1.1 Budynek Energis – Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej.....	51
5.1.2 Budynki Wydziałów Budownictwa i Architektury A, Mechaniki i Budowy Maszyn B, Zarządzania i Modelowania Komputerowego C oraz Aula Główna.....	54
5.1.3 Komora klimatyczna.....	55
5.2 Metodyka badań	56
5.2.1 Procedura badawcza	58
5.2.2 Miernik mikroklimatu.....	61
5.2.3 Ankieta użytkowników pomieszczeń	62
5.3 Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza	67
5.3.1 Badania w budynkach edukacyjnych Politechniki Świętokrzyskiej	67
5.3.1.1 Parametry mikroklimatu w badanych pomieszczeniach.....	68

5.3.1.2 Wrażenia termiczne (TSV), akceptowalność (TAV) i preferencje (TPV) użytkowników.....	70
5.3.1.3 Ocena i preferencje dotyczące wilgotności względnej powietrza	79
5.3.1.4 Ocena jakości powietrza wewnętrznego	84
5.3.1.5 Ogólne odczucia osób w pomieszczeniach (GSV)	88
5.3.1.6 Wpływ CO ₂ na wrażenia termiczne	90
5.3.2 Badania w komorze klimatycznej.....	91
5.3.2.1 Wrażenia termiczne (TSV), akceptowalność (TAV) i preferencje (TPV) użytkowników.....	91
5.3.3 Porównanie wskaźników PMV i PPD wg modelu Fanger'a z danymi eksperymentalnymi.....	98
5.3.4 Modyfikacja wskaźników PMV oraz PPD	102
5.3.5 Weryfikacja zmodyfikowanego modelu	103
Rozdział VI	117
Podsumowanie i wnioski	117
Streszczenie.....	120
Summary	121
Literatura.....	122
Wykaz rysunków, tabel, zdjęć i załączników.....	140
Załączniki.....	146

Wykaz oznaczeń i skrótów

Wielkość	Jednostka miary	Nazwa wielkości	Nazwa wielkości w języku angielskim
TSV	–	Wrażenia termiczne	Thermal Sensation Vote
TAV	–	Akceptowalność termiczna	Thermal Acceptability Vote
TPV	–	Preferencje termiczne	Thermal Preferences Vote
AHV	–	Ocena wilgotności względnej	Humidity Assessment Vote
HPV	–	Preferencje wilgotności względnej	Humidity Preferences Vote
PMV	–	Przewidywana średnia ocena	Predicted Mean Vote
PPD	–	Przewidywany odsetek osób niezadowolonych	Predicted Percentage of Dissatisfied
APPD	–	Rzeczywisty odsetek osób niezadowolonych	Actual Predicted Percentage of Dissatisfied
GSV	–	Ogólne wrażenia dot. środowiska wewnętrznego	General Sensation Vote
AQAV	–	Ocena jakości powietrza	Air Quality Assessment Vote
APV	–	Ocena produktywności	Assessment Productivity Vote
LX	lx	Natężenie oświetlenia	Lighting Intensity
TP	°C	Temperatura powietrza	Air Temperature
RH	%	Wilgotność względna	Relative Humidity
TO	°C	Temperatura operatywna	Operative Temperature
BMI	kg/m ²	Wskaźnik masy ciała	Body Mass Index
M	W/m ²	Tempo metabolizmu	Metabolic Rate
W	W/m ²	Efektywna moc mechaniczna	Effective mechanical Power
I_{cl}	m ² K/W	Izolacyjność cieplna odzieży	Thermal Insulation of clothing
f_{cl}	m ² °C/W	Współczynnik powierzchni odzieży	Clothing area factor
h_{cg}	W/m ² K	Współczynnik konwekcji ciepła	Heat transfer coefficient
t_g	°C	Temperatura czarnej kuli	Black sphere temperature
v_{ar}	m/s	Prędkość powietrza	Air flow velocity
p_a	Pa	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej	Water vapour partial pressure
t_a	°C	Temperatura powietrza	Air temperature

t_{cl}	°C	Temperatura powierzchni odzieży	Clothing temperature
$\bar{t}_r$	°C	Średnia temperatura promieniowania	Mean radiant temperature
D	m	Średnica czarnej kuli	Black sphere diameter
Mdn	–	Mediana	Median
Q1	–	Pierwszy kwartył	First Quartile
Q2	–	Trzeci kwartył	Third Quartile
N	–	Rozkład normalny	Normal Distribution
F	–	Statystyka testu	Test Statistic
df1/ df2	–	Stopnie swobody	Degree of Freedom
p	–	Wartość testu statystycznego	Statistical Test Value
CI95%	–	Przedział ufności	Confidence Interval
LOA	–	Granica zgodności	Limits of Agreement
SEM	–	Błąd standardowy pomiaru	Standard Error of Measurement
AI	–	Sztuczna inteligencja	Artificial Intelligence
ANN	–	Sztuczna sieć neuronowa	Artificial Neural Networks
ML	–	Nauczanie maszynowe	Learning Machine
FL	–	Rozmyta logika	Fuzzy Logic
LoT		Internet rzeczy	Internet of Things

Wprowadzenie

Wirus SARS-CoV-2 pojawił się pod koniec 2019 roku w miejscowości Wuhan w Chinach, by już trzy miesiące później w dniu 11 marca 2020 roku, Światowa Organizacja Zdrowia ogłosiła pandemię. Szkoły i uczelnie zostały zamknięte, a z czasem rozpoczęły prace w trybie zdalnym. W różnych przedsiębiorstwach czy korporacjach, jeżeli była taka możliwość, pracownicy korzystali z pracy zdalnej. Galerie handlowe, kina, kawiarnie zawieszały swoją działalność, ponieważ miejsca te były obarczone zbyt wysokim ryzykiem zainfekowania COVID – 19. Ponadto, najbardziej rozpowszechnioną metodą unikania, bądź minimalizowania rozprzestrzeniania się wirusa było stosowanie masek jednorazowych lub wielokrotnego użytku, rękawiczek oraz używania środków dezynfekujących. Mimo to na ulicach najczęściej spotykano ludzi w масечkach chirurgicznych lub bawełnianych. Wiele z tych osób pomimo świadomości konieczności ich noszenia, skarżyło się na zwiększony dyskomfort twarzy poprzez uczucie zbytniego gorąca, dużej wilgotności czy pojawiania się duszności. W związku z tym w okresie pandemicznym wątpliwe było, czy takie maski mogą zapewnić komfort cieplny u ludzi je noszących, który jest istotny do dobrego samopoczucia. Pojawia się zatem pytanie: w jakim stopniu maski zabezpieczające przeciw roznoszeniu wirusa COVID – 19, wpływają na komfort cieplny użytkowników pomieszczeń, a dodatkowo czy możliwe jest modelowanie komfortu cieplnego ludzi w w/w warunkach pandemicznych przy zastosowaniu modeli/korelacji opracowanych do tej pory (dla ludzi nie noszących masek).

Całość pracy składa się z sześciu głównych rozdziałów. W rozdziale I omówiono historię badań nad komfortem cieplnym oraz czynniki które mają wpływ na wrażenia termiczne takie jak temperatura powietrza, wilgotność względna itp. Ponadto, przeprowadzono dogłębną analizę dostępnej literatury związanej z tematyką masek i wpływu ich noszenia na komfort cieplny u ludzi. W rozdziale II skupiono się na modelowym przedstawieniu komfortu cieplnego omawiając wskaźnik PMV oraz PPD jak i alternatywne modele komfortu cieplnego. W rozdziale III, podsumowano aktualny stan wiedzy i badań na podstawie przeglądu literatury przedmiotu, a w rozdziale IV zaprezentowano główne cele i tezy pracy, bazując na wnioskach z rozdziału III. W rozdziale V opisano w pierwszej kolejności budynki, w których prowadzono badania oraz komorę klimatyczną. Następnie omówiono metodykę badawczą, czyli procedurę wykonywania badań w salach i w komorze klimatycznej oraz przedstawiono wybrany miernik mikroklimatu oraz pytania zawarte w anonimowym kwestionariuszu ankiety. Dodatkowo,

omówiono czynnik ludzki, czyli osoby biorące udział w badaniu, ich wiek, wagę oraz sumaryczną liczbę badanych osób. Istotą tego rozdziału, było przeprowadzenie dogłębnej i tym samym kompleksowej analizy komfortu cieplnego ludzi w budynkach Politechniki Świętokrzyskiej oraz w komorze klimatycznej. Kolejny etap miał na celu porównanie wskaźników, związanych z komfortem cieplnym tj. TSV z PMV oraz APPD z PPD, a następnie stworzenie zmodyfikowanej wersji modelu Fanger'a o czynnik, uwzględniający fakt noszenia masek. Zwieńczeniem rozdziału V, była weryfikacja modyfikacji modelu w oparciu o przyjęte metody statystyczne. W rozdziale VI podsumowano otrzymaną analizę komfortu cieplnego w maskach oraz przedstawiono końcowe wnioski z przeprowadzonej modyfikacji modelu. Pracę zakończono streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem literatury, rysunków, tabel, zdjęć oraz załączników.

Rozdział I

Komfort cieplny

1.1 Podstawowe zagadnienia związane z komfortem cieplnym

Historia badań komfortu cieplnego sięga według [1] XVIII wieku, a dokładniej 1774 roku, kiedy to brytyjski lekarz zapoczątkował prace nad tym zagadnieniem. Pod koniec XIX wieku stworzono teorię przenikania ciepła [1, 2], a następnie w wieku XX – od roku 1905 – zostały wykazane parametry/wskaźniki, które powstały w procesie rozwoju komfortu cieplnego i jednymi z nich są: temperatura mokrego termometru¹ [1, 3], temperatura efektywna² [1, 4, 5], temperatura ekwiwalentna³ [1, 6], temperatura operatywna⁴ [1, 7], cieplny stres⁵ [1, 8], dyskomfort⁶ [1, 9] czy utworzenie przewidywanego średniego głosu⁷ [1, 10], aż po przewidywaną temperaturę wnętrza ciała⁸ [1, 11] czy stworzenie środowiskowego wskaźnika stresu⁹ [1, 12]. Cały proces dotyczący analiz komfortu cieplnego trwał około 10 dekad – w głównej mierze okres ten przypadął na wiek XX. Podczas tych 100 lat, fizjologiczny system regulacji temperatury przez ciało ludzkie był na tyle interesujący, że wielu badaczy tamtych czasów, podejmowało różne eksperymenty jak np. sprawdzanie wytrzymałości człowieka na wysokie temperatury, czy roli mózgu w tej regulacji oraz podejmowanie prób badawczych odnoszących się do procesów wymiany ciepła przez ludzkie ciało. W 1914 roku został stworzony termometr łączący średnią temperaturę promieniowania, temperaturę powietrza oraz prędkość powietrza. Podczas gdy inni badacze opisywali wskaźniki wpływające na komfort cieplny, Fanger stworzył wskaźnik PMV. Jednak od samego początku, temu modelowi zarzucało się niedokładność. Jak stwierdzili [1, 13–15], model PMV wyznaczał węższy komfort cieplny w budynkach naturalnie wentylowanych niż było to w rzeczywistości. Jak podaje [1] w przeszłości badania opierały się na dwóch metodach wyznaczania komfortu cieplnego – na podstawie badań w terenie oraz badań w komorze klimatycznej. Badania w terenie dotyczyły rzeczywistych odczuć cieplnych ludzi – były prowadzone

¹ Wet bulb temperature (ang.)

² Effective temperature (ang.)

³ Equivalent temperature (ang.)

⁴ Operative temperature (ang.)

⁵ Heat stress index (ang.)

⁶ Discomfort index (ang.)

⁷ Predicted Mean Vote – PMV (ang.)

⁸ Predicted body core temperature (ang.)

⁹ Environmental stress index (ang.)

w środowisku pracy, bez możliwości kontrolowania środowiska, czy możliwości dostosowania wrażeń cieplnych przez ludzi do panujących warunków w pomieszczeniu (np. poprzez zdjęcie marynarki lub kurtki itp.). Co więcej, szczególną uwagę zwracano na rolę budynku w ocenie wrażeń termicznych [1, 13]. W komorze klimatycznej natomiast była możliwość dostosowania odgórnie parametrów środowiskowych oraz izolacyjności ubioru w zależności od zadanych parametrów lub ustalenia tej wartości jako stałej [1]. Na podstawie tych 100 lat historii rozwoju komfortu cieplnego z większym lub mniejszym sukcesem powstawały normy, które przedstawiają warunki środowiska komfortowego w budynkach jak ASHRAE¹⁰ czy ISO 7730¹¹, które bazują na modelu Fangera. Obecnie badania komfortu niewiele się różnią od tych, które były prowadzone w przeszłości, ponieważ dalej wykorzystuje się komory klimatyczne oraz ankiety odczuć cieplnych ludzi w różnych instytucjach publicznych, w prywatnych domach, muzeach czy w szpitalach.

Czynniki wpływające na komfort cieplny to między innymi temperatura powietrza, wilgotność względna, cząstkowe ciśnienie pary wodnej, średnia temperatura promieniowania, prędkość przepływu powietrza, ubiór oraz tempo metabolizmu [10]. Można to również podzielić na parametry osobiste [16–19], które definiują izolacyjność ubioru jako opór cieplny izolacji, który dana osoba nosi, opisywana w jednostce clo, gdzie $1 \text{ clo} = 155 \text{ m}^2\text{K/W}$ oraz tempo metabolizmu, określająca wewnętrzną produkcję ciepła, która może być ciepłem wydzielanym przez dany organizm w danym okresie lub poprzez przemianę energii chemicznej w ciepłą i mechaniczną uwalnianą poprzez wykonywanie aktywności tlenowej lub beztlenowej wewnątrz organizmu – podawana w jednostce met jako $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [16]. Czas jaki ludzki organizm potrzebuje do uzyskania stabilizacji temperaturowej wynosi około 20 minut, w zależności od warunków otoczenia [20, 21]. Dodatkowo, autorzy [21, 22] podają, że według podziału na płeć, to mężczyźni mają wyższe tempo metabolizmu niż kobiety o 20 – 30%. Podczas podstawowej przemiany materii, w całkowitej energii ciała zużycie energii wynosi około 40 – 70% i jest to zależne od wieku, płci i masy ciała [21]. Druga grupa parametrów dotyczy środowiska otaczającego dane osoby, czyli: temperatura powietrza, prędkość powietrza i wilgotność względna [16, 18, 19] oraz średnia temperatura promieniowania [18, 19]. Temperatura powietrza jest to temperatura wewnętrzna w pomieszczeniu, które otacza ciało. Zakres temperatur zaleca się w zakresie od 19°C do 28°C, aby zapewnić optymalizację komfortu cieplnego w zależności

¹⁰ ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ang.)

¹¹ ISO – International Standard Organization (ang.)

od zastosowanego ubioru dostosowanego do warunków panujących na zewnątrz (dotyczy sezonowości) [16, 23, 24] oraz jak podają autorzy [21, 24, 25], optymalnymi warunkami temperatury powietrza w pomieszczeniu powinien być zakres od 18 do 23°C, natomiast zalecany według [21], zakres temperatury powietrza powinien wynosić od 21 do 26°C – czyli mieszczący się w zakresie podanym przez [16, 23, 24]. Prędkość powietrza jest to prędkość jego przepływu wyrażona w m/s, gdzie wartość powyżej 0,20 m/s informuje o możliwości wystąpienia dyskomfortu [16]. Wilgotność względna jest stosunkiem ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu do jego wartości maksymalnej (w danych warunkach). Wielu badaczy sugeruje różne zakresy optymalnej wilgotności względnej, a najlepszy według nich mieści się zwykle w granicach od 30 – 60%, zaś wyższy od 70% wskazuje na środowisko niekomfortowe [16, 26, 27]. Natomiast według Ganesh i współautorów [21], osoby mogą się czuć niekomfortowo, jeżeli wilgotność spadnie poniżej 20% lub wzrośnie powyżej 70% (tą wyższą wartość też potwierdzają inne opracowania [16, 26, 27]). Średnia temperatura promieniowania jest związana z wymianą takiej samej ilości promieniowania cieplnego człowieka i jego otoczenia [16, 24], czyli średnia temperatura promieniowania jest wyrażana jako średnia ważona temperatur różnych powierzchni [16]. Znając średnią temperaturę promieniowania oraz temperaturę otoczenia, można wyznaczyć temperaturę operatywną [28, 29]. Temperatura operatywna jest to taka temperatura, w której człowiek poprzez promieniowanie oraz konwekcję wymienia taką samą ilość ciepła w porównywalnym z niejednorodnym środowiskiem [21, 30]. Należy również zaznaczyć, że inne czynniki mogące wpłynąć na komfort cieplny tj. wiek oraz płeć, budowa ciała, odżywianie, stan zdrowia, tkanka tłuszczowa [10, 16]. Podział na płeć może odgrywać rolę w odczuciach cieplnych ponieważ, wykazano, że środowiskiem komfortowym dla mężczyzn są niższe temperatury, niż dla kobiet, nawet jeżeli obie płcie będą miały takie samo tętno [21, 22].

Obecnie, wiele organizacji korzysta i opiera się na wzorach Fanger, tworząc normy takie jak ISO 7730, ASHRAE 55, informujących o komforcie lub dyskomforcie ludzi w danych pomieszczeniach lub budynkach w oparciu o parametry mikroklimatu wewnętrznego oraz ISO 7726 wykorzystywanym w metodologii pomiarów środowiska termicznego, umożliwiające wykonanie jednych z wielu obliczeń związanych z konwekcją naturalną i wymuszoną oraz średnią temperaturą promieniowania. Fanger, jak już wspomniano, około pół wieku temu stworzył wskaźnik PMV, czyli Przewidywaną Średnią Głosów, opierający się na wyżej omówionych czynnikach, które są podstawą do obliczenia

tego wskaźnika. Zakres środowiska komfortowego to wartość PMV, która wynosi od -0,5 do +0,5 [10, 31] dla budynku kategorii II (użyteczności publicznej). Jeżeli zakres ten zostanie przekroczony można mówić o odczuwaniu dyskomfortu u ludzi. Jednak wskaźnik PMV nie jest jedyną metodą umożliwiającą sprawdzenie czy środowisko jest komfortowe bądź nie. W warunkach rzeczywistych mowa o Thermal Sensation Vote – TSV¹², który uzyskuje się poprzez zliczenie średniej z odpowiedzi ankietowych, wszystkich badanych osób, biorący pod uwagę wrażenia termiczne ludzi, którzy oceniają je według klasyfikacji od wartości +3 – zbyt gorąco, +2 – za ciepło, +1 – przyjemnie ciepło, 0 – komfortowo/ neutralnie, -1 – przyjemnie chłodno, -2 – za chłodno, -3 – zbyt zimno [10, 31]. TSV stanowi najbardziej prawdziwą (rzeczywistą) ocenę faktycznie odczuwanych parametrów mikroklimatu przez daną grupę badawczą. Jak opisano wyżej przy wskaźniku PMV, również dla TSV występuje możliwość przekroczenia zakresu -0,5 do +0,5 wskazując na dyskomfort cieplny. Oprócz wartości PMV, Fanger zaproponował wskaźnik PPD¹³, czyli Przewidywany Odsetek Osób Niezadowolonych [10, 31]. PPD sugeruje, że dla zakresu środowiska komfortowego, czyli od zakresu -0,5 do + 0,5, niezadowolenie ludzi nie może przekroczyć wartości 10%, która została wyznaczona dla budynku kategorii II [10, 31]. Jeżeli przekroczy się zakres komfortu to analogicznie odsetek osób niezadowolonych wzrośnie przekraczając wartość 10%. Podobnie jak w przypadku PMV – TSV, dla PPD też można obliczyć procent osób rzeczywiście odczuwających dyskomfort, biorąc pod uwagę ocenę termiczną z ankiet dla wartości +3 (za gorąco), +2 (gorąco) oraz -2 (zimno), -3 (za zimno).

W normie ISO 7726 [24] głównie przedstawiono metodologię pomiarów oraz sposób obliczeń dla temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, promieniowania płaszczyzny, bezwzględnej wilgotności powietrza, prędkości powietrza, temperatury powierzchni i temperatury operacyjnej. Natomiast ASHRAE ideologicznie zakłada, że komfort cieplny jest procesem poznawczym i bazuje na czynnikach fizycznych, fizjologicznych i psychologicznych etc. [18, 28] oraz jako stan umysłu, który wyrazić może satysfakcję z panujących warunków [28, 32].

Należy również wspomnieć, że spora część badań komfortu cieplnego dotyczy miejsc użyteczności publicznej, jak w badaniach Romero i innych [33], którzy porównali odczucia cieplne studentów uczących się w Hiszpanii na Uniwersytecie Badajoz oraz na Politechnice

¹² TSV - Thermal Sensation Vote (ang.)

¹³ PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied (ang.)

w Beja, w Portugalii. Wrażenia termiczne ludzi uczących się w Hiszpanii wykazały środowisko komfortowe, natomiast u portugalskich studentów środowisko ciepłe i za ciepłe. Wielu autorów prac mierzy się również z próbą modyfikacji modelu Fangera, ponieważ prace badawcze często wykazują, że PMV przeszacowuje lub niedoszacowuje wrażenia termiczne i odbiega od realnych odczuć ludzi. Przykładem może być badanie w opracowaniu własnym [34], gdzie w trzech na cztery badane pomieszczenia PMV wyniosło powyżej -1,4 – podczas gdy te pomieszczenia według oceny studentów zapewniły środowisko komfortowe. Jednak w innym artykule własnym dotyczącym komfortu cieplnego [35], sytuacja była odwrotna niż w badaniach [34], ponieważ średnie TSV okazało się bardzo wysokie, natomiast PMV bardzo niskie. Podobne zjawisko obserwowano w pracy [36, 37] oraz w opracowaniach własnych [38, 39], gdzie w obu tych przypadkach PMV było za wysokie, a TSV za niskie oraz PMV niskie, a TSV wysokie. Podobne tendencje zostały zaobserwowane przez Guevara i inni [40], którzy porównali wrażenia cieplne ludzi uczących się w trzech miastach Ekwadoru. Autorzy wskazali, iż model PMV nie przewidywał poprawnie temperatury studentów w klimatyzowanych klasach oraz, jak autorzy podali w głównych wnioskach, PMV również zaniżyło satysfakcję studentów ze środowiska wewnętrznego, która okazała się być wyższa według ich oceny. Do podobnych wniosków doszli autorzy pracy [41], w którym PMV odbiegał od rzeczywistych wrażeń termicznych ludzi w niższych temperaturach. Torriani i in. [42] porównali wrażenia termiczne uczniów i studentów, uczących się w szkole podstawowej, gimnazjalnej, średniej oraz na uniwersytecie w mieście Piza w latach 2018 – 2021 w okresie od listopada do marca. Według danych z analizy autorów wartości PMV i TSV znacząco różniły się od siebie. Badacze zauważyli, że świadomość termiczna wzrasta wraz z wiekiem jak i na wczesnych etapach nauki (szkoła podstawowa), różnica wynosiła 1,02, natomiast już na uniwersytecie 0,72. Do zbliżonych wniosków doszli Rodriguez i in. [43] z Kolumbii, którzy również zaobserwowali w swoich badaniach wzrost świadomości termicznej wraz z wiekiem oraz, że model niekoniecznie nadaje się do odzwierciedlania wrażeń termicznych ludzi. Modyfikację modelu zaprezentowano w pracach własnych poprzez uwzględnienie stężenia dwutlenku węgla [38], wartości wskaźnika BMI [39] oraz zawartości dwutlenku węgla wraz z BMI [44], co finalnie zmniejszyło różnice między PMV a TSV dla rozpatrywanej bazy eksperymentalnej.

Istota wpływu komfortu cieplnego na możliwość pojawienia się niepożądanych dolegliwości jak np. ból głowy, mdłości czy suchość w gardle w wyniku dłuższego

przebywania w pomieszczeniu jest związana z syndromem chorego budynku - SBS¹⁴. Przykładem takich objawów mogą być, opisane przez [45, 46], gdzie wykazano pojawienie się bólu głowy, zmęczenia, kataru czy bólu gardła. Natomiast autorzy [47] opisali pojawienie się uczucia zmęczenia (jak w przypadku [45, 46]) oraz zwiększonego uczucia suchości w gardle i w oczach. Farrag i in. [48] w swoich badaniach nad SBS, opisali pojawienie się zmęczenia oraz bólu głowy u studentów na Arab Academy for Science Technology & Maritime Transport. Natomiast w pracy własnej [49] badania, które zostały wykonane w budynku Politechniki Świętokrzyskiej w auli głównej wykazały, że studenci odczuwają najczęściej ból oczu, podrażnienie błony śluzowej, zawroty głowy oraz w niewielkim stopniu mdłości. Jak można zauważyć, nieodpowiednie warunki w pomieszczeniu mogą pogorszyć samopoczucie osób i tym samym zmniejszyć produktywność i koncentrację. Dlatego tak ważne jest, aby budynki nowoczesne jak najlepiej mogły kontrolować wewnętrzne warunki w pomieszczeniach, natomiast w budownictwie tradycyjnym należy umożliwić jak najlepszą wentylację i dostosowanie odpowiedniego oświetlenia do potrzeb osób pracujących czy uczących się.

1.2 Komfort cieplny w warunkach pandemicznych

W 2020 roku 11 marca na świecie ogłoszono pandemię COVID-19, przez Światową Organizację Zdrowia¹⁵ w związku z drastycznym wzrostem zachorowań oraz śmiertelnością ludzi w wyniku zakażeń [50]. Za przyczynę tak szybkiego rozprzestrzeniania się wirusa odpowiadał kontakt osoby chorej/zarażonej z osobą zdrową poprzez kasłanie, kichanie, mówienie i wydychanie powietrza, którym zarówno oddychała osoba zdrowa jak i chora [51–53]. Główne dolegliwości, jakie charakteryzowały SARS-CoV-2 to gorączka, zmęczenie, duszności czy katar [54]. Światowa Organizacja Zdrowia oraz władze państw apelowały o skuteczną dezynfekcję dłoni czy ubrań, ale również o przyjmowanie szczepień przeciwko wirusowi oraz noszenie masek [55–57] w miejscach publicznych, aby minimalizować rozprzestrzenianie się COVID – 19 [57]. W związku z tym, ludzie podczas pandemii, głównie wybierali maski jako podstawowy środek ochrony indywidualnej przed zarażeniem się wirusem SARS-CoV-2 [58]. Dodatkowo, częściej wybierali maski chirurgiczne jednorazowe lub maski materiałowe, niż profesjonalne maski typu N95/ FFP2, czy maski ochronne na całą twarz [58].

¹⁴ SBS – Sick Building System (ang.)

¹⁵ WHO – World Health Organization (ang.)

W historii masek, pierwsze odniesienia dotyczyły lekarzy, którzy nosili dzioby, usytuowane na twarzy, będące symbolem śmierci podczas zaraz występujących w średniowieczu. Dodatkowo, lekarz oprócz wspomnianego dzioba, był zobowiązany do noszenia czarnego płaszcza i kapelusza. Wzmianki o maskach ochronnych zostały przedstawione w roku 1897 przez polskiego chirurga, który nazywał je zabandażowanymi ustami¹⁶ [59, 60], co miało chronić lekarza, ale również i pacjenta przed zakażeniem rany lub w trakcie przeprowadzania operacji [59, 61]. Dodatkowo należy wspomnieć, że wzrost „popularności” maski przypadł na okres I wojny światowej, w szczególności w czasie wybuchu epidemii Hiszpanki. W tamtym okresie XX wieku, lekarze mówili, że maski są drażniące [59, 60], podczas gdy w obecnych czasach jest już standardem ich noszenie jako podstawowej części uniformu lekarzy podczas operacji lub przy innych zabiegach medycznych.

Biorąc pod uwagę okres wybuchu pandemii COVID – 19 i zamknięciu wielu placówek na świecie (okres nazywany lockdown’em) sprawiono, że wielu badaczy swoje badania zaczęło realizować głównie w komorach klimatycznych na manekinach, a w późniejszym czasie z udziałem ludzi. W większości literatury z okresu pandemicznego w procedurze badawczej pojawiały się maski różnego typu, które były badane na manekinach i z udziałem ludzi w miejscach pracy/ nauki czy obiektach służby zdrowia.

Zender – Świercz i in. [62], przeprowadzili badania w komorze klimatycznej zlokalizowanej na Politechnice Świętokrzyskiej przy użyciu manekina. Manekin termiczny miał wzrost 175 cm przy wadze 22 kg oraz posiadał sterowniki komputerowe i respirator. Temperaturę jaką utrzymywano podczas badań to 32°C, przy temperaturze powietrza wynoszącej 20°C oraz 30°C. Do pomiarów wykorzystano sześć różnorodnych masek o izolacyjności termicznej wynoszącej: dla maski FFP2: 0,134 clo, bawełnianej: 0,098 clo, medycznej: 0,111 clo, PM2,5: 0,119 clo, pół ochronnej maski z tworzywa sztucznego: 0,072 clo oraz o pełnej ochronie twarzy przyłbicą z tworzywa sztucznego: 0,063 clo. Maski podczas eksperymentu były suche lub zwilżone. Zanim jednak autorzy wykonali eksperyment z maskami, w pierwszej kolejności wykonano badanie kontrolne bez maski. Każdy pomiar powtórzono trzykrotnie. Autorzy wywnioskowali, że suche maski w niższej temperaturze są lepsze niż zwilżone maski, natomiast analogicznie do tego, w temperaturze wyższej lepsze są maski zwilżone niż

¹⁶ Mouth bandage (ang.)

suche. Natomiast dla 30°C niezależnie od rodzaju maski odnotowano większy dyskomfort niż przy 20°C. We wnioskach autorzy wykazali, że nie ma znaczącej różnicy w odczuwaniu komfortu cieplnego przy stosowaniu maski typu FFP2, bawełnianej, medycznej i PM2,5. Dla niższych temperatur maski: pół i pełnej ochrony, bez i ze zwilżeniem wykazywały większy komfort niż dla wyższej temperatury. Kolejny przykład badań, w których wykorzystano manekina to praca Zhang i in. [63]. W badaniach i w jego opracowaniu, zaprezentowano nowatorską maskę, która została zmodyfikowana poprzez nałożenie na maskę typu N95 wycięty okrąg z maski chirurgicznej. Dodatkowo wprowadzono specjalną rurkę, której zadaniem było pobierać informacje o jakości powietrza wewnętrznego między maską, a ustami. Zmodyfikowana maska została porównana do maski N95 z rurką oraz do maski chirurgicznej z rurką. Okazało się, że zmodyfikowana maska miała lepszą szczelność oraz stopień ochrony, niż maska chirurgiczna. Natomiast w porównaniu do maski N95, ulepszona wersja maski zapewniła obniżenie stężenia dwutlenku węgla i pary wodnej, a zwiększyła zawartość tlenu. W ogólnej ocenie autorów pomysł zaproponowanej ulepszonej maski, mogłaby przyczynić się do zwiększenia komfortu twarzy.

W kolejnym etapie pandemii, gdy społeczeństwa mogły wracać do normalnego trybu nauczania i pracy, badania przybrały nowy charakter i skupiano się na faktycznych odczuciach cieplnych ludzi, którzy nosili konkretne maski zalecone przez naukowców podczas ich badań. Nadmienić jednak trzeba, że najczęściej badania były prowadzone w komorach klimatycznych, ze względu na obostrzenie, które zakładało że w salach, czy w innych pomieszczeniach nie może przebywać za dużo ludzi oraz powinni utrzymywać dystans 2 metrów od siebie. Pierwszą propozycją badań w komorze klimatycznej przy zastosowaniu masek oraz czynnika ludzkiego jest praca Huo i Zhang [64]. Do analizy wybrali maski typ N95, medyczną oraz bawełnianą dołączywszy do nich rurki, podobnie jak w przypadku badań [63]. Na pierwszym etapie badań przebadano jedną osobę w przezroczystej komorze klimatycznej w warunkach wentylowanych o przepływie 15l/s, temperaturze od 23 do 27°C i wilgotności względnej od 30 – 50%. W czasie eksperymentu do maski doprowadzano przefiltrowane powietrze. Na drugim etapie 20 zdrowych studentów (10 kobiet i 10 mężczyzn), poproszono o założenie prototypowych masek oraz wejście do komory na co najmniej 2 minuty. W kolejnym kroku ich zadaniem było uzupełnić anonimowy kwestionariusz ankiety dotyczący wystąpienia dyskomfortu podczas noszenia jednej z trzech zaproponowanych masek. Oceniano między innymi trudności

z oddychaniem, odczucie gorąca i wilgoci, wagę maski oraz ocenę ruchu powietrza wewnątrz maski. W głównych wnioskach, autorzy zaznaczyli, że niewentylowana maska jest źródłem gromadzenia się CO₂ i pary wodnej, sprawiając uczucie dyskomfortu poprzez problemy z oddychaniem. Wykazano, że maski wentylowane zmniejszają stężenie CO₂ i uczucia wilgotności między maską a twarzą, przy zwiększaniu przefiltrowanego powietrza. Wskazano, że maska typu N95 jest jedną z lepszych masek do modyfikacji z zastosowaniem rurki, niż w przypadku maski chirurgicznej czy bawełnianej. Jest to spowodowane tym, że te dwie ostatnie są wykonane z miękkiego materiału i mają skłonności do stykania się z twarzą, powodując dyskomfort zgłaszany przez osoby je noszące.

Na Uniwersytecie w Shanghai'u, Zhang i inni [65] zaprosili 30 osób – 15 kobiet i 15 mężczyzn do wzięcia udziału w badaniach w komorze klimatycznej. Osoby te miały nosić strój o izolacyjności cieplnej równej 0,50 clo. Należy dodać, że zalecono kobietom związanie włosów, aby nie zaburzyć wyników. Studenci wchodzili pojedynczo do komory klimatycznej o temperaturze powietrza od 22°C do 28°C (temperatura zwiększana o 1°C) przy stałej wilgotności względnej 50%. Nadmienić trzeba, że uczestnicy badania mieli podczas eksperymentu nosić maski chirurgiczne oraz dodatkowo umożliwić wykonywanie pomiarów temperatury takich części ciała jak czoło, nos, klatka piersiowa, kark, noga i ręka. Zauważono, że przy zmianach temperatury, zaczawszy od 22°C, 24°C, 26°C i skończywszy na 28°C, dla trzech części ciała był widoczny wzrost temperatury skóry (dotyczy nosa, nogi oraz ręki). Dla czoła, szyi i klatki piersiowej nie zauważono znacznych zmian. Temperatura neutralna to 24°C i 25°C, natomiast 26°C, 27°C i 28°C to środowisko już za ciepłe, a środowisko za chłodne to 22°C i 23°C. We wnioskach autorzy podkreślili, że dyskomfort w oddychaniu będzie wzrastał wraz ze wzrostem temperatury.

Zhong i współautorzy [66] przeprowadzili analizę 4 rodzajów masek i ich wpływu na osoby będące w spoczynku, spacerujące oraz biegające (te dwie ostatnie czynności wykonywano na bieżni). Całość badania realizowano w komorze klimatycznej 5,0x3,5x3,4 metra o temperaturze powietrza 22°C, wilgotności względnej 50% i przepływie powietrza 1 m/s. Do eksperymentu zaproszono pięciu uczestników w wieku od 20 – 30 lat. Wykorzystano w tym celu, wybrane cztery rodzaje masek: maska medies, maska laboratoryjna, N95 i maska chirurgiczna. Grubość masek wynosiła odpowiednio: 1,05; 1,07; 4,00; 0,99 mm. Pierwsze dwie maski były nowością na rynku medycznym i zostały stworzone podczas pandemii COVID – 19. We wnioskach autorzy wskazali, że

noszenie masek przyczyniło się do zwiększenia temperatury skóry twarzy, zwiększenia stężenia dwutlenku węgla oraz wilgotności w maseczce, a bieganie szczególnie doprowadzało do pojawiania się gorączki. Dodatkowo temperatura twarzy pod wpływem aktywności fizycznej wzrosła o 0,5°C w porównaniu do pozycji siedzącej. W tym badaniu również zauważono różnice fizjologiczne, ponieważ w pozycji siedzącej, metabolizm niewiele zmieniał swoją wartość, natomiast podczas spacerowania metabolizm ulegał zmianie, aż do biegania, gdzie metabolizm dynamicznie wzrastał.

W badaniach autorów Lin & Chen [67], analizowano wpływ temperatury (o wartości 25°C, 29°C oraz 33°C), wilgotności względnej (55% oraz 75%) na odczucia ludzi w komorze klimatycznej. Badane osoby miały nosić maskę z respiratorem w trakcie, gdy zmieniano parametry mikroklimatu oraz podczas wykonywanych ćwiczeń. Miasto, w którym prowadzono powyższe badania to Taichung na Tajwanie, gdzie średnie wartości temperatury powietrza z ostatnich 5 lat wynosiły od 23,9 do 25,2°C przy wilgotności względnej od 67,5 do 72,1%, zaś dla sezonu ciepłego średnie wyniosły odpowiednio od 27,8 do 29,5°C, przy wilgotności od 67,8 do 71,7%. Głównym zadaniem osób biorących udział w badaniu było chodzenie po schodach przez 30 minut z prędkością 4,6 km/h. Ponadto, w czasie wykonywania tej aktywności wykonywano pomiary temperatury skóry oraz analizowano subiektywne odczucia ciepłne twarzy. Łącznie badaniem objęto 25 osób, w tym 13 mężczyzn oraz 12 kobiet o średnim wieku 21,8 oraz 22,3 lat oraz o oporze cieplnym ubioru wynoszącym 0,4 clo. Komora klimatyczna, w której realizowano eksperyment miała wymiary 4,1x3,6x2,6 m - umożliwiała ustalenie odgórnie temperatury powietrza w zakresie od 19 – 35°C oraz wilgotności względnej 50 – 80%. Poziom prędkości powietrza utrzymywano poniżej 0,1 m/s. Pierwsza maska, która została wykorzystana do celów badawczych to typ N95 w kształcie półkuli, natomiast druga zawierała zawór wydechowy i lepiej przylegała do twarzy. Badania wykazały, że maska typu N95 pogarsza odczucia ciepłne na twarzy w porównaniu do maski z zaworem. Zauważono, że przy wzroście temperatury, TSV wzrastało dla obu badanych masek. Jednak należy zaznaczyć, że TSV maski typu N95 plasowała się wyżej (tj. w kierunku wartości dodatnich) niż TSV maski z zaworem. Takie wyniki skłaniają do refleksji, jaką dużą różnicę może sprawić wymiana powietrza podczas noszenia masek

We Włoszech na Uniwersytecie Chieti – Pescara do badania zaproszono 20 mężczyzn o średniej wieku 50 lat, pracujących na oddziale chirurgii jamy ustnej, aby przebadać zmiany temperatury skóry twarzy oraz odczucia dyskomfortu podczas noszenia masek jako

środka ochrony indywidualnej [68]. Odczucie dyskomfortu oceniano według skali od 0 – 100, gdzie 0 to brak dyskomfortu, zaś 100 to najwyższy poziom odczuwania dyskomfortu. Zdjęcia termograficzne twarzy wykonano przy pomocy kamery FLIR SC660 QWIP. Pracownicy w pierwszym eksperymencie założyli maskę chirurgiczną na całą godzinę zegarową, natomiast podczas drugiego eksperymentu nosili maskę N95. Podczas tej godziny mieli za zadanie czytać książki głównie w ciszy oraz mogli porozmawiać przez najwyżej 10 minut. Zauważono, że podczas noszenia maski N95 przepływ powietrza w masce nie był równomierny, podczas gdy dla maski chirurgicznej przepływ powietrza oceniono jako jednorodny. Dodatkowo autorzy wykonali zdjęcia twarzy przed założeniem masek i po jej zdjęciu. Po dokonanej analizie, wywnioskowano na podstawie zdjęć termograficznych oraz preferencji pracowników, że maska typu N95 prowadzi do znacznego wzrostu temperatury skóry twarzy, wynoszącego $36,9^{\circ}\text{C} \pm 4,2^{\circ}\text{C}$, w przeciwieństwie do masek chirurgicznych, gdzie temperatura twarzy wyniosła $35,9^{\circ}\text{C} \pm 3,4^{\circ}\text{C}$.

Interesujące wyniki badań wrażeń termicznych przedstawili Liu i inni [69], ponieważ w swoim badaniu zaproponowali badanie kontrolne bez maski, następnie w masce chirurgicznej, w trzecim etapie w masce i w przyłbicy, a w czwartym i finalnym badaniu w maseczce, przyłbicy oraz w pełnym stroju ochronnym. Łącznie w badaniu udział wzięło 10 osób, w tym 7 mężczyzn i 3 kobiety w wieku 20 – 25 lat, noszący ubiór letni. Sam eksperyment realizowano w komorze klimatycznej o wymiarach 4,8x2,1x3,3 m. Wilgotność względna utrzymywana była w granicach 45 – 55%, a prędkość powietrza ustalono poniżej wartości 0,2 m/s. Ponadto, badanym osobom założono czujniki w celu rejestracji parametrów życiowych podczas prowadzonych badań. Badanie trwało 45 minut, a zakres temperatur powietrza wynosił 22°C , 24°C , 26°C , 28°C , 30°C , 32°C , 34°C i 36°C . Po każdym zakończanym eksperymencie, temperatura powietrza była zwiększana o 2°C . Przez 15 minut 10 osób siedziało w pomieszczeniu o neutralnym środowisku w temperaturze 26°C . TSV badanych osób rosło wraz ze wzrostem temperatury powietrza. W zakresie temperatur od 22°C do 28°C wyniki badań bez maski i z maską i z przyłbicą niewiele się różniły od siebie w zakresie odczuć cieplnych w porównaniu do całego stroju ochronnego, gdzie TSV było na wysokim poziomie. Jednak zaskakujące okazało się to, że w temperaturze powietrza od $22 - 24^{\circ}\text{C}$, TSV ludzi noszących cały strój ochronny, był poniżej średnich wartości TSV przy nie stosowaniu masek, przy zastosowaniu masek oraz przy zastosowaniu przyłbicy. Co więcej, wyniki TSV dla

temperatury 26°C dla czterech przeprowadzonych prób okazały się od siebie wiele nie różnić. Należy dodać, że wyniki TSV dla masek w temperaturze 28°C ulokowały się wyżej niż wyniki TSV dla osób nie noszących masek, zaś w porównaniu do maski z przyłbicą, wrażenia termiczne osób noszących tylko maski ulokowały się poniżej względem TSV dla masek z założoną dodatkowo przyłbicą. Niemniej, na podstawie powyżej opisywanego badania, noszenie pełnego stroju ochronnego, sprawia, że TSV ludzi, oceniane było jako środowisko bardzo gorące. Tym samym zauważono, że podczas pomiarów życiowych badanych osób, puls niewiele się od siebie różnił dla badania kontrolnego bez maski, badania z maską i następnie z przyłbicą, podczas gdy dla pełnego stroju ochronnego puls wzrósł. Można więc skłonić się do refleksji, iż im więcej stroju ochronnego dana osoba posiada na sobie, tym puls będzie wyraźniej wzrastać.

Po przeanalizowaniu wrażeń cieplnych ludzi w komorze klimatycznej w samych maskach ochronnych, skupiono też uwagę na całym stroju ochrony indywidualnej¹⁷ (ŚOI). W szczególności dotyczy to części ciała, które obciążone zostało największym dyskomfortem w trakcie noszenia maski i całego ubioru medycznego. Przykładem podjętej tematyki badawczej była praca Hu i in. [70], realizowana na Politechnice Qingdao w Chinach, którzy przeprowadzili analizę komfortu cieplnego pracowników służby zdrowia, których podstawowym ubraniem w pandemii COVID-19 był strój ochrony indywidualnej. Na potrzebę eksperymentu zbudowano pomieszczenie, w którym badana osoba ubrana w strój ochronny pełny miała na sobie dodatkowo kamizelkę chłodzącą oraz przypięte czujniki do różnych części ciała. Ankieta, która została wykorzystana w tym badaniu zawierała 7-stopniową skalę określającą wrażenia termiczne. W ankiecie zawarto pytanie odnoszące się do oceny intensywności pocenia się, zapisane według 4 stopniowej skali. Udział w badaniu wzięło 10 mężczyzn i 14 kobiet o BMI między 17,4 a 27 kg/m². Zadano dwie temperatury: jedną neutralną 26°C oraz 32°C z włączoną klimatyzacją. Eksperyment założył cztery warianty uczestnictwa. Dla tych dwóch temperatur noszenie kamizelki chłodzącej oraz ŚOI lub tylko ŚOI. Okazało się, że w badaniu, gdzie osoby nie miały możliwości noszenia kamizelki chłodzącej, miejscem największego dyskomfortu została wskazana twarz oraz głowa ze względu na użytkowanie maseczek, gdzie procent osób odczuwających ten dyskomfort wynosił 75%. Badania wskazują, że 62% osób pracujących w ŚOI deklaruje odczucia dyskomfortu [71, 72]. Kolejnym przykładem są badania Jiang i wsp. [73] z Uniwersytetu Tsinghua, którzy w komorze klimatycznej

¹⁷ PPE – Personal Protective Equipment (ang.)

przebadali 12 studentów – 6 kobiet i 6 mężczyzn (18 – 27 lat) noszących strój ochrony indywidualnej (ŚOI), zawierający medyczne ochronne ubranie, medyczny scrub, przyłbicę, maskę chirurgiczną, rękawiczki i buty. Komora klimatyczna posiadała dwa oddzielne pomieszczenia, różniące się tylko szerokością o 0,5 metra. Wybrano dwie temperatury: 26°C oraz 30°C przy wilgotności względnej 50% dla obu temperatur. Całość badania trwała 40 minut, gdzie 20 minut była to pozycja siedząca, a drugie 20 minut to pozycja stojąca lub chodząca (wymagana prędkość 4 km/h). W tym badaniu Autorom najbardziej zależało, aby określić jaki wpływ będzie miał cały kompleksowy ubiór ochrony indywidualnej na pracę personelu medycznego w różnych warunkach z jakimi się na co dzień mierzą. Dodatkowo, podczas eksperymentu mierzono studentom parametry życiowe. Zauważono na podstawie wyników, że średnia temperatura podczas siedzenia szybko rośnie i stabilizuje się, zaś podczas stania najpierw się zmniejsza, podczas chodzenia wzrasta. TSV badanych osób było wyższe w 30°C niż w 26°C. Z upływem czasu, osoby te odczuwały duży dyskomfort oraz zmniejszającą się tolerancję na środowisko. Autorzy zalecili, aby osoby noszące ŚOI miały dłuższy okres odpoczynku, po wykonywaniu intensywnej pracy oraz zaproponowali, aby czas w nim przebywania nie przekraczał 100 minut. Aktywność i wzrost temperatury wpływały na średnie wartości wrażeń termicznych wyrażając je oceną powyżej +2, czyli charakteryzując środowisko za ciepłe i prawie zbliżające się do środowiska zbyt gorącego. Okazało się, że czoło, lewa część klatki piersiowej oraz jej lewy tył, odczuwał większy dyskomfort niż prawa część ciała. Studenci zgłaszali również, że ten powstający dyskomfort powodowany był przez maski i zbyt wilgotne środowisko między twarzą a maską. Tętno też istotnie się zmieniało w zależności od aktywności, ponieważ w pozycji siedzącej w temperaturze 26°C i 30°C, tętno nie różniło się znacząco od siebie i wynosiło około 82 – 90 uderzeń na minutę. Natomiast podczas poruszania się – chodzenia – tętno w temperaturze 26°C było nieregularne w zakresie od 97 do około 120 uderzeń na minutę, natomiast w temperaturze 30°C puls również nie był regularny, a zakres wynosił od 98 do około 135 uderzeń na minutę.

W mieście Guangzhou, Mao i in. [74] przeprowadzili badania nad odczuwaniem środowiska termicznego w stroju ochronnym u studentów. W badaniu udział brali głównie młodzi ludzie w liczbie 32 osób (20 kobiet i 12 mężczyzn), którzy zostali podzieleni na osiem grup po cztery osoby. Ich zadaniem było uzupełnienie ankiety związanej z komfortem cieplnym podczas noszenia indywidualnego stroju ochronnego pełnego. Procedura badawcza wyglądała następująco – w pierwszej fazie studenci przez 20 minut

nie mieli na sobie stroju ochronnego. Następnie w drugiej fazie przez 220 minut nosili kombinezon ochronny, a w ostatniej fazie, trzeciej, nie mieli na sobie kombinezonu – czas około 30 minut. Łącznie na ten cykl przeznaczono 270 minut. Zauważono, że największy dyskomfort odczuwany był na twarzy dla około 89,3% oraz na głowie dla 71,6%. Plecy, kończyny i tułów znajdowały się poniżej 33% niezadowolenia. Dodatkowo, stwierdzono pojawienie się takich dolegliwości jak zaparowanie twarzy w około 92,4% przypadkach, obfite pocenie zaobserwowało u siebie 78,9% osób, zaś na trzecim miejscu pojawiała się duszność u 66,4% badanych. Ponadto, pojawiły się takie dolegliwości jak: uciski w klatce piersiowej, zawroty i osłabienie, problemy z widzeniem, przyspieszone bicie serca, ogólne osłabienie oraz swędzenie skóry w przedziale od 10,4 do 37,3%. Najmniej powszechne okazały się nudności, które wystąpiły zaledwie u 5,8% osób. Ocena wrażeń termicznych dla twarzy oraz głowy wskazała, że w czasie noszenia stroju ochronnego, odczucia ukierunkowane były w kierunku środowiska gorącego i zbyt gorącego, natomiast po jego zdjęciu, po upływie 30 minut, studenci odczuwali ulgę, ponieważ wysoko oceniali poziom swojego komfortu termicznego. W przypadku tułowia, pleców oraz kończyn wyniki, które uzyskano były do siebie podobne i wahały się w wartościach od 31,2% do 39,1% dla środowiska gorącego oraz dla bardzo gorącego od 6,8% do 11,2%. Z drugiej strony, strefa komfortu cieplnego po zdjęciu kombinezonu, czyli wyboru wartości „0”, wynosiła między 60 a 68,1%.

W Polsce realizowano badania w komorze klimatycznej, należącej do Politechniki Świętokrzyskiej, a wyniki zostały przedstawione w opracowaniu własnym [75], w którym porównano wrażenia termiczne ludzi z komory klimatycznej i ludzi z auli wykładowej, poprzez zestawienie ze sobą odpowiedzi badanych zawartych w kwestionariuszu ankiety. Pomiary parametrów środowiska wewnętrznego wykonano przy użyciu urządzenia Testo 400. W obu pomieszczeniach temperatura powietrza wynosiła 25°C przy wilgotności względnej 56%. Głównym celem artykułu było przeanalizowanie różnic pomiędzy TSV a PMV w sali i komorze klimatycznej, sprawdzając w którym miejscu mogą wystąpić lepsze warunki mikroklimatu. Analizę oparto o średnie odpowiedzi TSV oraz o wyliczoną wartość PMV na podstawie normy ISO 7730. Okazało się, że wartość normowa PMV dla sali i komory klimatycznej wynosiła odpowiednio +0,08 oraz +0,15, mieszcząc się w zakresie komfortu cieplnego od -0,5 do +0,5. W między czasie wykazano sporą różnicę w odpowiedziach ankietowych, ponieważ w sali TSV wyniosło +0,43, zaś dla komory wartość TSV to aż +2. Dowiodło to, że model Fanger'a nie jest zbyt

dokładny w ocenie komfortu cieplnego. W kolejnej pracy własnej [76] porównano wrażenia termiczne w sali i w komorze klimatycznej. Do tego celu ponownie wykorzystano miernik Testo 400 oraz anonimowy kwestionariusz ankiety. Przebadano 4 osoby w sali i 4 osoby w komorze klimatycznej. Temperatura powietrza, wilgotność względna, prędkość powietrza i zawartość dwutlenku węgla dla sali wyniosła odpowiednio: 21,7°C, 30,80%, 0,06 m/s, 875 ppm, zaś dla komory klimatycznej – 21,9°C, 40,50%, 0,07 m/s, 718 ppm. Pomimo tego, że parametry mikroklimatu były do siebie zbliżone, to wrażenia termiczne w ocenianej sali wyniosły 75% oddanych głosów dla środowiska za chłodnego, zaś dla badań w komorze klimatycznej strefa komfortu dla 75% osób ulokowała się w odpowiedziach: przyjemnie chłodno, komfortowo i przyjemnie ciepło. PMV w obu badanych przypadkach oraz średnie TSV obliczone dla sali, przekroczyły dopuszczalne wartości komfortu cieplnego wg normy ISO 7730, podobnie jak niezadowolenie ludzi z panujących warunków, wyznaczane przez wskaźnik PPD, który przekroczył 10%.

Badania w komorze klimatycznej przy ustalonych temperaturach: 16°C, 22°C, 28°C i 34°C prowadzili Ji, Cao i Zhu [77] w Chinach, w Pekinie. W doświadczeniu udział wzięło 18 osób płci męskiej ze średnią wieku 22 lata. Osoby te dwukrotnie brały udział w tym eksperymencie, będąc podzielonymi na dwie grupy. Autorzy pracy skupili się na pomiarach fizjologicznych takich jak: temperatura skóry, przepływie krwi, ilości odparowanej wilgoci i tempie metabolizmu. Oszacowany czas przebywania w komorze klimatycznej respondentów wynosił 20 minut dla każdej osoby. Autorzy wykazali, na podstawie analizy otrzymanych wyników, iż metabolizm ludzi nie zmieniał się podczas prowadzonych badań. Natomiast podczas pomiaru temperatury skóry dla zadanych temperatur: 16°C i 28°C były na prawie takim samym poziomie, podczas gdy rozbieżne były dla temperatur: 16°C i 34°C w obu grupach. Biorąc pod uwagę przepływ krwi to największe różnice zauważono w temperaturze: 22°C i 28°C, zaś zdolność zwiększonego pocenia przypadła na temperaturę 34°C. Autorzy, odnosząc się do TSV, wykazali, że podczas wzrostu temperatury, również TSV wzrastało. W artykule Kong i in. [78] zadano w komorze klimatycznej dwie temperatury: 25°C oraz 28°C przy wilgotności w zakresie od 20 – 90% oraz z 90 – 20%, zwiększaną bądź zmniejszaną o 10%, przy prędkości nieprzekraczającej 0,1 m/s. Wskazano, że osoby które mieszkają na terenach o niskiej wilgotności, mają wyższe wrażenia termiczne niż osoby, które mieszkają na terenach o wysokiej wilgotności, ponieważ ich adaptacja do wyższej temperatury jest silniejsza przy dużej wilgotności.

Podobnie jak [66], Chen, Tao i Liu [79] również badali komfort cieplny podczas biegania na bieżni, ale przy 4 zadanych temperaturach – 26°C, 30°C, 33°C, 37°C, w komorze klimatycznej o wymiarach 4,0x3,3x2,8 m. Miejszem badań było Central South University w Chinach. Dopływ świeżego powietrza dostarczano z natężeniem 1000 m³/h. Temperatura 26°C dla tego regionu jest minimalną zalecaną temperaturą, w związku z tym badanie zaczęło się od tej właśnie temperatury. Ustalona wilgotność względna wynosiła 70%. Do eksperymentu wybrano 32 studentów: 16 kobiet i 16 mężczyzn, którzy mieli nosić letnie ubrania o izolacyjności cieplnej 0,39 clo. Wrażenia termiczne zostały przedstawione według 9 – stopniowej skali, komfort cieplny według 6 – stopniowej skali, ocenę skupienia według 9 – stopniowej skali oraz pojawienie się niepożądanych symptomów w skali od 0 – 100 jak np. ból głowy, zmęczenie, zawroty głowy itp. Studenci wskazywali na pojawiający się dyskomfort termiczny, obniżone skupienie, zmęczenie oraz uczucie silnego bólu i zawrotów głowy. Co więcej studenci zaznaczali, że występowały u nich trudności z koncentracją i jasnością umysłu.

Wrażenia termiczne ludzi zostały przeanalizowane w [80] w komorze klimatycznej o wymiarach 4,0x3,0x2,7 m oraz w pomieszczeniu klimatyzowanym przylegającym o wymiarach 4,0x3,0x2,9 m. Zadano trzy temperatury 28°C, 30°C oraz 32°C przy wilgotności względnej wynoszącej 60%. Natomiast w drugim pomieszczeniu panowała neutralna temperatura powietrza 25°C. Badane osoby zostały poproszone o noszenie jednolitego stroju o oporze cieplnym wynoszącym 0,5 clo. W pierwszej kolejności badana osoba udawała się do komory klimatycznej, w której panowała wyższa temperatura, a później do komory, w której panowała niższa temperatura i analogicznie udawali się z komory klimatycznej o neutralnej temperaturze do komory o wyższej temperaturze. Zauważono, że wrażenia termiczne dla różnych części ciała wzrastały, gdy badana osoba z temperatury 32°C przeszła do pomieszczenia o temperaturze 25°C. Różnica w ocenie TSV była bardzo wysoka dla wszystkich części ciała od +1,5 do około +3,0. Natomiast, z temperatury 28°C przechodząc do komory o 25°C, TSV wynosiło od około +0,25 do około +1,0. Interesujące wyniki otrzymano, gdy z temperatury neutralnej przechodzono do temperatury wyższej i okazało się, że TSV dla różnych części ciała wynosiło od około +0,20 do około +1,1. Najwyższe parametry uzyskano między temperaturą 25°C – 32°C (różnica wynosząca 7°C), podczas gdy dla temperatury 25°C – 30°C oraz 25°C – 28°C ten zakres TSV wynosił od około +0,20 do +0,75, ze względu na mniejsze różnice w temperaturach.

Yang i in. [81] przeprowadzili eksperyment, w którym badania prowadzone były laboratoryjnie (w komorze klimatycznej) w miejscowości, która charakteryzuje się dużą wilgotnością i gorącym klimatem w porze letniej. Średnie temperatury dla czerwca, lipca i sierpnia wyniosły 25,2°C, 28°C, 27,6°C, natomiast średnia wilgotność względna wynosiła odpowiednio 81,2%, 77,1% oraz 75,7%. Autorzy przekazali respondentom anonimowe kwestionariusze ankiety zawierające pytania o ich wrażenia termiczne według 7-stopniowej skali. Badania trwały od roku 2008 do 2010, tworząc cztery serie eksperymentalne w komorze klimatycznej o zbliżonych parametrach środowiskowych, jakich doświadczają mieszkańcy regionu Chongqing. W tym celu zrekrutowano 20 osób na każdą serię w wieku od 20 do 30 lat. Dodatkowo, w międzyczasie wykonywano pomiary takich partii ciała jak czoło, klatka piersiowa, plecy, ramiona, dłonie, łydki czy uda. Badane osoby znajdowały się w spoczynku, bez niepożądanego gestykulacji. Ze wszystkich przeprowadzonych badań otrzymano sumarycznie 440 ankiet. Temperatura otoczenia w komorze klimatycznej wynosiła od 25,9°C do 32,0°C, natomiast wilgotność względna wynosiła od 41% do 90%. Głównym celem artykułu było ocenienie zgodności pomiędzy PMV z normy a oceną rzeczywistego odczuwanego komfortu cieplnego przez ludzi. Analiza wyników wykazała, że PMV zawyża rzeczywiste średnie odczuwanie termiczne przez badane osoby. Zwrócono również uwagę, że średnie oceny wrażeń cieplnych ludzi nie układają się w liniowy sposób (tak jak było to w przypadku PMV), za wyjątkiem przeprowadzonego eksperymentu pierwszego. W analizie autorzy zwrócili również uwagę że nie ma silnego związku pomiędzy rzeczywistą średnią głosów a średnią temperaturą skóry.

Eksperyment w dwukomorowej komorze klimatycznej o wielkości 5,0x3,0x2,7 m – z możliwością ustalenia temperatury oraz wilgotności względnej zaprezentowali [82]. Wilgotność względną utrzymywano w obu pomieszczeniach w zakresie 45 – 55%. Eksperyment przeprowadzono w Pekinie, w Chinach. Badania wykonano w trzech wariantach. W pierwszym badaniu rozpoczęto i zakończono temperaturą 20°C, w międzyczasie zmieniano ją na 22°C, 25°C oraz 30°C. W drugim badaniu rozpoczęto i zakończono w temperaturze 25°C oraz wybrano wyższą temperaturę 30°C i niższą 20°C. W trzecim etapie rozpoczęto i zakończono temperaturą 30°C, przy czym wybrano w międzyczasie temperatury: 20°C, 25°C i 28°C. Do badań zrekrutowano 8 zdrowych osób, które nie wykonywały ćwiczeń fizycznych przed testami. Wszyscy uczestnicy nosili ubranie o jednakowym oporze cieplnym wynoszącym 0,57 clo. Metabolizm tych osób

wynosił 1,1 met, ponieważ podczas testu osoby te siedziały i najczęściej czytały książkę. Przebywający w komorze klimatycznej studenci, uzupełniali kilka razy anonimowe kwestionariusze ankiet, w których zawarto pytania dotyczące TSV, TCV oraz preferencji termicznych. Według oceny respondentów, ich TSV w temperaturze 22°C, między 20 a 60 minutą znajdowało się w strefie komfortu. Tymczasem między 0 a 20 minutą oraz między 60 a 90 minutą, TSV osób wynosiło w granicach -1. PMV w każdym przypadku przeszacowało wrażenia termiczne ludzi, wskazując na niedokładność względem realnych wrażeń termicznych TSV ludzi.

W badaniach [83] ideą eksperymentu było sprawdzenie różnych masek i ich wpływu na samopoczucie ludzi przed i po jej założeniu. Badane osoby zostały poproszone o założenie maski jednorazowej medycznej, medycznej maski chirurgicznej, maski KN95 (ochronna maska medyczna), maski nie jednorazowej (maski z gąbki), jednorazowej maski, maski z gazy. Pod uwagę wzięto możliwość wystąpienia takich dolegliwości jak ból głowy, suchość w ustach, podrażnienie oka, apatia, suchość skóry, zawroty głowy, trudności z myśleniem, katar, trudności z koncentracją, osłabione oddychanie, nieprzyjemny zapach. Cały proces badawczy odbywał się w uniwersyteckim laboratorium w Chinach – o powierzchni 48m², w maju 2020 roku, w czasie gdy na świecie panowała pandemia i powszechny lockdown. Temperatura powietrza wynosiła 28°C, a wilgotność względna 60%. Przewidziany czas badania wynosił 100 minut wraz z uzupełnieniem anonimowego kwestionariusza ankiety odnoszącej się do odczuć cieplnych. W celu określenia odczuwanych wrażeń, wykorzystano pięciostopniową skalę, gdzie 0 – to brak, 1 – niewiele, 2 – trochę, 3 – całkiem oraz 4 – nadzwyczajnie. Analizując wyniki autorzy wskazali, że według respondentów, maska nie jednorazowa jest bardziej komfortowa niż wyżej wymienione. Co więcej, najgorzej ocenioną maską pod względem pojawienia się dolegliwości była maska KN95, ponieważ podczas jej noszenia dolegliwości były dotkliwsze niż u innych wymienionych wyżej typów masek. Dotyczyło to w szczególności zawrotów głowy, trudności z koncentracją i trudności z oddychaniem. Autorzy opracowania zaznaczyli, że nie wykazano istotności statystycznej wpływu noszenia maski na ciśnienie krwi dla tej grupy badawczej. Mimo to niezaprzeczalne jest, że średnia temperatura skóry, częstość akcji serca wzrastała w czasie noszenia maski i tym samym zmniejszając nasycenie krwi tlenem, świadcząc o wzajemnym powiązaniu.

Należy mieć świadomość, że pewna grupa ludzi regularnie korzystała z masek przed pojawieniem się COVID-19 (personel medyczny, służby mundurowe i sanitarne, czy nawet

pracownicy budowlani), stąd problem pojawienia się dyskomfortu przy noszeniu masek nie dotyczy tylko okresu pandemii, jednak w tym czasie oprócz np. pracowników ochrony zdrowia również ich pacjenci musieli korzystać z masek. Dla tej drugiej grupy była to nowość, czyli coś do czego nie byli przyzwyczajeni, i to również mogło powodować ich niekorzystne subiektywne odczucia. W jednym ze szpitali w Singapurze, Cheok i in. [84] podczas wybuchu pandemii COVID – 19, od 16 października 2020 do 16 listopada 2020 roku, badali dyskomfort pojawiający się w czasie noszenia maski. Badanymi osobami byli pacjenci oraz będące z nimi osoby towarzyszące. W badaniu udział wzięło 402 osoby w wieku od 15 do 98 lat. Pomocą w przeprowadzeniu tych badań były anonimowe kwestionariusze ankiet rozdawane przez personel medyczny. Zauważono, że kobiety częściej zgłaszały dyskomfort związany z poceniem się niż mężczyźni. Młodsze osoby częściej zgłaszały problemy z cerą i pocenie się. Co więcej, te same skutki przedstawiała osoby, których czas noszenia masek był długi. Autorzy zwrócili uwagę na jakość masek. Maski chirurgiczne noszone przez pacjentów powodowały większe niezadowolenie, ze względu na problemy z cerą oraz pocenie się, niż u osób które nosiły maski wielokrotnego użytku. Z drugiej jednak strony osoby noszące maski materiałowe – wielokrotnego użytku – częściej zgłaszały, że ich dopasowanie jest gorsze, niż w przypadku osób noszących maski chirurgiczne. W innym badaniu Krajewski i in. [59] poprosili pacjentów i pracowników medycznych o uzupełnienie anonimowego kwestionariusza ankiety oceniającej swędzenie twarzy w skali od 0 do 10, gdzie 0 to brak dolegliwości, zaś 10 najgorsze swędzenie. Zawarto w niej też pytania dotyczące wrażliwości skóry, atopowości itp. u studentów i pracowników służby zdrowia. Przebadano łącznie 1156 pracowników, w tym 211 mężczyzn i 945 kobiet oraz 1173 studentów, w tym 297 mężczyzn i 876 kobiet. Dla grupy pracowniczej średnia wieku wynosiła $40,5 \pm 11,8$ lat, a dla studentów $20,9 \pm 2,9$ lat. Łącznie 834 osoby zadeklarowały atopowość skóry, co zdecydowanie częściej pojawiało się u pracowników medycznych niż pacjentów, zaś połowa badanych wskazała, że ma wrażliwą skórę. Wyniki wykazały, że jedynie 701 osób dezynfekowała swoje maski na twarz. Swędzenie pojawiało się u 602 osób, ale ta dolegliwość częściej występowała u pracowników służby zdrowia. Co ciekawsze, swędzenie pojawiało się u blisko 20% osób, którzy nosili maskę przez godzinę, natomiast dla około 33% osób swędzenie pojawiało się przy dłuższym czasie jej noszenia. Okazało się, że swędzenie twarzy pojawiało się częściej u osób noszących maski N95/ FFP2 (u około 33%), niż u osób noszących maski materiałowe, dla których ten procent wyniósł 20. Problemy skórne podczas noszenia masek zostały również opisane przez Westermann

i in. [85] w grupie pielęgniarek noszących maski i inne środki ochrony indywidualnej, wyodrębnili takie problemy skórne jak atopowe zapalenie skóry, egzema rąk czy łuszczyca. Badana grupa w 59% stwierdziła, że noszenie środka ochrony indywidualnej wpłynęło na znaczne pogorszenie stanu skóry. Ankietowani najczęściej zaznaczali pojawienie się zapalenia skóry wokół ust (u 92% osób), pojawienie się trądziku (u 81% osób) oraz trądziku różowatego (u 71% osób). Według badanych osób problemy skórne pojawiały się częściej w okolicach twarzy (u 69% osób) niż problemy skórne na rękach (u 59% osób) lub w innych obszarach ciała. Autorzy wywnioskowali, że noszenie masek FFP ma znaczący wpływ na pogorszenie stanu skóry twarzy. Dyskomfort noszenia masek FFP2 oraz środków ochrony indywidualnej u pracowników służby zdrowia został opisany także w pracy Wojtasz i in. [86], gdzie został oceniony jako łagodny do umiarkowanego, a głównie pojawiającymi się symptomami były zmęczenie i pragnienie. Równocześnie zostało również odnotowane (tak jak w przypadku prac [73, 87]), że podczas 12 – godzinnej zmiany w pracy, nosząc maskę lub strój ochronny, powinno wygospodarować się trzy godziny, w których nie nosi się maski lub stroju ochronnego, który dałby czas do regeneracji organizmu.

Badanie zaproponowane przez Scarano i in. [88] związane było z pracą chirurgów i dentystów podczas zabiegów jamy ustnej. Od maja do października 2020 roku analizowano pracę 10 dentystów wyspecjalizowanych w chirurgii jamy ustnej oraz 10 stomatologów w wieku 29 ± 6 lat. Zanim przeprowadzono badanie, lekarze na 10 minut przechodzili do pomieszczenia o stałej temperaturze, a następnie zakładali maski FFP2 i na to nakładali maskę chirurgiczną (dla sumarycznej liczby 64 zabiegów). Po wykonaniu każdego zabiegu oceniali czy pojawiło się u nich takie symptomy jak duszność, zawroty głowy, bóle głowy. U badanych osób zaobserwowano, że pod wpływem noszenia tych dwóch masek nałożonych na siebie obniżyła się saturacja z poziomu 97,5% na 94% po wykonanym zabiegu oraz wzrosło tętno z 60 na 98 uderzeń na minutę. Dodatkowo, autorzy we wnioskach zaznaczyli, że podczas dłuższego noszenia tych dwóch masek pojawiają się problemy z oddychaniem, obniżeniem sprawności umysłowej i fizycznej oraz ze wzrastającym zmęczeniem.

Alreshidi i in. [87], którzy skupili swoją uwagę na pojawianiu się takiej dolegliwości jak ból głowy podczas noszenia większej liczby środków ochrony indywidualnej (ŚOI). W tym celu w szpitalu w Arabii Saudyjskiej poproszono o współpracę pracowników zespołu medycznego – pielęgniarki, specjalistów oraz konsultantów. Łącznie przebadano

1060 osób, w tym 753 kobiet oraz 307 mężczyzn, gdzie największą grupą uczestniczącą w badaniach były pielęgniarki (68% osób). Pracownicy zostali podzieleni na dwie grupy, z której pierwsza to 628 osób nie mających wcześniej bólu głowy oraz 432 osoby mające bóle głowy przed wybuchem pandemii. Pracownicy z pierwszej grupy częściej doświadczali bólu głowy w okresie pandemii niż osoby mające już wcześniej problemy z tą dolegliwością. Zwrócono uwagę, że pierwsza grupa uczestnicząca w badaniach nieodpowiednio się nawadniała, paliła papierosy i żyła w stresie emocjonalnym. Analiza wykazała zależność wynikającą z noszenia ŚOI i pojawianiu się bólu głowy w zależności od czasu noszenia stroju ochrony indywidualnej. Pracownicy noszący taki strój około 5 – 9 godzin dziennie czterokrotnie bardziej narażają się na pojawienie wspomnianej dolegliwości, niż osoby, które pracowałyby krócej w ŚOI. Podobne wnioski podaje [73]. Ponadto, autorzy [87] sprawdzili jakie symptomy towarzyszą podczas bólu głowy i okazało się, że były to nudności, zwiększona wrażliwość na światło oraz dźwięk czy ruch. 50% grupy odczuwającej bóle głowy przed pandemią wskazała uczucia nudności, dyskomfortu szyi oraz wrażliwości na ruch w porównaniu do grupy pierwszej. W Hiszpani Jimenez – Garcia i in. [89] sprawdzili samopoczucie pielęgniarek podczas noszenia ŚOI. Pielęgniarki wskazały poważny problem jakim był brak zapasów ŚOI, co skłaniało je do dłuższego czasu eksploatowania masek chirurgicznych i FFP2/FFP3 niż jest to zalecane.

Jak można zauważyć wzrost zainteresowania kwestią samopoczucia w maskach w czasie pandemii przybrał na sile. Przed okresem pandemicznym, badania komfortu cieplnego od dawna prowadzone były głównie w budynkach użyteczności publicznej lub w miejscach dużych skupisk ludzi, jednak dopiero pojawienie się COVID –19 i powszechne stosowanie masek ochronnych spowodowało, że zagadnienia związane z subiektywną oceną środowiska wewnętrznego przez osoby noszące maski, stały się tematem prac badawczych. Jednym z pierwszych artykułów, w których można znaleźć porównanie wrażeń cieplnych u ludzi bez masek i z maską są badania przeprowadzone w Rumunii [90] na Politechnice w mieście Cluj – Napoca. Do celów badawczych wybrano dwie sale, jedną laboratoryjną mieszczącą 52 osoby, a drugą aulę wykładową mieszczącą 300 osób. Okres realizacji przypadł na sesję egzaminacyjną w okresie zimowym na koniec stycznia 2020 roku dla sali laboratoryjnej (jeszcze nie było obostrzeń), gdzie udział w badaniu wzięło 48 osób. Drugą część badań wykonano w 2022 roku po piątej fali COVID – 19. W tym okresie noszenie masek było obowiązkowe. Studenci mieli obowiązek również siedzieć w odstępach dwóch miejsc od siebie. W obu tych przypadkach wykonano badania

o tych samych porach i godzinie 10:00 (64 osoby) i 12:00 (65 osób) o łącznej liczbie 129 osób. Pomiary środowiskowe wykonano przy pomocy urządzenia Testo 480. Okna i drzwi podczas egzaminu pozostały zamknięte. Pomiar środowiskowy trwał 1,5 godziny. Analiza termiczna odbywała się przez uzupełnione przez studentów anonimowe kwestionariusze ankiety. Należy nadmienić, że w badaniu brali udział sami mężczyźni. Zostali oni podzieleni na trzy grupy według wartości BMI, gdzie wyróżniono wagę normalną, nadwagę oraz otyłość. PPD jakie uzyskano podczas badań dla obu sal znajdowało się poniżej 10%. PMV dla mężczyzn bez masek wykazało środowisko bliższe warunkom komfortowym niż PMV dla mężczyzn, którzy nosili maski, ponieważ wskaźnik PMV ukierunkował się w środowisko przyjemnie chłodne. Zauważono, że bez masek komfort odczuwało około 70% osób, zaś przyjemnie ciepło wskazało 16% ludzi, natomiast z maseczkami odczuwanie komfortu obniżyło się do wartości około 49%, a wzrosło do 27% osób, którzy uważali, że jest im przyjemnie ciepło. Wnioski Autorów artykułu wykazały, że PMV nie odzwierciedlało wrażeń termicznych osób bez i z maskami. Stwierdzono niski związek pomiędzy BMI a oceną wilgotności oraz, że wiek nie ma znacznego wpływu na ocenę środowiska mikroklimatu. W badaniach [91] również wskazano na problem przeszacowania wartości PMV względem TSV.

Następnym badaniem skupiającym się na wrażeniach cieplnych ludzi w maskach ochronnych to badania Tang i in. [92] podczas pandemii COVID – 19, którzy analizowali wrażenia termiczne studentów w bibliotece na Uniwersytecie w Guangzhou, w południowych Chinach, w czerwcu 2021 roku. Tang i in. podali, według danych meteorologicznych, że w czerwcu dla tego regionu średnia temperatura wynosiła 30°C, przy średniej wilgotności od 70% do 95% – co jak zaznaczali – wskazywało na odczuwanie warunków jako niekomfortowe przez wielu ludzi. Łącznie przebadano 1602 osób, gdzie mężczyzn było 550, a kobiet 1052. Należy zaznaczyć, że autorzy poprosili studentów, którzy w momencie określania swojego stanu zdrowia pominęli maski, jako główne źródło dyskomfortu, a zaznaczyli je w momencie uzupełniania anonimowych kwestionariuszy ankiet. Badanie trwało około 30 minut. Średnia wieku dla studentów wynosiła 20,7 lat, zaś średnia izolacyjność ubioru wynosiła 0,39 clo. Urządzenie pomiarowe zostało usytuowane na wysokości około 1,1 metra (co odpowiadało pozycji siedzącej studentów). 73,9% studentów wskazało, że noszenie masek powoduje uczucie dyskomfortu, a najwyższy dyskomfort znajduje się na twarzy dla około 71% osób, ponieważ jest ona punktem styczności między maską a twarzą. Symptomy jakie się pojawiły podczas noszenia masek

to uczucie ciepła na twarzy – 62,65%, a drugi najwyższy wynik pojawił się dla duszności – 25,43%. Ponadto, symptomy które wystąpiły – poza ciepłem na twarzy i dusznością – to zawroty głowy i osłabienie, przyspieszone bicie serca, ucisk w klatce piersiowej, mdłości, wzmożone pocenie się, wrażliwość skóry czy pogorszenie widzenia. Jednak nie miały one istotnego znaczenia ze względu na niski procent wyboru tych odpowiedzi przez badanych studentów. W porównaniu do przypadku, gdy na twarzy nie było maski, TSV było komfortowe, natomiast w czasie noszenia maski odczucie komfortu niewiele się obniżyło, ponieważ w obu przypadkach środowisko komfortowe ocenione zostało na granicy 60%. Należy jednak dodać, że autorzy zaznaczyli, że osoby noszące maski wskazywały odczuwanie wrażeń cieplnych w kierunku środowiska cieplejszego.

Badania w bibliotece na Uniwersytecie w Guangzhou były również kontynuowane przez Tang i in. [93] w lipcu 2021 roku, przez 10 dni okresu letniego oraz w styczniu 2022 roku przez 8 dni okresu zimowego. Dla czerwca wilgotność względna wynosiła od 78 do 95%, dla stycznia od 30 do 56%. Średnia temperatura dla czerwca wynosiła 30°C, dla stycznia 12°C. Ważnym elementem tego badania było, aby osoba biorąca udział w badaniu pozostawała w bibliotece minimum przez 30 minut. Studenci podczas badania nosili maski. Metodologię badań oparto na anonimowych kwestionariuszach ankiety dotyczących subiektywnych wrażeń termicznych, ruchu powietrza oraz wilgotności względnej opierającej się na 7 – stopniowej skali oceny. Ponadto, zawarto w niej pytania o noszoną maseczkę i odczuwany dyskomfort. Łącznie otrzymano 2643 ankiet (w okresie letnim – 1602, a w zimowym – 1041). Średni wiek badanych osób dla czerwca wyniósł 20,7 lat, zaś dla stycznia 20,2 lat. Średnia izolacyjność ubioru wynosiła 0,39 clo dla czerwca, a dla zimy to 0,88 clo. Przyrząd pomiarowy znajdował się na wysokości 1,1 metra. Według oceny studentów, największy dyskomfort odczuwany był na twarzy w okresie letnim i ten symptom zaznaczyło 62,6% osób, a w zimie ciepło na twarzy odczuwało już 54,6% respondentów. Drugą najbardziej dokuczliwą dolegliwością wskazywaną było odczuwanie duszności: dla lata – 25,4% oddanych głosów oraz dla zimy – 35,2% odpowiedzi. Pozostałe dolegliwości takie jak zawroty głowy, osłabienie, przyspieszone bicie serca, ucisk w klatce piersiowej, pojawienie się nieżyty nosa, nadmierne pocenie, wrażliwość skóry oraz niewyraźne widzenie zaklasyfikowano poniżej 10%. Autorzy wskazali, że stopień odczuwania ciepła na twarzy przez studentów podczas noszenia masek w zimie, było na niższym poziomie, niż przy noszeniu masek w czasie lata przez studentów, natomiast pojawienie się takiej dolegliwości jak duszności było bardziej

odczuwane w zimie przez studentów, niż w przypadku okresu letniego. W ogólnej ocenie studentów, jakość powietrza w obu badanych okresach była zadowalająca. Studenci, którzy zostali przebadani w bibliotece, w całościowej ocenie swoich wrażeń termicznych wskazali, że nie ma znaczącej różnicy pomiędzy odczuwaniem komfortu cieplnego podczas noszenia maski (około 53%) lub jej braku (około 58%) w okresie letnim, i tym samym w okresie zimowym, gdzie nawet ten zakres wzrósł: dla braku maski, oddano około 68% wskazań, natomiast dla braku maski procent oddanych głosów wyniósł około 65%. Odnosząc się do TSV to dla każdej z odpowiedzi związanej z odczuwaniem przez studentów chłodu, zbytniego chłodu, gorąca lub zbytniego gorąca, procent oddanych głosów znajdował się poniżej 10%. Natomiast dzieląc ludzkie ciało na partie to dla twarzy, głowy, klatki piersiowej, pleców oraz kończyn odczuwanie komfortu było wysokie: 50% do około 80%. Wartości dla -3, -2 oraz +2 i +3 dla każdej części wynosiły poniżej 10%. W Korei Południowej Fakir & Kim [94] przeprowadzili na Uniwersytecie Kookmin badania, w których udział wzięło 17 osób, w tym 14 mężczyzn i 3 kobiety, w dobrej kondycji fizycznej. Proces badawczy rozpoczął się w lutym i trwał do marca 2021 roku. Temperatura w pomieszczeniu wynosiła od 18 do 24°C i zmieniano ją o 0,15°C co minutę. W związku z COVID-19, zalecono, aby w sali przebywało co najwyżej 4 osoby, które podczas badania siedziały (otrzymując możliwość korzystania z laptopów lub czytanie książek). Autorzy wykorzystali do badań inteligentną maskę, która miała za zadanie przewidywać wrażenia termiczne ludzi, którzy ją nosili. Co więcej, do twarzy podłączono czujniki, które miały na celu informowanie o termicznych zmianach zachodzących na twarzy podczas jej noszenia. Temperatura skóry twarzy wzrosła z 30,8°C do 36,2°C, a otrzymane wyniki wykazały, że w 77% propozycja tego rodzaju inteligentnej maski może przewidzieć jakie będą wrażenia termiczne na twarzy po jej założeniu i tym samym sygnalizować ten fakt, tak aby nie dopuścić do odczuwania zbytniego ciepła.

W literaturze przedmiotu, poza badaniami przeprowadzonymi w budynkach, dodatkowo znaleziono odniesienia do eksperymentów związanych z aktywnością fizyczną w połączeniu z noszeniem maski ochronnej i jej wpływu na wrażenia termiczne oraz zmian zachodzących w samopoczuciu. Interesujące badania zaprezentowali Zhou i Dong [95], którzy wybrali dach z ogrodem na Uniwersytecie Huaqiao w miejscowości Xiamen w Chinach do realizacji swojego celu badawczego. Realizację pomysłu rozpoczęto w maju 2021 roku, a zakończono w lutym 2022 roku – obejmując najcieplejsze i najzimniejsze okresy w tym mieście. W teście udział brały 42 osoby (20 mężczyzn, 22 kobiety) i każda

z tych osób była przyzwyczajona do trudnych warunków klimatycznych tego miejsca. Autorzy wymagali, aby podczas badania ubiór był za każdym razem taki sam. W każdym eksperymencie uczestniczyła grupa kontrolna bez maski oraz druga grupa nosząca maski. Czas trwania badania wynosił 1 godzinę, z czego pierwsze 30 minut dotyczyło ustabilizowania procesów biologicznych i wyciszenia się w pomieszczeniu o temperaturze od około 24 do około 26,5°C. Anonimowy kwestionariusz ankiety był uzupełniany co 5 minut w czasie 30 minutowego badania. Zhou i Dong założyli, że 42 osoby będą w trybie siedzącym oraz pieszym (przy prędkości biegni 1,2 m/s). Anonimowy arkusz ankiety zawierał dane metryczkowe oraz pytania związane z komfortem cieplnym oraz możliwością wystąpienia dyskomfortu cieplnego w różnych partiach ciała. Nie można również zapomnieć o pytaniach związanych z preferencjami temperatury, prędkości powietrza itp. Odczuwany dyskomfort u osób bez maski dotyczył klatki piersiowej i brzucha, a u osób w masce największy skumulowany odsetek głosów dotyczył dyskomfortu twarzy. Dla osób siedzących w maskach ten poziom niezadowolenia wynosił 75,9% (lato), 68,5% (jesień), 53% (zima), a w czasie chodu wynosiło odpowiednio: 92,8%, 79,6% oraz 66,7%. Należy dodać, że równie mocno podkreślaną częścią ciała, która najbardziej odczuwała efekt noszenia maski to klatka piersiowa.

Dokonując dalszej analizy uwzględniającej aktywność fizyczną naukowcy w pracy [96] zdecydowali się na sprawdzenie wrażeń termicznych osób chodzących w zacienionej przestrzeni w lecie, dającym osłonę ludziom przed słońcem przy temperaturach w zakresie 30 – 36,5°C, przy zastosowaniu masek ochronnych. Miejscem prowadzonych badań było miasto Guangzhou, między budynkami uczelni, w lipcu 2022 roku. Osoby wybrane do badań miały nie wykonywać zbędnej aktywności fizycznej (przebywanie w spoczynku) oraz unikać nagłych wahań temperatur w budynku przed wyjściem na zewnątrz do miejsca zacienionego. Przez 30 minut badane osoby chodziły z prędkością 1,40 m/s oraz 1,60 m/s wraz z założonymi na twarzach maskami. Po upływie 30 minut, respondenci wracali do budynku, aby zdjąć maskę w celu szybszego powrotu do równomiernego oddychania. Maski, które zostały wykorzystane do badania to maski chirurgiczne. Łącznie udział w eksperymencie wzięło 32 osoby w tym 14 mężczyzn i 18 kobiet. Aby zwiększyć rzetelność wyników zastosowano czujniki do mierzenia temperatury ciała. Autorzy przedstawili również dolegliwości jakie się najczęściej pojawiały w odpowiedziach na pytania ankietowe – a były to według 54,55% osób intensywne pocenie się oraz występowanie u 42,18% tachykardii. Zwrócono uwagę, że te

dwa symptomy są silnie związane z tym, że maska bezpośrednio utrudnia wymianę powietrza podczas procesu oddychania. Trzecią z kolei dolegliwością według 30,18% studentów była duszność. Zawroty głowy, ukłucia w klatce piersiowej oraz złe samopoczucie deklarowało od 17 do 19% studentów, z drugiej jednak strony najrzadziej pojawiał się katar, którego pojawienie się zadeklarowało zaledwie 4,37% osób. Analizując TSV studentów wykazano, że noszenie maski pogarsza odczuwanie komfortu na twarzy. Dodatkowo w 5 minucie średnie wrażenia termiczne były wyższe w maskach niezależnie od prędkości chodzenia. Co więcej, 50% studentów wspomniało, że odczuwało wilgotne środowisko między maską a twarzą. Porównując to do odczuć studentów, którzy nie nosili na twarzy maski – odczuwanie środowiska wilgotnego wskazano u 35% badanych. Wpływ noszenia maski podczas tego eksperymentu na metabolizm wykazał, że dynamicznie wzrósł on już po 1 minucie rozpoczęcia badania, ale również bardzo szybko powrócił do równowagi po 5 minutach od zakończenia badania.

Od marca do kwietnia 2022 roku, na Uniwersytecie w Guangzhou, zaproszono do udziału w badaniach 30 zdrowych studentów – 15 mężczyzn i 15 kobiet [97]. Głównym założeniem i myślą tego eksperymentu było, aby studenci chodzili przy trzech prędkościach 1,2; 1,4 oraz 1,6 m/s bez maski oraz z maską na twarzy. W pierwszej części kwestionariusza studenci określali dane metryczkowe jak płeć, wiek, wzrost, wagę, ubiór itp., natomiast druga część zawierała pytania dotyczące ogólnych wrażeń termicznych, wrażeń termicznych twarzy, dyskomfortu czy satysfakcji z warunków środowiskowych. Parametry klimatyczne, jakie panowały podczas badania w zależności od tempa chodzenia to temperatura powietrza 24,1°C, 24,0°C, 23,7°C, prędkość powietrza, która wynosiła odpowiednio 0,91 m/s, 1 m/s, 0,94 m/s oraz wilgotność względna – 72,4%, 73% i 74%. Należy nadmienić, że w czasie realizacji badań panowały stabilne warunki środowiskowe. Analiza wartości TSV (całość ogólnych wrażeń) studentów dla prędkości 1,2 m/s przy zastosowaniu maski wskazała, że około 70% osób odczuwało komfort ciepły, 12% osób zadeklarowało wybór odpowiedzi przyjemnie chłodnego środowiska. Poniżej 5% badanych wybrało odpowiedź z odczuciami środowiska za zimnego lub zbyt zimnego, a około 15% studentów oceniło swoje wrażenia termiczne jako przyjemnie ciepłe. Jedynie około 1% osób oceniło swoje wrażenia jako za ciepłe. Porównując w/w wyniki do sytuacji, w której respondenci nie nosili masek na twarzy, to osoby te odczuwały mniejszy komfort (wartość 0) i większy procent osób (około 20%) oceniło wrażenia termiczne jako przyjemnie chłodne, a poniżej 10% oceniło środowisko jako przyjemnie ciepłe. Dla

prędkości 1,4 m/s więcej osób noszących maski odczuwały komfort cieplny niż w przypadku braku maski. Z tym, że wrażenia termiczne studentów ukierunkowały się w dodatnią stronę TSV czyli w ocenę swoich wrażeń cieplnych jako przyjemnie ciepłych, za ciepłych oraz zbyt gorących. Wrażenia termiczne osób, które na twarzy nie posiadały maski, były określane jako przyjemnie chłodne, za zimne i zbyt zimne oraz co ciekawsze, w mniejszym stopniu jako środowisko ciepłe. Przy prędkości 1,6 m/s zauważono już spadek odczuwanego komfortu – dla studentów w maskach zadeklarowano komfort cieplny dla mniej niż 40% badanych. Odwrotnie niż w przypadku osób, które masek nie nosiły, ponieważ komfort termiczny wskazano u powyżej 40% badanych. W tym wypadku przy większej prędkości, noszenie maski sprawiło, że studenci odczuwali zwiększone ciepło. Badani, nie noszący masek, dla prędkości 1,6 m/s również określali swoje odczucia termiczne (TSV) w wielkościach dodatnich (+1, +2, +3), ale w mniejszym procencie, niż u osób, które w badaniu nosiły maski. Po dokonanej analizie oceny komfortu twarzy okrytej maską komfortowe warunki odczuwane były przy prędkości 1,2 m/s, następnie przy 1,4 m/s, gdzie ocena wrażeń termicznych w masce widocznie obejmowała środowisko komfortowe i przyjemnie ciepłe, natomiast przy prędkości 1,6 m/s dominowały odczucia komfortowe i przyjemnie ciepłe, ale środowisko było również oceniane jako za ciepłe i zbyt gorące. Studenci, którzy nie posiadali na twarzy masek, w w/w prędkościach odczuwali komfort cieplny twarzy. Średnie wrażenia termiczne względem czasu wskazują, że wrażenia termiczne w maskach na twarzy znajdują się powyżej średnich wrażeń bez masek na twarzy. Główne wnioski jakie przedstawili autorzy to, że maska może poprawić komfort cieplny, ale przy niewielkiej prędkości chodzenia, a wraz z jej wzrostem może doprowadzić do pojawienia się znaczącego dyskomfortu. Co więcej, badacze wskazali że maski wpływają na oddychanie, wzrost tętna oraz wzrost temperatury skóry.

Po ogłoszeniu pandemii COVID – 19 naukowcy zainteresowali się porównaniem masek pod względem ich wyglądu, kształtu materiału oraz w jakim stopniu chronią przed zakażeniem wirusami. W jednym z opracowań, Oner i inni [98] skupili swoją uwagę na przebadaniu 10 różnych typów masek o różnej grubości. Do badań wytypowali między innymi maski jednowarstwowe chirurgiczne, dwuwarstwowe chirurgiczne, trzywarstwowe chirurgiczne, z tkaniny, z zaworem FFP1, bezzaworową FFP1, z zaworem FFP2, bezzaworową FFP2, z zaworem FFP3, bezzaworową FFP3 oraz analogicznie o grubościach 0,36 mm, 1,29 mm, 1,50 mm, 2,47 mm, 1,41 mm, 1,67 mm, 1,41 mm, 1,07 mm, 1,54 mm, 1,36 mm. Do realizacji badania, stworzono w drukarce 3D głowę, która

miała rzeczywisty rozmiar. W głównym wniosku przedstawionym przez Autorów wskazano, że maski chirurgiczne zapewniają lepsze warunki komfortu cieplnego, pomimo tego, że nie zapewniają tak wysokiej ochrony jak maski typu FFP. Jednocześnie, maski FFP pomimo wysokiej ochrony indywidualnej, zapewniły najgorsze warunki w zakresie odczuć cieplnych. Natomiast, Gericke i in. [99] skupili się na trzech rodzajach masek, do których dodano filtry.

Lee i in. [100] badali wybrane rodzaje masek, pod względem stwarzanych jak najbardziej sprzyjających warunków cieplnych na twarzy. Pierwszą była maska jednorazowa o trzech warstwach, maska HODO – posiadająca certyfikat FDA wraz z filtrem wielowarstwowym, maska chitozanowa, maska Accapi, maska Copper Line, maska PU30, maska CU. Przed wykonaniem badania wszystkie wymienione wyżej maski zostały poddane działaniu tej samej temperatury powietrza 21°C i 65% wilgotności względnej na 48 godzin. W badaniu udział wzięła 25 letnia osoba, której zadaniem było siedzieć na krześle w pomieszczeniu o temperaturze 29°C i wilgotności 58% przez 10 minut. Dodatkowo pod jej nosem został umieszczony czujnik temperatury powietrza i wilgotności względnej tak, aby kontrolować te parametry i ich zmiany wraz z wykonywaniem pomiarów temperatury skóry twarzy przed założeniem maski i po jej założeniu. Wykazano, że maseczka chitozanowa miała najniższy współczynnik przenikania wody, zaś maska Cu najwyższy. Jednocześnie maska Accapi miała najniższą przewodność ciepła, natomiast Copper Line najwyższą. Co więcej, temperatura twarzy była najniższa w masce Accapi, a w maskach PU3 oraz CU najwyższa. Dodatkowo Spennemann [101] przeprowadził analizę porównawczą dopasowania masek, ich kształtu, producentów, kolorów i ilości fałd na materiale.

W związku z koniecznością noszenia masek podczas pandemii, co było odgórnie narzucone, nie zwracano szczególnej uwagi na ilość powstających zanieczyszczeń związanych z pozostawieniem zużytej maski na ulicy, w budynkach użyteczności publicznej czy poprzez wrzucanie jej do morza czy oceanu. Nie rozważono również istoty problemu utylizacji takiego wyrobu medycznego. Jednak ten temat nie został niezauważony i zainteresował badaczy. Opracowanie Spennemanna [102] było pierwszym, w którym przeprowadzono analizę czasu rozkładu masek jednorazowych stanowiące największe źródło zanieczyszczeń podczas pandemii COVID – 19. Początkowe oznaki rozkładu masek na podstawie przeprowadzonej analizy Autora, przypadają na okres trzeciego tygodnia od momentu wystawienia na czynniki zewnętrzne, a zauważalna zmiana

w czwartym i piątym tygodniu ekspozycji, gdzie zaczynają się generować mikro plastiki. Jak wspomina ten sam autor w swoim opracowaniu [103] zużyte maski stanowią źródło mikro plastiku, które mogą być problematyczne i tym samym nieść katastrofalne skutki dla flory i fauny. Utrudnienie w gospodarowaniu odpadami pandemicznymi zostało również podjęte w pracy [104]. We wspomnianym opracowaniu zwraca się szczególną uwagę, aby zarządzać utylizacją środków ochrony indywidualnej w sposób kontrolowany oraz na skład materiałów/ tworzyw, z którego zostały stworzone środki ochrony indywidualnej, ponieważ może to przyczynić się do pogorszenia stanu zdrowia (w szczególności dotyczy to personelu medycznego). Problem z zagospodarowaniem odpadami generowanymi przez środki ochrony indywidualnej został też poruszony w pracy [105]. Zanieczyszczenie środowiska zużytymi maskami związane jest ze zwiększeniem zawartości mikro, makro i nano plastików w środowisku.

Rozdział II

Modelowanie komfortu cieplnego

Zapewnienie komfortowego środowiska to aktualnie jeden z ważniejszych celów stawianych przed projektantami nowoczesnego i energooszczędnego budownictwa. Według powszechnie panującej wiedzy i zasad najważniejsze jest stworzenie takich warunków klimatycznych, aby przeważająca większość ludzi czuła się dobrze w pomieszczeniach zamkniętych, aby taka osoba/y nie odczuwała/ły zbyt dużego chłodu, objawiającej się dreszczami bądź zbyt dużego ciepła, co mogłoby objawiać się potami lub innymi dolegliwościami jak np. pojawienie się kataru, duszności lub bólu głowy. Zarówno na etapie projektowania budynków jak i ich późniejszej eksploatacji skuteczne przewidywanie wrażeń cieplnych jako funkcji parametrów środowiska wewnętrznego wydaje się zagadnieniem kluczowym. Najpowszechniej stosowanym modelem komfortu cieplnego jest tzw. model Fangera. Jednocześnie był on podstawą do stworzenia norm (ISO 7730 i ASHRAE 55), które służą do praktycznych obliczeń wrażeń cieplnych przy zadanych parametrach.

Opracowanie w/w modelu wymagało zastosowania szczegółowej procedury obliczeniowej, opisanej w [10] i przedstawionej poniżej:

1. Celem analiz było uzyskanie równania stanu równowagi cieplej dla osoby znajdującej się w pomieszczeniu.
2. W związku z tym, należy przeprowadzić równanie bilansu cieplnego, ponieważ ludzkie ciało zawsze dąży do równowagi termicznej. Proces ten polega na wytwarzaniu wewnętrznego ciepła, które redukowane jest o ilość odparowanego potu oraz o mechanizm oddychania. Ilość tego ciepła równoważy się z ciepłem, które jest przewodzone przez ubiór, a następnie rozprzestrzeniane w wyniku procesu promieniowania i konwekcji
3. Pozostając w bilansie cieplnym, należy również omówić energię cieplną która w wyniku utleniania w jednostce czasu, może być przetworzona na moc mechaniczną, co suma summarum składa się na wytworzenie ciepła wewnętrznego. Następnie Fanger wprowadził dodatkowo sprawność ruchową.
4. Ostatecznie uzyskano wzór po podstawieniu danych odnoszących się do jednostki powierzchni zewnętrznej ciała.

5. W bilansie cieplnym nie można pominąć dyfuzji pary wodnej przez skórę. Nie jest to kontrolowane przez regulację termiczną organizmu, w związku z tym powstało równanie wyznaczające straty ciepła na podstawie dyfuzji pary wodnej przez skórę.
6. Podczas procesu wdychania powietrza przez organizm ludzki, ciepło wraz z parą wodną ogrzewa to powietrze, dzięki czemu powietrze dopływające do pęcherzyków płucnych ma taką samą temperaturę jaka panuje wewnątrz ciała. Z kolei podczas wydychania powietrza, następuje oddanie części ciepła, a para wodna się wykrapla, co skutkuje tym, że powietrze wydychane jest cieplejsze, niż to które człowiek wdycha. W związku z tym procesem – wentylowania płuc, strata ciepła utajonego podczas oddychania jest funkcją ilości wydychanego powietrza do różnicy zawartości wody w powietrzu wydychanym i wdychanym.
7. Po omówieniu strat ciepła utajonego, należy omówić stratę ciepła jawnego wskutek oddychania. W tym celu wprowadzono wzór McCutchana i Taylora. Dodatkowo Fanger wspomina, że te straty nie są wielkie porównując z innymi stratami, które są brane pod uwagę w bilansie cieplnym. Dlatego uznano, że średnia temperatura dla powietrza wydychanego może wynosić 34°C.
8. Przewodzenie ciepła przez odzież jest procesem bardzo istotnym, ponieważ każda ubrana osoba nosi na sobie ubranie o różnej izolacyjności. Wielkość związana z tym zjawiskiem to Λ_{cl} (opór przewodzenia ciepła). Bardzo trudno poznać tę wielkość ze względu na różnorodność materiałów, z których wykonane są poszczególne części garderoby. W związku z tym powstały przybliżone wartości oporu dla różnej kombinacji zestawów odzieży. Dodatkowo wyrażono wzór dotyczący przenikania ciepła jawnego ze skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży osłaniającej skórę.
9. Poprzez promieniowanie również zachodzą straty ciepła z zewnętrznej powierzchni odzieży pokrywającej ciało. Ten proces został przedstawiony równaniem Stefana – Boltzmanna. Dodatkowo Fanger zaznaczył, że ciało ludzkie nie ma regularnego kształtu i w całości nie jest rzeczywistym polem powierzchni ciała pokrytego odzieżą, a jest pomniejszonym polem określonym jako efektywne pole powierzchni promieniowania.
10. Stratę ciepła przez konwekcję na zewnętrznej powierzchni odzieży pokrywającej ciało. Wyróżnić można konwekcję naturalną oraz wymuszoną.

W zależności od jej rodzaju stosuje się odpowiednie wzory, a kryterium narzuca prędkość powietrza, która powinna być mniejsza od 0,10 m/s – dla konwekcji naturalnej, natomiast powyżej 0,10 m/s dla konwekcji wymuszonej.

11. Biorąc pod uwagę wyżej omówione aspekty związane z termoregulacją organizmu powstał bilans cieplny łączący, każdy wyżej omówiony aspekt z Tabeli 1 oznaczonych numerami 1–10.
12. Przed przedstawieniem ostatecznej formy modelu PMV, Fanger wskazał jeszcze dwa istotne elementy wzoru które zostały wprowadzone do wzoru o numerze 11. Dotyczą one zależności między temperaturą skóry a wydatkiem energetycznym jak i stratami ciepła poprzez odparowanie potu i wydatku energetycznego.
13. Po podstawieniu tych dwóch wartości do wzoru oraz po rozwiązaniu lewej strony, a następnie porównując do prawej, ostatecznie powstał model komfortu cieplnego który obecnie jest powszechnie stosowany na świecie oraz został zawarty w normie ISO 7730. Wzór na PMV, będący końcową formą modelu został opisany numerem 13 w Tabeli 1.

Każdy numer, który został opisany jako warunek konieczny do spełniania modelu Fangera – w Tabeli 1 odpowiada temu samemu numerowi (prawa strona tabeli) podanego wzoru.

Tabela 1. Wzory składające się na finalny model stworzony przez Fangera [10]

$f[\frac{Q}{A_{Du}}, A_{cl}, t_w, t_{mr}, p_w, v, t_s, \frac{Q}{A_{Du}}]=0$						(1)
$\frac{Q}{A_{Du}}$	Wydatek energetyczny w zależności do jednostki pola powierzchni ciała, które nie jest okryte ubiorem*	p_w	Ciśnienie	cząstkowe	pary wodnej w powietrzu	
A_{cl}	Opór przewodzenia ciepła odzieży	v	Względna	prędkość	przepływu powietrza	
t_w	Temperatura powietrza	t_s	Średnia	temperatura	skóry	
t_{mr}	Średnia temperatura promieniowania	$\frac{Q}{A_{Du}}$	Ilość	ciepła	zużytego aby odparować pot w zależności do jednostki pola powierzchni ciała, które nie jest okryte ubiorem*	
$^*A_{Du}$	Powierzchnia Dubois	$Q - Q_d - Q_w - Q_{ou} - Q_{oj} = Q_p = Q_R + Q_K$				(2)

Q	Ilość ciepła wewnętrznego wytworzonego przez ciało	Q_{oj}	Strata ciepła jawnego poprzez oddychanie
Q_d	Straty ciepła na skutek dyfuzji pary wodnej przez skórę	Q_p	Ilość ciepła przenikającego od skóry do zewnętrznej strony ubioru przylegającej do skóry
Q_w	Straty ciepła na skutek odparowania potu z powierzchni skóry	Q_R	Straty ciepła przez promieniowanie od zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej skórę
Q_{ou}	Straty ciepła utajonego podczas oddychania	Q_K	Straty ciepła przez konwekcję od zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej skórę
$Q_M = Q + N$			(3)
$\frac{Q}{A_{Du}} = \frac{Q_M}{A_{Du}} (1 - \eta) , W/m^2 [kcal/(m^2h)]$			(4)
Q_M	Ciepło metaboliczne	η	Sprawność
N	Moc mechaniczna		
$Q_d = r\beta A_{Du}(p_s - p_w)$			(5)
$Q_d = 3,06 \cdot 10^{-3} \cdot A_{Du}(256t_s - 3360 - p_w), W$			
Q_d	Strata ciepła przez dyfuzję pary wodnej przez skórę, W[kcal/h]	p_s	Ciśnienie nasyconej pary wodnej przy temperaturze skóry, N/m ² [mm Hg]
r	Ciepło parowania wody, J/kg [kcal/kg]	p_w	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu, N/m ² [mm Hg]
β	Współczynnik przenikania masy pary wodnej przez skórę, kg/(m ² ·s·N/m ²)[kg/(m ² ·h·mm Hg)]		
$Q_{ou} = \dot{V} \cdot r(x_{wy} - x_w)$			(6)
Q_{ou}	Strata ciepła utajonego w związku z oddychaniem, W [kcal/h]	x_{wy}	Zawartość wilgoci w wydychanym powietrzu, kg/kg pow. suchego
$\dot{V}$	Strumień masy wdychanego powietrza, kg/s [kg/h]	x_w	Zawartość wilgoci w wdychanym powietrzu, kg/kg pow. suchego
r	Ciepło parowania wody (temp. 35°C), J/kg [kcal/kg]		

		$Q_{oj} = \dot{V}c_p(t_{wy} - t_w)$		(7)
		$t_{wy} = 32,6 + 0,066t_w + 32x_w$		
		$Q_{oj} = 0,0012Q_M(34 - t_w), W$		
c_p	Ciepło właściwe suchego powietrza przy stałym ciśnieniu, J/(kg·K)	t_{wy}	Temperatura powietrza wydychanego, °C	
		$\Lambda_{cl} = \frac{R_{cl}}{0,18}, clo$		(8)
		$Q_p = A_{Du} \cdot \frac{t_s - t_{cl}}{0,18\Lambda_{cl}}, kcal/h$		
R_{cl}	Całkowity opór przewodzenia ciepła od skóry zewnętrznej powierzchni odzieży osłaniającej ciało, (m ² ·h·°C)/kcal			
		$Q_R = A_{ef}\epsilon\sigma[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4], W [kcal/h]$		(9)
		$A_{ef} = f_{ef}f_{cl}A_{Du}, m^2$		
A_{ef}	Efektywne pole powierzchni promieniowania ciała ludzkiego okrytego odzieżą, m ²	t_{mr}	Średnia temperatura promieniowania, °C	
ϵ	Względna zdolność emisji promieniowania powierzchni ciała ludzkiego okrytego odzieżą	t_{cl}	Temperatura powierzchni odzieży, °C	
σ	Stała Stefana – Boltzmanna, wynosząca 5,67·10 ⁻⁸ W/(m ² ·K ⁴)	f_{ef}	Współczynnik efektywnego pola powierzchni promieniowania	
f_{cl}	Stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego	A_{Du}	Pole powierzchni ciała które nie jest pokryte odzieżą	
		$C = A_{Du}f_{cl}\alpha_k(t_{cl} - t_w)$		(10)
α_k	Współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, W/(m ² ·K)[kcal/(m ² ·h·°C)]			
		$\frac{Q_M}{A_{Du}}(1 - \eta) - 0,35[1,92t_s - 25,3 - p_w] - \frac{Q_w}{A_{Du}} - 0,0023\frac{Q_M}{A_{Du}}(44 - p_w)$		(11)
		$-0,0014\frac{Q_M}{A_{Du}}(34 - t_w) = \frac{t_s - t_{cl}}{0,18\Lambda_{cl}}$		
		$= 3,4 \cdot 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] + f_{cl}\alpha_k(t_{cl} - t_s)$		

$$t_s = 35,7 - 0,026 \frac{Q}{A_{Du}} \quad (12)$$

$$Q_w = 0,36 A_{Du} \left(\frac{Q}{A_{Du}} - 58 \right), W$$

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{aligned} &(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ &- 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &- 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} + t_a) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Gdzie:

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

$$h_c = 2,38(t_{cl} - t_w)^{0,25} \text{ dla } 2,38(t_{cl} - t_w)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}}$$

$$h_c = 12,1\sqrt{v_{ar}} \text{ dla } 2,38(t_{cl} - t_w)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl} \text{ dla } I_{cl} \leq 0,078, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 I_{cl} \text{ dla } I_{cl} > 0,078, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

Proces termoregulacji jest procesem bardzo złożonym i wynikającym z wielu różnych elementów, które należy wziąć pod uwagę analizując komfort cieplny. Finalnie PMV, które zostało zaprezentowane w Tabeli 1 – numer 13, jest stosowane do określenia przewidywanego średniego głosu odnoszącego się do komfortu cieplnego, czyli do przewidywania czy ludzie w danym pomieszczeniu o danych parametrach mogą odczuwać komfort cieplny, czy mogliby odczuwać środowisko jako zbyt ciepłe lub gorące oraz chłodne lub zbyt zimne. Jak już jednak wspomniano w podrozdziale 1.1, według szeregu autorów wskaźnik PMV nie przewiduje w precyzyjny sposób wartości TSV, czyli rzeczywistych wrażeń termicznych ludzi. Niemniej, zdarzają się badania w których można znaleźć informację, że PMV i TSV są do siebie zbliżone.

Fanger dodatkowo zaproponował wzór na PPD – odsetek ludzi niezadowolonych z panujących warunków – czyli tych, którzy odczuwają dyskomfort. Wzór na PPD został zaprezentowany poniżej [10, 31]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (14)$$

Jak można zauważyć, aby obliczyć wartość PPD, w pierwszej kolejności należy poznać wartość PMV. W ten sposób można otrzymać procent osób niezadowolonych

z panujących warunków. PPD bazujące na PMV, bierze pod uwagę wartości oraz parametry środowiskowe oraz izolacyjność ubioru z wartości PMV. Jednak jak już opisano w podrozdziale 1.1, rzeczywisty odsetek osób niezadowolonych można poznać z kwestionariuszy ankiet, ponieważ jeśli ankietowani określają środowisko jako ciepłe i gorące oraz chłodne i za zimne to świadczy o odczuciu dyskomfortu.

Od kilku dekad wzory na PMV oraz PPD są podstawą obliczeń dla komfortu cieplnego. Jednak od pierwszej dekady XXI wieku, zintensyfikowano prace w zakresie modelowania i badacze starają się zaproponować nowe modele (lub modyfikacje) określające komfort cieplny. W pierwszej kolejności w roku 2002 Humphreys & Nicol [14] zaproponowali wzór PMV o nomenklaturze PMV_{new} . W roku 2009 Yao i inni [106] stworzyli wzór o nazwie aPMV. Natomiast od drugiej dekady nastąpił bardzo szybki rozwój modeli opartych o wartość PMV jak np. PMV_{oo} przez Orosa & Oliviera [107], PMV_{nsr} przez Nguyen i współ. [108], natomiast w 2013 roku Buratti zaproponował PMV_{brv} [109]. W 2015 Ruiz & Correa [110] z Argentyny oraz Kim i współautorzy z Korei [111] swoje zmienione modele nazwali IZA oraz $AdapPMV$. W latach 2017 oraz 2019, Broday i inni [112] i ponownie Broday i inni [113], najpierw stworzyli PMV^* a następnie $PMV2$. Rok 2020 był rokiem, w którym aż dwóch autorów zaproponowało trzy zmienione modele o wartościach $PMV_{p,sv}$ [114], ePMV [115] oraz PMV_{new} [116]. Można zauważyć, że pomimo tego że PMV nie najlepiej przewiduje rzeczywiste głosy ludzi, to jednak w każdym nowym zaproponowanym wzorze jest jego bazą. Wszystkie wzory, które zostały zaprezentowane wyżej zostały zestawione z modelem oryginalnym, sprawdzając jakie będą różnice w obliczonej średniej oraz w odchyleniu standardowym przez Niza & Broday [117] dla trzech miast w Brazylii. Autorzy nie wskazali, który model jest lepszy ponieważ – jak zaznaczyli – te modele mogą być wykorzystane w sposób indywidualny do aktualnie panujących warunków, i dla każdego miasta wybrali po jednym alternatywnym wzorze, który charakteryzował się najniższą różnicą w średnim głosie ludzi.

Oprócz modelowania komfortu cieplnego Fanger, należy omówić koncepcję modelu adaptacyjnego komfortu cieplnego. Model adaptacyjny bierze pod uwagę wskazania behawioralne, fizjologiczne oraz psychologiczne. Pierwsza adaptacja behawioralna głównie dotyczy reakcji indywidualnych (poprzez np. zmianę ubrania na lżejsze, bądź cieplejsze w zależności od odczuwanych potrzeb), reakcji technicznych (samodzielnie włączanie lub wyłączanie klimatyzacji bądź ogrzewania itp.) oraz reakcji kulturowych. Druga adaptacja jest związana z cechami fizjologicznymi. Dzieli się ją na

adaptację genetyczną (skłonności dziedziczne od przodków) oraz na fizjologię człowieka (nagła reakcja organizmu na zmieniające się warunki poprzez pocenie się czy odczuwanie drżenia). Trzecią i ostatnią adaptacją to warunki psychologiczne. Ta adaptacja skupia się na pamięci termicznej umysłu ludzkiego [118]. Model adaptacyjny może się od siebie różnić w zależności od wybranej procedury analitycznej, tak jak potwierdzają to autorzy w swoich badaniach [119], którzy stworzyli australijski model adaptacyjny, tak aby polepszyć stan budowlany domów. Interesujące badania opisali Forcada i in. [120], którzy skupili się na adaptacji osób starszych mieszkających w domach opieki. Autorzy wskazali, iż osoby starsze szybciej dostosowują się do pomieszczeń wentylowanych naturalnie, niż w pomieszczeniach posiadających klimatyzację. Co więcej zaznaczono, że mieszkańcy wolą wyższe temperatury, niż osoby pracujące w takich miejscach. W Chinach w mieście Shaoxing, Yue i Zhongqing [121] przebadali 187 osób (172 mieszkania) otrzymując 2400 kwestionariuszy ankiet. We wnioskach autorzy opisali, że ubiór ma znaczenie pod względem adaptacji behawioralnej, ale dla okresu jesienno – zimowego, niż dla okresu letniego. Dodatkowo adaptacja ludzi zależna była od okresów przejściowych (dotyczy to wiosny i jesieni), ponieważ było to uzależnione od poprzedniej pory roku – gorącego lata lub mroźnej zimy – od której miał zależeć poziom adaptacji do zmian parametrów otoczenia. W Etiopii w Jimma Town, Yadeta i in. [122] przeprowadzili analizę behawioralną mieszkańców w porze suchej i w porze deszczowej. Mieszkańcy nie posiadali klimatyzatorów czy ogrzewaczy elektrycznych, a w razie potrzeby ogrzewali swoje domy odpadami z biomasy. Badania wykazały, że mieszkańcy w porze suchej wybierali lżejsze ubrania oraz nie otwierali okien jak i nie wykonywali ciężkich prac. Natomiast dla pory deszczowej adaptacja behawioralna wykazała noszenie cięższego ubrania (średnia izolacyjność ubioru wynosiła 0,78 clo), otwierania okien, wykonywania cięższej pracy oraz w sposób adaptacyjny ogrzewali domy za pomocą biomasy przez blisko 81,8% badanych osób. Jak można zauważyć, pomimo zmieniającego się klimatu, człowiek może osiągnąć komfort cieplny poprzez adaptację do panujących warunków, co świadczy jak istotna jest indywidualność jednostki.

Poza tradycyjnym modelowaniem komfortu cieplnego zauważyć można rosnący trend wykorzystywania sztucznej inteligencji (AI¹⁸) do przewidywania wrażeń termicznych PMV i TSV, w szczególności przy stosowaniu sztucznej sieci neuronowej

¹⁸ Artificial Intelligence (ang.)

(ANN)¹⁹ czy nauczania maszynowego (ML)²⁰ itp. Pierwszym przykładem będzie praca Cho i in. [123], w której autorzy zaproponowali opaskę na nadgarstek opartą na sztucznej inteligencji, która w 93,9% przewidywała wrażenia termiczne ludzi. Zadaniem AI było sterowanie tak systemem HVAC²¹, aby skierować napływ powietrza na osobę, u której zauważono zmianę termiczną. Dodatkowym atutem jaką wskazali autorzy są również korzyści związane z oszczędnością energii. W pracy [124] przedstawiono analizę zaawansowanych technik AI zarządzających energią w budynku (BEMS²²) oraz komfortem cieplnym. Autorzy zaznaczają, że w wielu badaniach systemy sterowania wykorzystują sztuczne sieci neuronowe, których celem jest nauczanie się i klasyfikacja pozyskanych danych, aby opisać komfort cieplny wraz z przewidzeniem wskaźnika PMV. Inną wskazaną metodą AI jest rozmyta logika (FL²³), która jak w/w również skupia się na najwyższym poziomie zadowolenia termicznego ludzi, przy jednoczesnym zachowaniu efektywności energetycznej. FL jak ANN wykorzystuje wskaźnik PMV. Jednak należy dodać, że aby te systemy poprawie przewidywały wrażenia cieplne przy racjonalnym wykorzystywaniu energii muszą posiadać szeroki zakres rzeczywistych danych. Kolejna propozycja została przedstawiona przez Zhao i in. [125], którzy oparli się o system internetu rzeczy (IoT²⁴). Urządzenia modułowe zlokalizowane w różnych częściach budynku, wsparte systemem IoT, realizujące szereg potrzebnych operacji, ostatecznie przewidując zużycie energii w połączeniu z parametrami środowiskowymi, mającymi wpływ na komfort cieplny. Okazało się, że ten system polepszył komfort ludzi i zaoszczędził energię w porównaniu do tradycyjnej formy kontroli parametrów wewnętrznych. W innym badaniu wykorzystano model AI, który zapewnia redukcję temperatury poprzez chłodzenie mgłą²⁵ [126]. W najgorszym przetestowanym skrajnym środowisku (45°C, 90% i 1 m/s) scenariusz założył redukcję temperatury o 8,92%, ale przy zwiększeniu prędkości powietrza widoczny był spadek efektywności chłodzącej mgły. Palladino i in. [127] zaproponowali algorytm sieci neuronowej, która zapewniła dokładność w przewidywaniu PMV w lecie w zakresie temperatur 21 – 28°C oraz przy wilgotności względnej między 30 – 75% przy średnim błędzie ANN 0,10 – 0,20. Badania,

¹⁹ Artificial Neural Networks (ang.)

²⁰ Learning Machine (ang.)

²¹ Heating, ventilation and air conditioning (ang.)

²² Building Energy Management System (ang.)

²³ Fuzzy Logic (ang.)

²⁴ Internet of Things (ang.)

²⁵ Fog cooling (ang.)

w których również oparto się na sztucznej sieci neuronowej przewidującej komfort cieplny w budynkach biurowych dla sezonu zimowego i letniego [128] był zakresem węższym niż przy modelu ANN biorącego pod uwagę cechy behawioralne. Metoda nauczania maszynowego (ML) [129] ma na celu kreowanie indywidualnego podejścia do osoby względem jej odczuć cieplnych. W badaniach Chai i in. [130] zastosowano algorytm ML do przewidywania odczuć cieplnych dla 5512 danych otrzymanych z czternastu miast w Chinach. Do modelu ML uwzględniono dane wyjściowe jak parametry środowiskowe i osobiste itp. Wykazano że dobrany algorytm nauczania maszynowego wykazywał dużo mniejszy błąd w przewidywaniu wrażeń cieplnych ludzi, niż w przypadku tradycyjnego modelu. Podobne wnioski zostały wysnute przez [131] oraz przez [132], gdzie algorytm ML polepszył jakość powietrza poprzez spadek zawartości dwutlenku węgla.

Obecnie szybki rozwój technologii sztucznej inteligencji w dziedzinie komfortu cieplnego umożliwia precyzyjniejsze przewidywanie wrażeń cieplnych ludzi poprzez łączenie ze sobą równocześnie wielu metod (nauczanie maszynowe, sztuczna sieć neuronowa, Internet rzeczy itp.), tak aby dostosowywać parametry HVAC na indywidualne potrzeby danej osoby (przy jednoczesnym dbaniu o odpowiednio niskie zużycie energii).

Rozdział III

Wnioski z przeglądu literatury

Na podstawie dostępnej literatury i dokonanej analizy, wysnuto poniższe wnioski:

- W oparciu o doniesienia literaturowe można stwierdzić, że noszenie masek ochronnych wpływa na subiektywne odczucia ludzi (w tym dotyczące komfortu cieplnego). Badania te są mało liczne, co wynika z krótkiego czasu ich wykonania (obejmują generalnie okres od roku 2020, kiedy na świecie rozprzestrzenił się COVID-19), podczas gdy badania komfortu ludzi bez masek dotyczą okresu ponad pół wieku. Ponadto autorzy prac skupiali się głównie na analizie zachowań ciała ludzkiego i zmianach w nim zachodzących podczas noszenia masek w spoczynku oraz wykonując różne czynności fizyczne jak spacer z różną prędkością, bieganie czy wchodzenie po schodach poprzez sprawdzanie funkcji życiowych jak zmiana pulsu czy zmiany temperatury ciała w różnych jego miejscach (kark, noga, plecy itp.) z uwzględnieniem masek na twarzy, natomiast stosunkowo niewiele jest prac ukierunkowanych konkretnie na zagadnienie komfortu cieplnego i subiektywnych odczuć respondentów co do środowiska wewnętrznego.
- Prace, które dotyczą badań komfortu cieplnego podczas noszenia masek często nie zawierają dogłębnej i szczegółowej analizy tego zjawiska, a dotyczą jedynie wybranych jego aspektów. Ponadto badania komfortu cieplnego prowadzone w komorach klimatycznych i salach odbywały się zwykle dla niewielkiej grupy osób w stosunkowo wąskich zakresach zmienności parametrów mikroklimatu; brak jest badań, które w sposób kompleksowy uwzględniałyby wpływ noszenia masek (i ich rodzaj) na ocenę środowiska wewnętrznego przez ankietowanych w szerokim zakresie zmienności temperatury i wilgotności względnej powietrza, szczególnie osób mieszkających w Europie Środkowo - Wschodniej (większość badań dotyczy krajów Azji).
- Nie odnaleziono w literaturze badań komfortu cieplnego prowadzonych wśród osób w maskach w pomieszczeniach oraz w komorze klimatycznej, przy zastosowaniu tej samej metodologii – dla osób z tego samego regionu geograficznego i kulturowego. Poza tym relatywnie, niewiele opublikowanych zostało prac dotyczących badań w pomieszczeniach, ponieważ większość z nich wykonano w komorach klimatycznych.

- Brak jest modelu komfortu cieplnego lub jego modyfikacji, która skutecznie przewidywałaby odczucia cieplne użytkowników pomieszczeń noszących maski w funkcji parametrów mikroklimatu (przy uwzględnieniu w nim faktu noszenia maski).

Rozdział IV

Cele i tezy pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnej literatury oraz opracowań naukowych wyznaczono następujące cele:

1. Wykonanie badań subiektywnych odczuć respondentów w dwóch rodzajach masek (cieńszych i grubszych) dla grup ludzi w warunkach rzeczywistych w pomieszczeniach i w komorze klimatycznej z uwzględnieniem danych dotyczących BMI i oporu cieplnego ubrań.
2. Weryfikacja modelu komfortu cieplnego dla badań w warunkach pandemicznych (przy zastosowaniu ochrony indywidualnej w postaci masek).
3. Modyfikacja modelu komfortu cieplnego uwzględniająca fakt noszenia masek przez użytkowników pomieszczeń.

Przyjęto następującej tezy pracy:

1. Fakt noszenia masek ochronnych wpływa na subiektywne wrażenia cieplne użytkowników pomieszczeń.
2. Wskaźniki PMV i PPD nie przewidują w sposób prawidłowy rzeczywistych odczuć cieplnych użytkowników pomieszczeń, którzy noszą maski ochronne.
3. Możliwe jest opracowanie modyfikacji modelu Fangea (tj. wyznaczenie zmodyfikowanych wartości wskaźników PMV i PPD) w celu poprawy dokładności przewidywania wskaźników PMV i PPD dla grupy użytkowników pomieszczeń, noszących maski ochronne.

Rozdział V

Badania eksperymentalne

5.1 Przedmiot i zakres badań

Badania komfortu cieplnego przy użyciu masek ochronnych prowadzone były w stolicy województwa Świętokrzyskiego – Kielcach, gdzie swoją lokalizację ma Politechnika Świętokrzyska (północno – wschodnia część miasta). Badania obejmowały cztery budynki (w tym trzy wybudowane w latach sześćdziesiątych, a zmodernizowanych w 2010 roku oraz jedna aula główna – wybudowana w roku 2010) i jeden budynek Energis z roku 2012. Czas realizacji założeń badawczych trwał od czerwca 2021 roku do stycznia 2023 roku. Największą liczbę przeprowadzonych badań (58%) zrealizowano w budynku Energis, w drugiej kolejności w budynku „A” (27%), w trzeciej kolejności był to budynek „C” (11%), natomiast poniżej 5% prowadzonych badań przeprowadzono w budynku „B” i w auli głównej.

5.1.1 Budynek Energis – Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej

Budynek Energis to obiekt inteligentny, którego budowa rozpoczęła się w 2010 roku a zakończyła pod koniec 2012 roku. Energis posiada 22 sale o charakterze dydaktyczno – laboratoryjnym, 4 laboratoria wyposażone w specjalistyczną aparaturę inżynierską, ponadto zawiera pomieszczenia administracyjne, sanitarne oraz pokoje kadry naukowej, jak i aule wykładowe. Posiada 5 kondygnacji – parter, I, II, III piętro oraz IV piętro, na którym znajduje się aula wykładowa na 200 miejsc. Poniżej parteru znajdują się dwa poziomy piwniczne. Energis został wyposażony w instalacje odnawialnych źródeł energii (OZE) takie jak pompy ciepła, a także panele fotowoltaiczne, solary i turbinę wiatrową – zainstalowane na dachu budynku. Za jego „inteligencję” odpowiada system Inteligentnego Zarządzania Budynkiem (BMS²⁶), który monitoruje produkcję energii z wyżej wspomnianych systemów OZE oraz jej zużycie na potrzeby własne budynku. Dodatkowo system ten nadzoruje natężenie oświetlenia w salach, w korytarzach oraz lamp znajdujących się na zewnętrznych elewacjach budynku przypadający na godziny nocne, a także kontrolę dostępu do pomieszczeń za pomocą kart magnetycznych. Nie można również zapomnieć o wymianie powietrza, która zachodzi poprzez wentylację

²⁶ BMS – Building Management System (ang.)

mechaniczną wraz z odzyskiem ciepła. W części sal dydaktyczno – laboratoryjnych i pomieszczeń administracyjnych i sanitarnych znajdują się grzejniki płytowe, natomiast większość powierzchni użytkowej budynku pokrywa ogrzewanie podłogowe. Nie mniej ważnym elementem było zastosowanie wysokiej klasy materiałów budowlanych, z których została stworzona elewacja Energisa, zapewniająca niewielką stratę ciepłą przegrody. Zdecydowaną zaletą tego obiektu są duże przeszklenia, które przepuszczają naturalne światło do wnętrza sal, pomieszczeń czy korytarzy dla większego komfortu studentów oraz ludzi pracujących. Zdjęcia budynku Energis zestawiono na Fotografii 1 oraz wymiary budynku w Tabeli 2.



a)

b)

Fot. 1. Budynek Energis, Kielce, Politechnika Świętokrzyska: a) widok od strony południowo – zachodniej, b) widok od strony północno – zachodniej

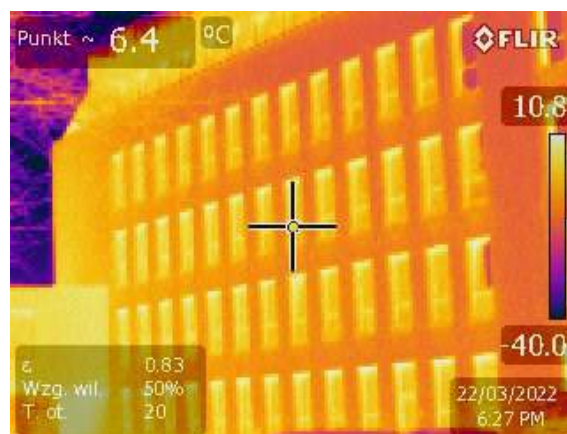
Tabela 2. Wybrane parametry obiektu Energis

Powierzchnia całkowita	6288,92	m ²
Powierzchnia użytkowa	5121,24	m ²
Kubatura obiektu	23366,51	m ³
Całkowita wysokość	19,95	m

Poniżej przedstawiono termogramy budynku Energis na zewnątrz od strony południowo – wschodniej i północno – zachodniej na Fotografii 2 oraz wewnątrz na Fotografii 3. Badania termowizyjne zostały wykonane przy pomocy urządzenia Flix E30bx w celu weryfikacji miejsc ewentualnych strat ciepła.



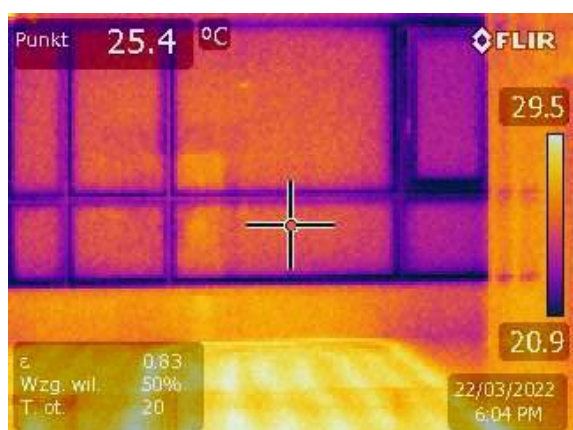
a)



b)

Fot. 2. Termogramy zewnętrznej elewacji Energis podczas okresu zimowego dla a) widok od strony północno – zachodniej, b) widok od strony południowo – wschodniej

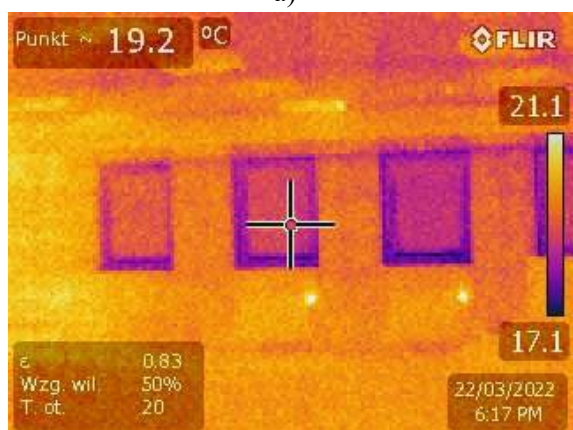
Jak można zauważyć na powyższych termogramach, stan techniczny izolacji termicznej jest poprawny. Zostało to potwierdzone w badaniach przedstawionych we własnych opracowaniach [133, 134].



a)



b)



c)



d)

Fot. 3. Termogramy z wnętrza budynku Energis dla okresu zimowego: a) korytarz II piętro, b)
c) d) sale dydaktyczne

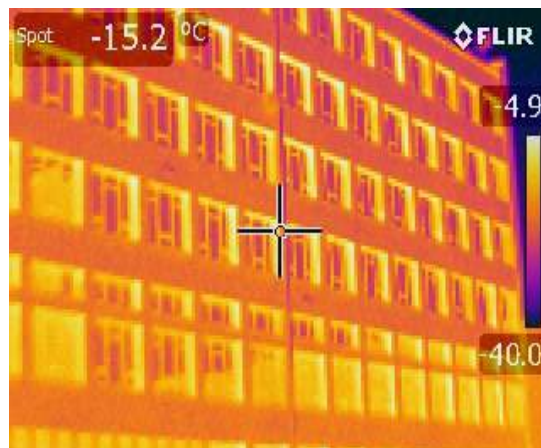
5.1.2 Budynki Wydziałów Budownictwa i Architektury A, Mechaniki i Budowy Maszyn B, Zarządzania i Modelowania Komputerowego C oraz Aula Główna

Badania prowadzono również w budynku A, czyli na Wydziale Budownictwa i Architektury, w trzeciej kolejności był to budynek C Wydziału Zarządzania i Modelowania Komputerowego, a na ostatnich miejscach pod względem wykonanych badań to były sale w budynku B, należącym do Wydziału Mechaniki i Budowy Maszyn oraz w auli wykładowej. Zdjęcia powyższych obiektów zostały przedstawione na Fotografii 4.

a)



b)





Fot. 4. Kompleks budynków dydaktycznych Politechniki Świętokrzyskiej (zdjęcia wraz z termogramami): a) A – Wydział Budownictwa i Architektury; b) B – Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn; c) C – Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego oraz d) Aula Główna

Budynki A, B, C zostały wybudowane w latach 60 – tych XX wieku, a modernizacji doczekały się w pierwszej i drugiej dekadzie XXI wieku. Zmiany polegały na remoncie wewnątrz pomieszczeń edukacyjnych oraz na ociepleniu elewacji, a także modernizacji systemu ogrzewania. W budynkach znajduje się wentylacja naturalna, a w laboratoriach odciągi miejscowe. Natomiast budynek auli głównej został wybudowany w 2010 roku. Posiada cztery aule mogące pomieścić łącznie 600 ludzi. W pomieszczeniach znajduje się wentylacja mechaniczna. Fotografia 4 przedstawia wygląd budynków oraz zewnętrzne termogramy tych budynków. Jak można zauważyć budynki zostały dobrze ocieplone.

5.1.3 Komora klimatyczna

Komora klimatyczna znajduje się w hali laboratoryjnej budynku A. Składa się ona z dwóch komór. Pierwsza, która jest większa ma wymiary użytkowe równe $2,70 \times 1,80 \times 2,30 \text{ m}^3$ i zakres temperatury jaki można ustalić wynosi od -25°C do $\pm +80^\circ\text{C}$, natomiast dla drugiej mniejszej komory, powierzchnia użytkowa wynosi $2,25 \times 1,80 \times 2,30 \text{ m}^3$,

a możliwość ustawienia temperatury wynosi od $+5^{\circ}\text{C}$ do $\pm +50^{\circ}\text{C}$ [75, 76]. Opisywane komory są od siebie oddzielone i każda z nich posiada swój wentylator. Lewą i prawą część komory zaprezentowano na Fotografii 5.



a)



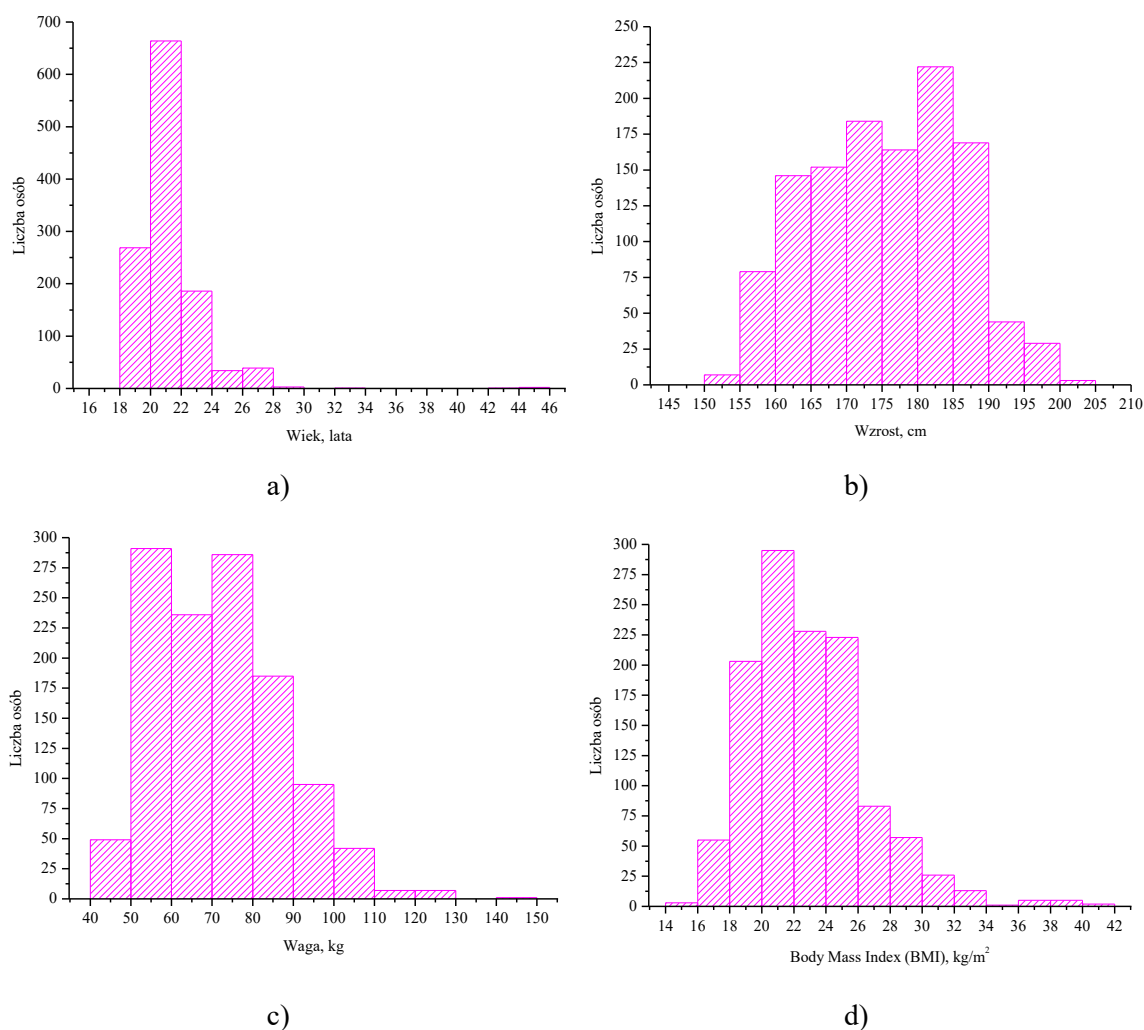
b)

Fot. 5. Komora klimatyczna: a) lewa część komory; b) prawa część komory

5.2 Metodyka badań

Badania w salach prowadzone były od czerwca 2021 roku do stycznia 2023 roku, natomiast badania w komorze klimatycznej obejmowały 2021 rok. W salach uzyskano łącznie 1298 kwestionariuszy ankiet, zaś w komorze klimatycznej 960 ankiet (wypełnianych przez ośmioosobową grupę). W obu przypadkach osoby nosiły maski ochronne.

Nie wszystkie kwestionariusze z sal mogły zostać przeanalizowane ze względu na zaznaczony przez studentów wcześniejszy wysiłek fizyczny lub chorobę (proces odrzucenia ankiet został omówiony w podrozdziale 5.2.3). W związku z tym, do analizy przyjęto 1199 anonimowych kwestionariuszy ankiet, które zostały w pełny sposób wypełnione oraz dotyczyły osób zdrowych, nie wykonujących wcześniej intensywnych ćwiczeń. Na Rysunku 1 zaprezentowano histogram parametrów, charakteryzujących osoby biorące udział w pomiarach.



Rys. 1. Metryka danych dotyczących a) wieku, b) wzrostu, c) wagi oraz d) indeksu BMI

Maksymalny wiek badanych osób wynosił 45 lat, natomiast minimalny wiek to 18 lat (średnia wieku – 20,8 lat, odchylenie standardowe 2,08 lat). Pierwszą najliczniejszą grupą uczestniczącą w procesie badawczym była w wieku od 20 – 21 lat, drugą była w wieku od 18 – 19 lat, a trzecią od 22 – 23 lat, stanowiąc łącznie 93,33% wszystkich osób. W badanej grupie najczęściej osoby określały swój wzrost pomiędzy zakresem 160 a 189 cm (86,49% całości studentów). Najliczniejszym wyborem studentów był wzrost pomiędzy 170 a 174 cm (15,35% osób) oraz 180 a 184 cm (18,52% osób). Poniżej 160 cm wzrostu znalazło się zaledwie 7,17% osób, a powyżej 190 cm wzrostu – 6,34% studentów. Średni wzrost to 174,7 cm, przy odchyleniu standardowym 10,3 cm. Najczęstsza deklarowana waga przez studentów znajdowała się w przedziale między 50 – 59 kg (24,27% osób), druga w kolejności w zakresie od 70 do 79 kg (23,85% studentów). Trzecia i czwarta deklaracja wagi dotyczyła zakresów od 60 do 69 kg oraz od 80 do 89 kg, stanowiąc 35,11% całości grupy. Pozostała część grupy deklarowała wagę poniżej 50 kg oraz powyżej 90 kg.

Średnia waga to 70,5 kg, przy odchyleniu standardowym 15,5 kg. Biorąc pod uwagę dane wzrostu i wagi, otrzymano wskaźnik Body Mass Index (BMI – przedstawiany jako iloraz masy do kwadratu wysokości kg/m^2), który wskazuje czy dana osoba ma niedowagę, nadwagę lub czy jego budowa ciała ma wartość prawidłową [135]. Okazuje się, że 70,96% badanych studentów, posiadała wartość BMI jako prawidłową. Natomiast, pozostała część grupy od zakresu BMI wynoszącego 15 – 18,49 kg/m^2 świadczyła o wygłodzeniu po niedowagę, a powyżej 25 kg/m^2 informowało o nadwadze, I i II stopniu otyłości oraz o otyłości skrajnej (podsumowując łącznie z tym problemem za niskiego lub zbyt wysokiego BMI borykało się 29,04% osób). Mimo to należy podkreślić, że ok. 70% grupy nie miała problemów ze swoją wagą. Średnie BMI to 22,9 kg/m^2 , a odchylenie standardowe 3,7 kg/m^2 .

5.2.1 Procedura badawcza

Badania realizowano przy pomocy urządzenia do mierzenia parametrów mikroklimatu Testo 400 wraz z sondami oraz anonimowych kwestionariuszy ankiet, umożliwiających poznanie subiektywnych odczuć ludzi. W przypadku badań realizowanych w aulach i salach ćwiczeniowych w pierwszej kolejności po rozpoczęciu zajęć urządzenie Testo 400 lokalizowano w centralnej części sali (jak w [136]) na wysokości około 1,1 m tak, jak w badaniach autorów prac [42, 65, 78, 90, 93, 95–97, 137–141]. Sondy miernika znajdowały się na poziomie osób siedzących. Po złożeniu wszystkich części urządzenia tj. sond, włączano miernik, który zapisywał wartości mierzonych parametrów. W kolejnym kroku, rozdawano ankietę studentom wraz z objaśnieniem celu i procedury badania. Należy dodać, że badane osoby nosiły podczas badania maski cienkie lub grube. Czas prowadzonych pomiarów miernikiem Testo 400 wynosił powyżej 30 minut (co przyjęto w oparciu o badania innych autorów [74, 79, 80, 93, 142, 143]). W związku z tym, studenci mieli czas na to, aby ustabilizować swój oddech po przyjściu na zajęcia oraz swoje tempo metabolizmu w zalecany czas 10 minut (według [64]). Po upływie 30 minut lub więcej, anonimowe kwestionariusze ankiet były uzupełniane przez studentów, a następnie zbierane do analizy. Pomiary oraz moment uzupełniania kwestionariuszy był dokumentowany poprzez wykonanie zdjęć. Poniżej zaprezentowano stację pomiarową oraz sale ze studentami podczas prowadzonych badań na Fotografii 6.



Fot. 6. Przykładowe zdjęcia badań z różnych sal i aul wykładowych Politechniki Świętokrzyskiej

Procedura badawcza dla komory klimatycznej miała podobny charakter do tej, którą wykorzystywano w salach. Do tego eksperymentu zgłosiło się 8 osób (tak – jak w przypadku np. badań [82]), którzy w komorze klimatycznej mieli ocenić swój komfort cieplny w maseczce cienkiej, a następnie w maseczce grubej. Temperatura powietrza w komorze wynosiła od około 19 do około 28°C (10 wartości temperatur) przy wilgotności względnej 20%, 45% oraz 70% (trzy wartości). Co więcej, badania zostały podzielone sezonowo, czyli ankietowani mieli na sobie ubiór letni lub zimowy. Ustalono, że dla badanych osób opór cieplny ubioru zimowego miał wynosić 0,80 clo, natomiast dla ubioru

letniego 0,50 clo. Badane osoby uzupełniały trzy anonimowe kwestionariusze ankiety: bez maseczki, w maseczce cienkiej oraz w maseczce grubej. Do wyników badań bez noszonej maski odniesiono się w badaniach zawartych w doktoracie [144].

Badania w salach i komorze klimatycznej, oprócz zastosowania miernika Testo 400 oraz ankiet, opierały się na wykorzystaniu maseczek cienkich i grubych jako środka ochrony indywidualnej. Maseczki „cienkie” to maseczki jednorazowego użytku, natomiast maseczki „grube” to te, które były wykonane z tkaniny bawełnianej. Powołując się na badania [62, 145], w których określono izolacyjność cieplną używanych masek przez ludzi przyjęto, że maski jednorazowego użytku (medyczna maska) miała opór cieplny na poziomie 0,111 clo, natomiast maska bawełniana 0,098 clo. Należy dodać również zakres grubości maski cienkiej wynoszący od 0,99 – 1,50 mm [64, 77] oraz dla maski grubej, materiałowej: 2,47 mm [77]. Poniżej na Fotografii 7, zaprezentowano przykład masek cienkiej chirurgicznej i grubej materiałowej bawełnianej, które wykorzystywano do badań.



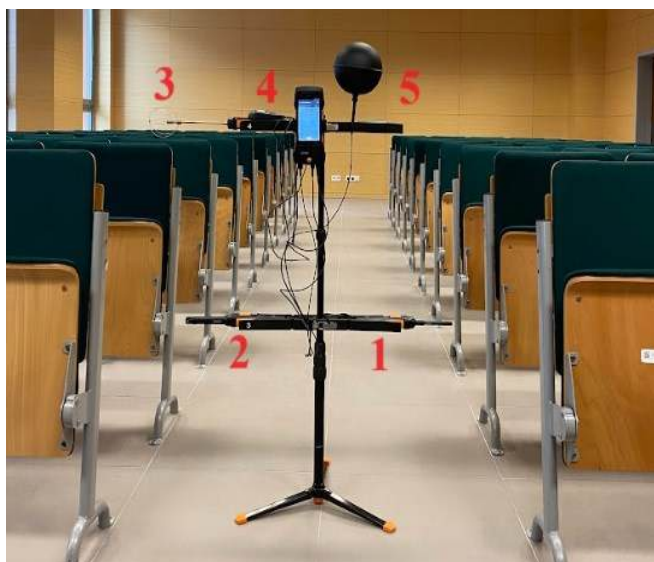
a)

b)

Fot. 7. Przykład masek użytych podczas badań: a) maska cienka chirurgiczna, b) maska gruba bawełniana

5.2.2 Miernik mikroklimatu

Do prowadzenia pomiarów środowiskowych wykorzystano niemieckiej produkcji miernik Testo 400 wraz z sondami, który umożliwiał rejestrowanie takich parametrów jak temperatura powietrza, wilgotność względna, zawartość dwutlenku węgla, prędkość przepływu powietrza, natężenie oświetlenia oraz temperaturę czarnej kuli. Poniżej na Fotografii 8 zaprezentowano miernik wraz z sondami.



Fot. 8. Stacja pomiarowa wraz z sondami Testo 400

Sonda nr 1 rejestrowała temperaturę powietrza oraz wilgotność względną, sonda nr 2 rejestrowała zawartość dwutlenku węgla, sonda 3 odpowiadała za pomiar prędkości przepływu powietrza, a sonda 4 za natężenie oświetlenia, natomiast ostatnia o numerze 5 określała temperaturę czarnej kuli. Każda z sond ma również podaną przez producenta dokładność [146], która została opisana w Tabeli 3.

Tabela 3. Dokładność sond na podstawie danych technicznych producenta urządzenia Testo 400
[146]

L.p.	Nazwa sondy	Dokładność	Jednostka
1	Temperatura powietrza	$\pm 0,3$	$^{\circ}\text{C}$
	Wilgotność względna	$\pm 0,6\%$ wartości zmierzonej $+0,7\%$	%
2	Stężenie dwutlenku węgla	± 50 ppm $+3\%$ wartości zmierzonej	ppm
3	Prędkość powietrza	$\pm 0,3$ m/s $+4\%$ wartości zmierzonej	m/s
4	Natężenie oświetlenia	6% wartości zmierzonej	lux
5	Czarna kula	$\pm 1,5$	$^{\circ}\text{C}$

5.2.3 Ankieta użytkowników pomieszczeń

Do oceny komfortu cieplnego wykorzystano 7 – stopniową skalę, w oparciu o normę ISO 7730 oraz prace Fanger [10, 31]. W skali tej klasyfikuje się +3 jako – zbyt gorąco, +2 – za ciepło, +1 – przyjemnie ciepło, 0 – komfortowo/ neutralnie, -1 – przyjemnie chłodno, -2 – za chłodno, -3 – zbyt zimno (to pytanie nr 1 w kwestionariuszu). W drugim pytaniu, dotyczącym stopnia akceptowalności temperatury, skala zawierała się od wartości +2 – komfortowo, +1 – akceptowalna, czyli jeszcze do przyjęcia, -1 – nieprzyjemna czyli już nie do przyjęcia oraz -2 – zdecydowanie nieprzyjemna. W trzecim pytaniu, dotyczącym preferencji temperaturowych (w jakim stopniu należałoby zmienić temperaturę w pomieszczeniu), zawarto skalę od +2 – zdecydowanie cieplej, +1 – cieplej, 0 – bez zmian, -1 – chłodniej, -2 – zdecydowanie chłodniej. W czwartym pytaniu, dotyczącym oceny wilgotności, znalazła się skala 5 stopniowa, tylko że z innym znaczeniem, dla +2 – zbyt wilgotno, +1 – dość wilgotno, 0 – przyjemnie, -1 – dość sucho, -2 – zbyt sucho. Pytanie piąte dotyczyło preferencji wilgotności, a możliwe odpowiedzi obejmowały wartości +1 – bardziej wilgotne, 0 – bez zmian, -1 – bardziej suche.

Następne pytania 6, 7, 9, 10, skupiały się na ocenie oświetlenia w badanym pomieszczeniu, produktywności studentów, jakości powietrza oraz ogólnego samopoczucia w badanych salach. W pytaniu 8 oraz 11 pytano studentów o ich aktywność fizyczną oraz o stan zdrowia. Te dwa pytania były istotne, ponieważ decydowały o odrzuceniu takiego anonimowego kwestionariusza ankiety. Osoba chora lub przeziębiona ma zaburzoną ocenę temperatury oraz innych parametrów (np. w przypadku, gdy odczuwa dreszcze lub ma nieżyt nosa). Aktywność fizyczna również wpływa na ocenę parametrów

mikroklimatu, ponieważ takiej osobie pod wpływem wysiłku jest nadmiernie ciepło, co skutkuje tym, że zawyża swoją percepcję odczuwania otaczającego go środowiska. Biorąc pod uwagę fakt, że badania trwały więcej niż 30 minut, rzadko zdarzało się, że studenci określali informację o umiarkowanym lub intensywnym wysiłku fizycznym. Natomiast jeżeli tak się stało i zaznaczyli umiarkowany lub intensywny wysiłek to raczej mogło to wynikać z niezrozumienia pytania lub braku uważnego słuchania przy omawianiu pytań z ankiety. Pytania 12 i 13 skupiały się głównie na pojawieniu się jakichkolwiek dolegliwości po przebywaniu w badanym pomieszczeniu, bądź pojawieniu się innego odczuwanego dyskomfortu. Pytanie 14 zawierało informację o noszonym ubiorze. Na samym końcu znalazła się metryczka z danymi dotyczącymi płci, wzrostu [cm], wieku oraz wagi [kg], które były niezbędne do określenia indeksu BMI. Ankieta została przedstawiona poniżej.

1. Jak oceniasz swoje odczucie cieplne w tej chwili?

- ☐ zbyt gorąco (+3)
- ☐ za ciepło (+2)
- ☐ przyjemnie ciepło (+1)
- ☐ komfortowo (0)
- ☐ przyjemnie chłodno (-1)
- ☐ za chłodno (-2)
- ☐ zbyt zimno (-3)

2. Jak oceniasz aktualną temperaturę w tym pomieszczeniu?

- ☐ komfortowa (+2)
- ☐ akceptowalna (czyli jeszcze do przyjęcia) (+1)
- ☐ nieprzyjemna (czyli już nie do przyjęcia) (-1)
- ☐ zdecydowanie nieprzyjemna (-2)

3. Chciałbym/Chciałabym, aby teraz w tym pomieszczeniu było:

- ☐ zdecydowanie cieplej (+2)
- ☐ cieplej (+1)
- ☐ bez zmian (0)
- ☐ chłodniej (-1)
- ☐ zdecydowanie chłodniej (-2)

4. Jak oceniasz wilgotność powietrza w tej chwili?

- ☐ zbyt wilgotno (+2)
- ☐ dość wilgotno (+1)
- ☐ przyjemnie (0)
- ☐ dość sucho (-1)
- ☐ zbyt sucho (-2)

5. Chciałbym/Chciałabym, aby teraz powietrze w tym pomieszczeniu było:

- ☐ bardziej wilgotne (+1)
- ☐ bez zmian (0)
- ☐ bardziej suche (-1)

6. Jak oceniasz oświetlenie w tym pomieszczeniu?

- ☐ zbyt mocne (+1)
- ☐ odpowiednie (0)
- ☐ zbyt słabe (-1)

7. Jak oceniasz swoją aktualną produktywność (zdolność do przyswajania wiedzy)?

- ☐ wysoka (czyli lepsza niż zwykle) (+1)
- ☐ normalna (czyli taka jak zwykle) (0)
- ☐ słaba (czyli gorsza niż zwykle) (-1)

8. Jaka była Twoja aktywność fizyczna w czasie 30 min przed przyjściem do tego pomieszczenia?

- ☐ intensywny wysiłek fizyczny (np. dźwiganie ciężkich przedmiotów, aerobik, szybki bieg) (-2)
- ☐ umiarkowany wysiłek fizyczny (np. noszenie lżejszych ciężarów, jazda rowerem, szybki marsz) (-1)
- ☐ spacer, który trwał co najmniej 10 minut (0)
- ☐ siedzenie (+1)

9. Jak oceniasz jakość powietrza w tym pomieszczeniu?

- ☐ bardzo dobra (+2)
☐ dobra (+1)
☐ ani dobra ani zła (0)
☐ zła (-1)
☐ bardzo zła (-2)

10. Jak ogólnie czujesz się w tym pomieszczeniu:

- ☐ bardzo dobrze (+2)
☐ dobrze (+1)
☐ obojętnie (0)
☐ źle (-1)
☐ bardzo źle (-2)

11. Czy aktualnie jesteś przeziębiony/chory?

☐ tak

☐ nie

12. Czy po przebywaniu w tym pomieszczeniu pojawiły się u Ciebie jakieś dolegliwości? Jeśli tak, to jakie?.....

13. Czy w tym pomieszczeniu są inne źródła dyskomfortu (np. hałas, przeciąg, itp.)? Jeśli tak, to jakie?.....

14. Proszę zaznaczyć swoje aktualne ubranie:

- a) ☐ podkoszulek bez rękawów ☐ podkoszulek z krótkim rękawem
☐ podkoszulek z długim rękawem
- b) ☐ rajstopy cienkie ☐ rajstopy grube
☐ skarpety cienkie ☐ skarpety grube
- c) ☐ koszula cienka z krótkim rękawem ☐ koszula cienka z długim rękawem
☐ koszula gruba z krótkim rękawem ☐ koszula gruba z długim rękawem
☐ bluza cienka ☐ bluza gruba
☐ sweter/golf cienki ☐ sweter/golf gruby
☐ marynarka cienka ☐ marynarka gruba
☐ kurtka/płaszcz cienki ☐ kurtka/płaszcz gruby
- d) ☐ spodnie cienkie ☐ spodnie grube
☐ krótkie spodenki ☐ spódnica gruba
☐ spódnica cienka ☐ sukienka gruba
☐ sukienka cienka
- e) ☐ sandały/japonki ☐ trampki/tenisówki
☐ półbuty/pantofle ☐ kozaki krótkie/buty do kostek
☐ kozaki długie

Metryczka:

Płeć:	☐ kobieta	☐ mężczyzna	Wzrost [cm]:
Wiek w latach ukończonych:			Waga [kg]:

Anonimowy kwestionariusz ankiety dla komory klimatycznej zawierał cztery pytania oceniające wrażenia termiczne oraz pytanie o ogólne samopoczucie. Pytanie 1 dotyczyło oceny odczuć cieplnych w skali od +3 do -3, pytanie 2 o akceptowalność temperatury, pytanie 3 dotyczyło preferencji i chęci zmiany temperatury. Pytanie ostatnie 4 związane było z oceną swojego ogólnego samopoczucia według skali od +2 do -2. W ankiecie nie znalazło się pytanie o ubiór, ponieważ jak już wcześniej wspomniano w podrozdziale 5.2.1, opór cieplny ubioru letniego wynosił 0,50 clo, zaś dla ubioru zimowego 0,80 clo. Ankieta została przedstawiona poniżej.

Cienka maska

1. **Jak oceniasz swoje odczucie ciepłe w tej chwili?**
 - ☐ zbyt gorąco (+3)
 - ☐ za ciepło (+2)
 - ☐ przyjemnie ciepło (+1)
 - ☐ komfortowo (0)
 - ☐ przyjemnie chłodno (-1)
 - ☐ za chłodno (-2)
 - ☐ zbyt zimno (-3)
2. **Jak odczuwasz aktualną temperaturę?**
 - ☐ komfortowa (+2)
 - ☐ akceptowalna (czyli jeszcze do przyjęcia) (+1)
 - ☐ nieprzyjemna (czyli już nie do przyjęcia) (-1)
 - ☐ zdecydowanie nieprzyjemna (-2)
3. **Chciałbym/ Chciałabym, aby teraz w tym pomieszczeniu było:**
 - ☐ zdecydowanie cieplej (+2)
 - ☐ cieplej (+1)
 - ☐ bez zmian (0)
 - ☐ chłodniej (-1)
 - ☐ zdecydowanie chłodniej (-2)
4. **Jak ogólnie czujesz się w tym pomieszczeniu?**
 - ☐ bardzo dobrze (+2)
 - ☐ dobrze (+1)
 - ☐ obojętnie (0)
 - ☐ źle (-1)
 - ☐ bardzo źle (-2)

Gruba maska

1. **Jak oceniasz swoje odczucie ciepłe w tej chwili?**
 - ☐ zbyt gorąco (+3)
 - ☐ za ciepło (+2)
 - ☐ przyjemnie ciepło (+1)
 - ☐ komfortowo (0)
 - ☐ przyjemnie chłodno (-1)
 - ☐ za chłodno (-2)
 - ☐ zbyt zimno (-3)
2. **Jak odczuwasz aktualną temperaturę?**
 - ☐ komfortowa (+2)
 - ☐ akceptowalna (czyli jeszcze do przyjęcia) (+1)
 - ☐ nieprzyjemna (czyli już nie do przyjęcia) (-1)
 - ☐ zdecydowanie nieprzyjemna (-2)
3. **Chciałbym/ Chciałabym, aby teraz w tym pomieszczeniu było:**
 - ☐ zdecydowanie cieplej (+2)
 - ☐ cieplej (+1)
 - ☐ bez zmian (0)
 - ☐ chłodniej (-1)
 - ☐ zdecydowanie chłodniej (-2)
4. **Jak ogólnie czujesz się w tym pomieszczeniu?**
 - ☐ bardzo dobrze (+2)
 - ☐ dobrze (+1)
 - ☐ obojętnie (0)
 - ☐ źle (-1)
 - ☐ bardzo źle (-2)

5.3 Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza

5.3.1 Badania w budynkach edukacyjnych Politechniki Świętokrzyskiej

Badania w budynkach edukacyjnych Politechniki Świętokrzyskiej prowadzone były w okresie od czerwca 2021 roku do stycznia 2023 roku. W tym okresie studenci oraz pracownicy zostali zobligowani do noszenia masek w salach wykładowych, w pomieszczeniach służbowych, socjalnych oraz na korytarzu.

Przebadano łącznie 45 sal i aul wykładowych, otrzymując 1298 anonimowych kwestionariuszy ankiet (przy czym do analizy przyjęto 1199 ankiet) z oceną subiektywnych odczuć studentów podczas noszenia masek (cienkiej lub grubej). Tabela 4 przedstawia zestawienie wewnętrznych parametrów mikroklimatu o wartościach maksymalnych, minimalnych oraz średnich, jakie uzyskano podczas pomiarów. Szczegółowe dane parametrów w poszczególnych pomieszczeniach zostały przedstawione w Załączniku 1.

Tabela 4. Maksymalnie, minimalne oraz średnie wartości parametrów wewnętrznych badanych pomieszczeń

Parametry	Maximum	Minimum	Średnia
Temperatura powietrza, °C	28,8	20,9	24,11
Temperatura czarnej kuli, °C	29,1	21,8	24,42
Temperatura operatywna, °C	28,89	21,29	24,42
Wilgotność względna, %	58,35	22,36	36,80
Prędkość powietrza, m/s	0,13	0,03	0,08
Stężenie CO ₂ , ppm	2963	430	982,16

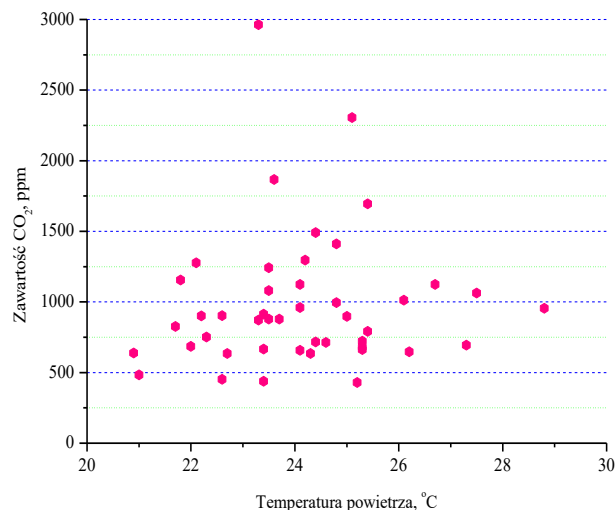
W pomieszczeniach miernik Testo 400 zarejestrował temperaturę w okresie kwiecień/maj – czerwiec powyżej 24°C, gdzie najwyższa zarejestrowana temperatura 28,8°C przypadła na salę w budynku „C” w dniu 12.05.2022 poza okresem grzewczym, natomiast najniższa zarejestrowana temperatura 20,9°C w sezonie grzewczym, w dniu 29.03.2022 w budynku „A”. Temperatura powietrza w zakresie od 20,9 do 27,5°C znalazła się w przedziale komfort cieplnego wynoszącego od 19 – 28°C [16, 23, 24] (poza jedną wartością czyli maksymalną temperaturą powietrza, która wynosiła 28,8°C). Co więcej, w budynku „A” zarejestrowano najniższą wilgotność względną wynoszącą 22,36% w dniu 04.04.2022 roku oraz najwyższą wilgotność względną w dniu 08.06.2022 roku równą 58,35% - w obu tych przykładach była to ta sama aula wykładowa. Można stwierdzić, że wilgotność względna w pomieszczeniach była komfortowa według zalecanego przedziału

miedzy 20 – 70% na podstawie badań [21], zaś według badań [16, 26, 27, 147] ten przedział powinien zawierać się od 30 – 60% – czyli 11 pomieszczeń według tego przedziału nie wskazywałoby na komfortowe wartości wilgotności względnej. Najwyższe odnotowane stężenie dwutlenku węgla uzyskano w dniu 14.12.2022 roku w budynku Energis w auli wykładowej tj. 2963 ppm. Co ciekawsze, według danych pomiarowych uzyskanych z Testo 400 na 14 pomieszczeń, w których stężenie dwutlenku węgla wynosiło powyżej 1000 ppm, to na budynek Energis przypadło aż 10 pomieszczeń, stanowiąc 22,22% wszystkich badanych pomieszczeń. Natomiast pozostałe 4 pomieszczenia stanowiły łącznie 8,88%, z czego dwie to były aule wkładowe w budynku „A” oraz dwie sale w budynku „C”. W pozostałych 31 pomieszczeniach stężenie dwutlenku węgla było poniżej 1000 ppm. Najniższa zawartość dwutlenku węgla została odnotowana w dniu 12.05.2022 roku w auli wykładowej budynku „A”. Biorąc pod uwagę dane z Dz.U.2002 nr 212 poz. 1833 z Rozporządzenia Ministerstwa Pracy i Polityki społecznej, dopuszczalna ilość stężenia CO₂ nie powinna przekraczać wartości 5000 ppm. Zalecany przedział koncentracji dwutlenku węgla wynosi między 1000 – 1200 ppm, tak aby użytkownicy pomieszczeń odczuwali świeżość powietrza [148]. Z 45 pomieszczeń, 9 przekroczyło w/w zakres stężenia dwutlenku węgla. Prędkość powietrza nie przekraczała wartości, o której wspomina autor pracy [16] wynoszącej 0,20 m/s.

5.3.1.1 Parametry mikroklimatu w badanych pomieszczeniach

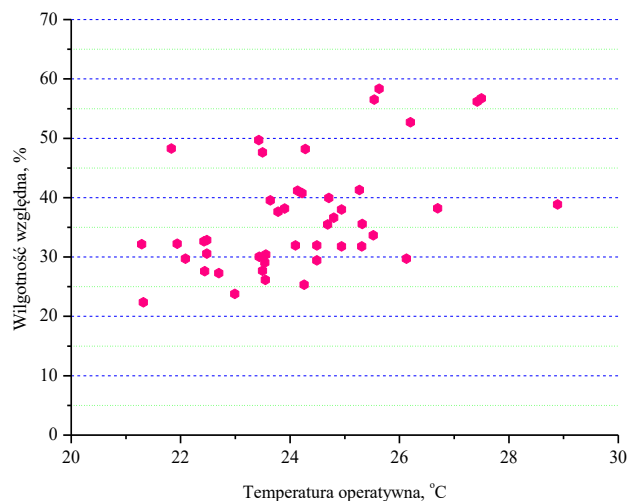
Parametry środowiskowe wewnątrz pomieszczeń są istotne, aby człowiek mógł się czuć dobrze ucząc się lub pracując, tym bardziej, że człowiek spędza większość swojego życia w szkołach, biurach czy w innych budynkach użyteczności publicznej – stąd tak ważne jest, aby zapewnić jak najdogodniejsze warunki ludziom tam przebywającym. Gdy temperatura jest za wysoka, człowiek może odczuwać nadmierne pocenie się, a w czasie gdy jest ona niska mogą pojawić się dreszcze. Gdy zawartość dwutlenku będzie za wysoka mogą być odczuwalne duszności i problemy z oddychaniem i tym samym zmniejszy się poziom koncentracji, przy źle dobranym oświetleniu oczy mogą odczuwać ból oraz zmęczenie, przy za niskiej wilgotności, człowiek może odczuwać suchość w gardle, a przy zbyt wysokiej wilgotności może pojawić się katar oraz zwiększona potliwość. Biorąc to pod uwagę, widać jaką rolę odgrywają wewnętrzne parametry, aby dobrze się czuć.

Na Rysunku 2 przedstawiono zawartość dwutlenku węgla we wszystkich badanych 45 pomieszczeniach względem panującej tam temperatury powietrza.



Rys. 2. Temperatura powietrza i zawartość CO₂ we wszystkich badanych pomieszczeniach

Jak przedstawiono w podrozdziale 5.3.1 zakres temperatury powietrza dla 45 pomieszczeń wyniósł od 20,9 do 28,8°C, natomiast zawartość stężenia dwutlenku węgla wynosiła od 430 do 2963 ppm. W 14 pomieszczeniach odnotowano stężenie CO₂ powyżej 1000 ppm i to w szczególności w zakresie temperatur powietrza od około 22 do około 25°C. Na Rysunku 3 przedstawiono temperaturę operatywną oraz wilgotność względną dla 45 pomieszczeń.



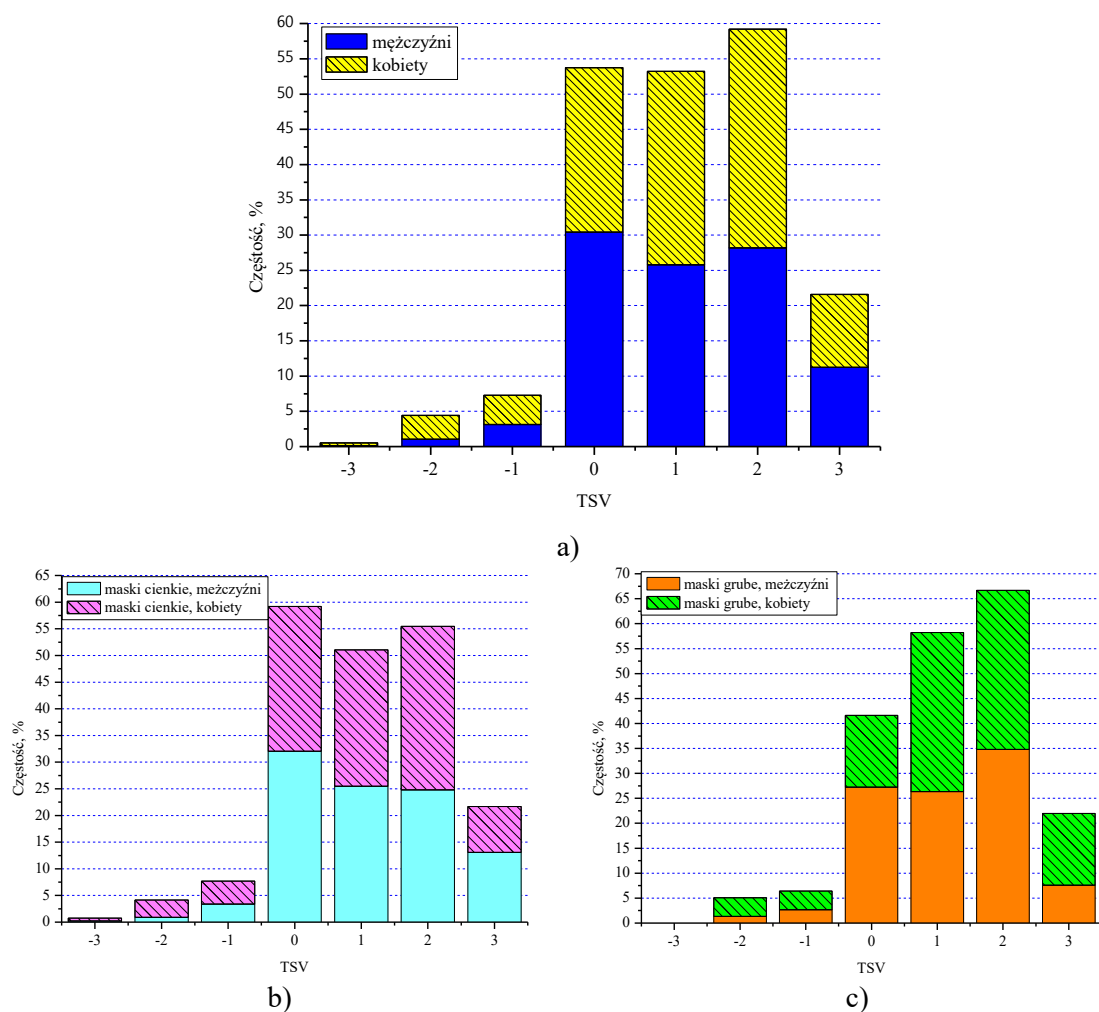
Rys. 3. Temperatura operatywna i wilgotność względna dla wszystkich pomieszczeń

Wpływ parametrów wewnętrznych na samopoczucie lub pojawienie się niepożądanego dolegliwości u osób bez masek wskazali autorzy [49], jednak wiele opracowań naukowych wspomina o wielu pojawiających się dolegliwościach podczas noszenia masek jak np.

intensywne pocenie się i duszności [74, 93, 96], zawroty głowy [79, 83, 93], trudności z koncentracją [79, 83] i z oddychaniem [64, 83, 88], wrażliwość skóry [93], zmęczenie [79, 88] oraz zawsze najwyżej oceniane – zbyt ciepło na twarzy, czyli odczuwany z tego tytułu dyskomfort [70, 74, 92, 93, 95, 96].

5.3.1.2 Wrażenia termiczne (TSV), akceptowalność (TAV) i preferencje (TPV) użytkowników

Wrażenia termiczne (TSV) oceniane są według skali od -3 do +3 na podstawie anonimowych kwestionariuszy (odpowiadając na pytanie „*Jak oceniasz swoje odczucie cieplne w tej chwili?*”), gdzie ujemne wartości informują o środowisku chłodnym, 0 jest wartością neutralną (najbardziej komfortową), natomiast dodatnie wartości informują o środowisku ciepłym. Wrażenia termiczne zostały przedstawione z podziałem według płci: kobiety stanowiły 44%, a mężczyźni 56%. Natomiast w przypadku rozdziału na rodzaj maski to w przypadku badań z maskami cienkimi kobiety – stanowiły 46%, a mężczyźni – 54%, a w przypadku badań z maskami grubymi: kobiety – 42%, a mężczyźni – 58%. Na Rysunku 4 zaprezentowano analizę wykonanych obliczeń.

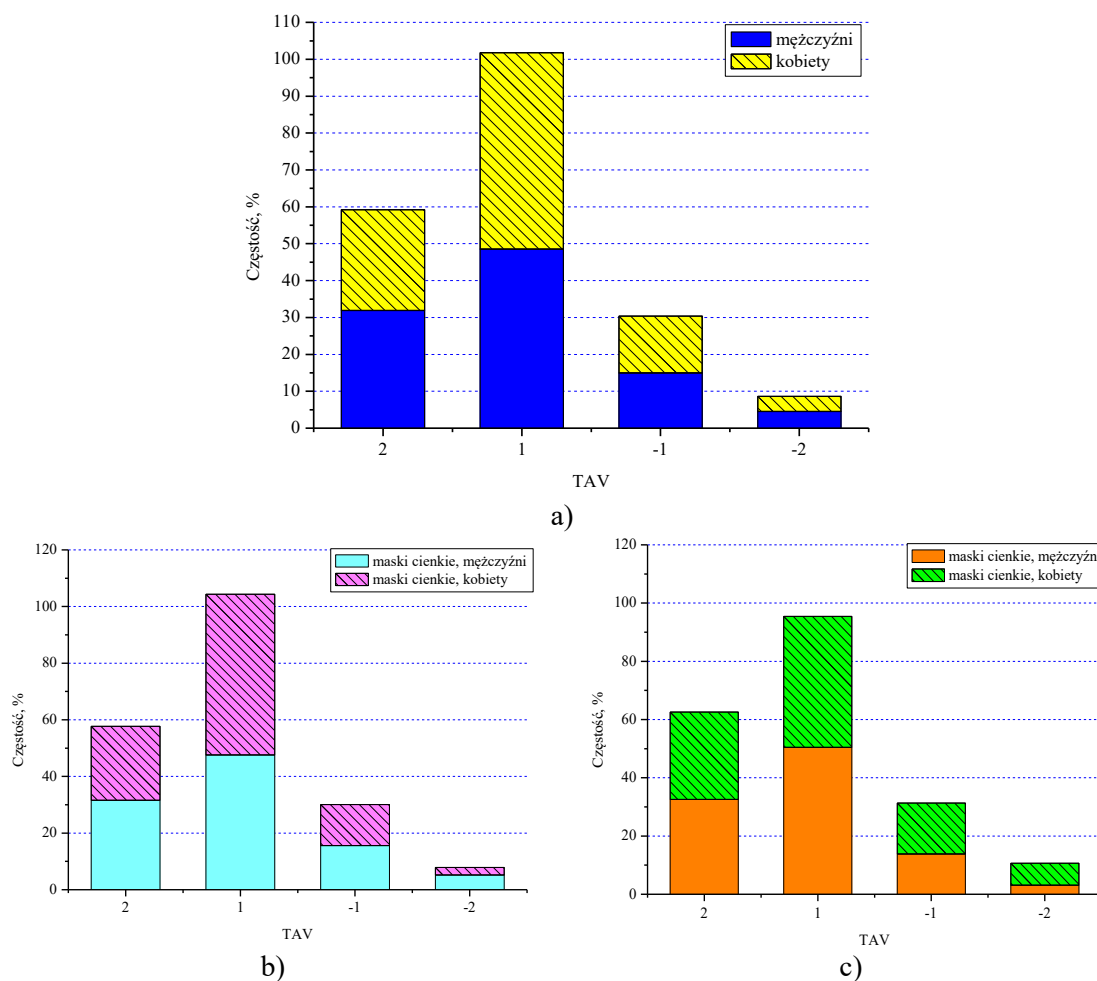


Rys. 4. Wrażenia ciepłne TSV studentów na podstawie ankiet wg. płci dla a) całości badań bez podziału na rodzaj masek oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -3: zbyt zimno, -2: za chłodno, -1: przyjemnie ciepło, 0: komfortowo, +1: przyjemnie ciepło, +2: za ciepło, +3: zbyt gorąco

Porównując TSV „damskie” i „męskie” na Rys. 4a, widać, że obie płcie w podobny sposób oceniły środowisko termiczne, chociaż mniejsza grupa kobiet uznała środowisko za neutralne niż w przypadku mężczyzn i jednocześnie większej grupie kobiet było za chłodno. Kwestia ta wiąże się przede wszystkim z zastosowaniem masek grubych Rys. 4c Wybór mężczyzn dla odpowiedzi „komfortowo (0)” wyniósł 30,43%, a dla kobiet to 23,31%. Jednak należy też zwrócić uwagę, że prawie dwa razy więcej procent kobiet zaznaczyło odczuwanie środowiska chłodnego „przyjemnie chłodne (-1)”, „za chłodnego (-2)” oraz „zbyt zimnego (-3)”, podczas gdy dla mężczyzn ten wynik wyniósł 4,34%. Porównując, otrzymane wyniki mężczyzn z Rys. 4a do badań autora [90], to pomimo założonych masek przez mężczyzn na Uniwersytecie w Rumunii, 49% z nich odczuwało komfort, a przyjemnie ciepło było dla 27%, co jest zdecydowanie większe niż u mężczyzn

noszących maski w obecnych badaniach. Można to tłumaczyć innym klimatem, ponieważ mieszkańcy Rumunii są bardziej przystosowani do wyższych temperatur niż mieszkańcy Polski, więc ich adaptacja do warunków nie tylko wewnętrznych, ale i podczas noszenia maski może być szybsza niż w Polsce. W innych badaniach wrażenia termiczne u studentów przebadanych w bibliotece [93], wskazują na odczuwanie komfortu w maskach w okresie letnim i zimowym na poziomie 50 – 70%, czyli wyżej niż w przypadku badań realizowanych na Politechnice Świętokrzyskiej, gdzie ten komfort był niższy. Tutaj również należy wspomnieć, że osoby mieszkające w Chinach są przyzwyczajone do noszenia masek, ze względu na jakość powietrza na zewnątrz.

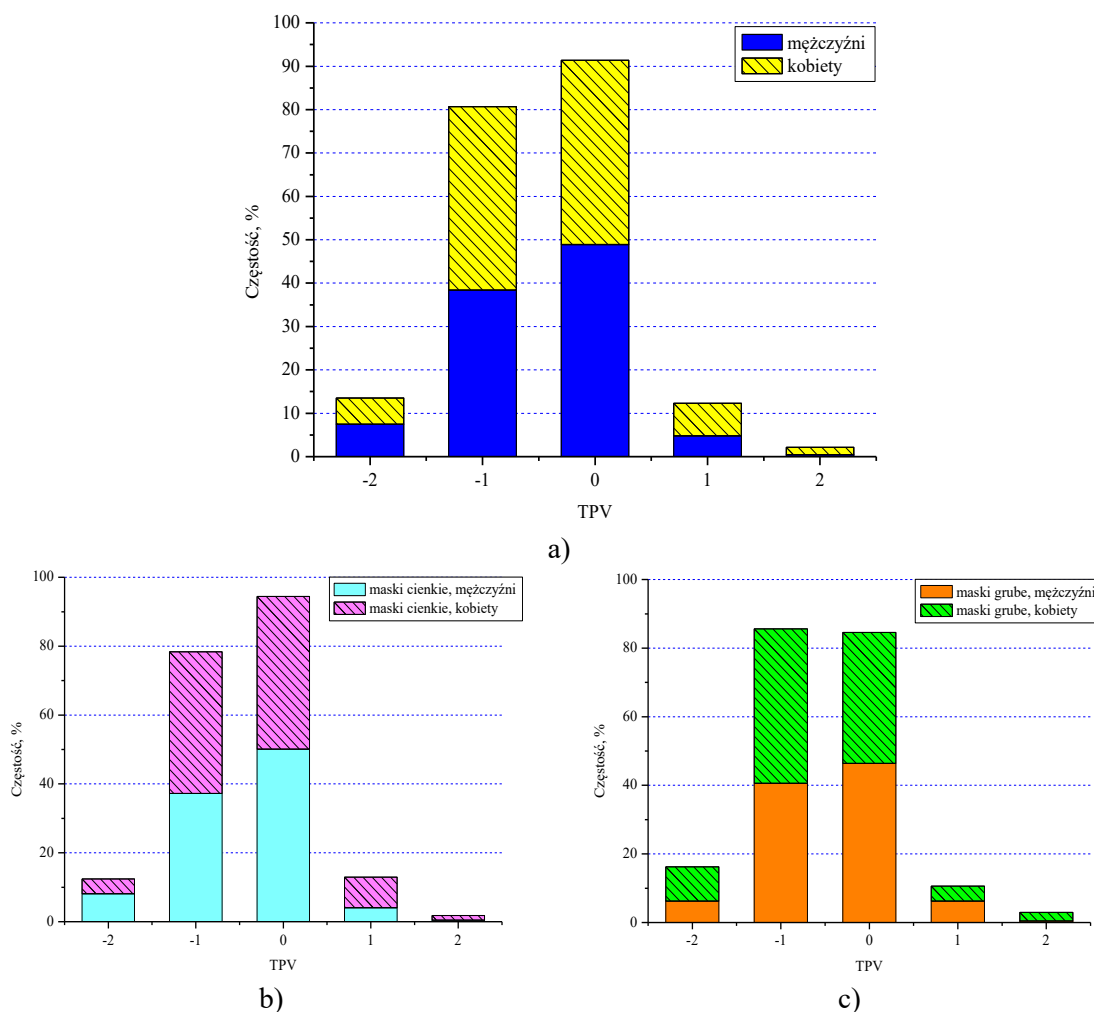
Kolejne pytanie w ankiecie dotyczyło stopnia akceptowalności temperatury (TAV) i brzmiało „*Jak oceniasz aktualną temperaturę w tym pomieszczeniu?*”, a także preferencji temperatury (TPV) powietrza w kierunku wartości niższych bądź wyższych („*Chciałbym/Chciałabym, aby teraz w tym pomieszczeniu było...*”). Wyniki TAV oraz TPV zostały przedstawione na Rysunku 5 oraz Rysunku 6.



Rys. 5. Ocena akceptowalności temperatury TAV powietrza na podstawie ankiet wg. płci dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: zdecydowanie nieprzyjemna, -1: nieprzyjemna, +1: akceptowalna, +2: komfortowa

W odpowiedziach odnoszących się do akceptowalności temperatury (Rys. 5a) to odpowiedź „jeszcze akceptowalna (+1)” dla obu płci była najczęściej wybieraną odpowiedzią. Jednak znalazły się takie osoby, których akceptowalność temperatury podczas noszenia masek była „komfortowa (+2)” i wyniosła dla mężczyzn 31,93% a dla kobiet 27,26%. Odpowiedź „nie do przyjęcia (-1)” zaznaczyło 14,99% mężczyzn i niewiele więcej kobiet – 15,41%. Natomiast, przy odpowiedzi „zdecydowanie nie do przyjęcia (-2)” większy procent mężczyzn zaznaczył tą odpowiedź, niż kobiety. Generalnie można stwierdzić, że w przypadku TAV nie było znaczących różnic między płciami. Uwagę zwraca jedynie fakt, że negatywne odczucia dotyczące akceptowalności (odpowiedzi -1 i -2) dotyczyły w większym stopniu wyników badań z maskami grubymi niż z cienkimi. W pracy Rus i in. [90], zastosowano wskaźnik TCV – Thermal Comfort Vote, który jest

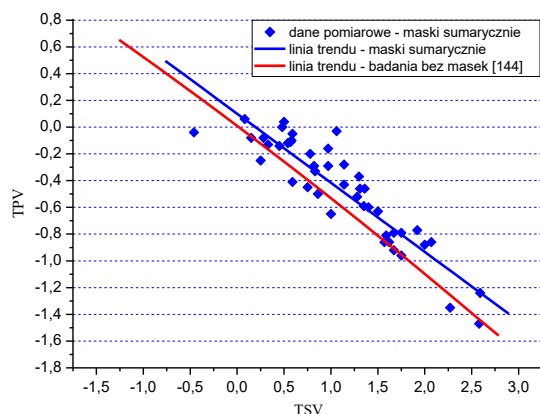
odpowiednikiem TAV. Mężczyźni określili, że w maskach czują się w 57,40% bardzo komfortowo (TAV: 2 – temperatura komfortowa), oraz 35,70% jako komfortowa (TAV: 1 – temperatura akceptowalna), jak i 7,40% określając, że czuje się nie komfortowo oraz bardzo niekomfortowo (TAV: -1, -2 – nie do przyjęcia oraz zdecydowanie nie do przyjęcia). W przypadku ogólnej oceny akceptowalności temperatury, bazując na danych z odpowiedzi „komfortowo (+2)” oraz „jeszcze do przyjęcia (+1)” dla mężczyzn wyniosła sumarycznie 80,51%, co jest zdecydowanie niższym wynikiem, niż w badaniach Rus i in. [90].



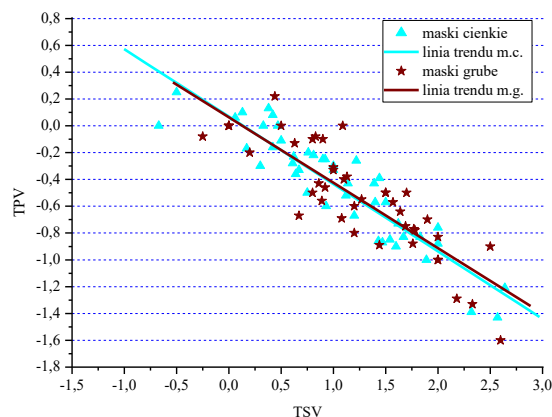
Rys. 6. Preferencje temperatury TPV powietrza na podstawie ankiet wg. płci a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: zdecydowanie chłodniej, -1: chłodniej, 0: bez zmian, +1: cieplej, +2: zdecydowanie cieplej

W przypadku pytania dotyczącego preferencji temperatury (które brzmiało: „Chciałbym/ Chciałabym, aby teraz w tym pomieszczeniu było...”) studenci wybierali najczęściej odpowiedź „ bez zmian” (0) lub „chłodniej” (-1) na Rys. 6a, co biorąc pod uwagę Rys. 4a i wyniki TSV, w którym to środowisko oceniono jako przyjemnie ciepłe, za ciepłe lub zbyt gorące, było to do przewidzenia. Odpowiedź „chłodniej” zaznaczyło

38,38% mężczyzn i 42,29% kobiet. Na Rys. 4a, widać, że mężczyźni zaznaczyli „zbyt gorąco” (+3) w stopniu 11,24% i tym samym preferencję zmiany środowiska na „zdecydowanie chłodniejsze” (-2) – 7,50%, podczas gdy dla kobiet TSV dla odpowiedzi „zbyt gorąco” (+3) wyniosło około 10,34% i preferencje zmniejszenia temperatury otoczenia wyniosły odpowiednio mniej tj. 6,02%. Sumując wartości preferencji w kierunku chłodniejszego środowiska to dla obu płci ten zakres wyniósł od około 45 do 48%, czyli prawie połowa grupy w obu przypadkach deklarowała, aby temperatura, która była odczuwana została obniżona, co oczywiście jest potwierdzeniem wyboru z danych na Rys. 4a. Odpowiedź „bez zmian (0)” w przypadku mężczyzn wyniosło blisko 50%, natomiast dla kobiet ten procent był równy 42,48. Analogicznie też znaleźć można preferencje osób w kierunku środowiska cieplejszego – i nie jest to zaskoczeniem ponieważ, kiedy osoby oceniły swoje wrażenia TSV jako chłodne, to zadeklarowały one chęć zwiększenia temperatury otoczenia. Mężczyźni noszący maski zdecydowanie zaznaczali, że chcieliby, aby środowisko było chłodniejsze, w przeciwieństwie do mężczyzn w badaniach [90], gdzie w swoich preferencjach wskazali w około 30% chęć zmiany środowiska na jeszcze cieplejsze. Powyższa dyskusja prowadzi do dość oczywistego wniosku, że TAV i TPV są związane z TSV. Na Rysunku 7a zobrazowano zależność między TSV a TPV – w tym celu, z każdego badania została obliczona średnia z wrażeń termicznych (TSV) oraz preferencji temperatury powietrza (TPV). Przedstawione zostały średnie wartości dla wszystkich badań oraz porównanie tych wyników do linii trendu badań bez masek z rozprawy doktorskiej [144].



a)



b)

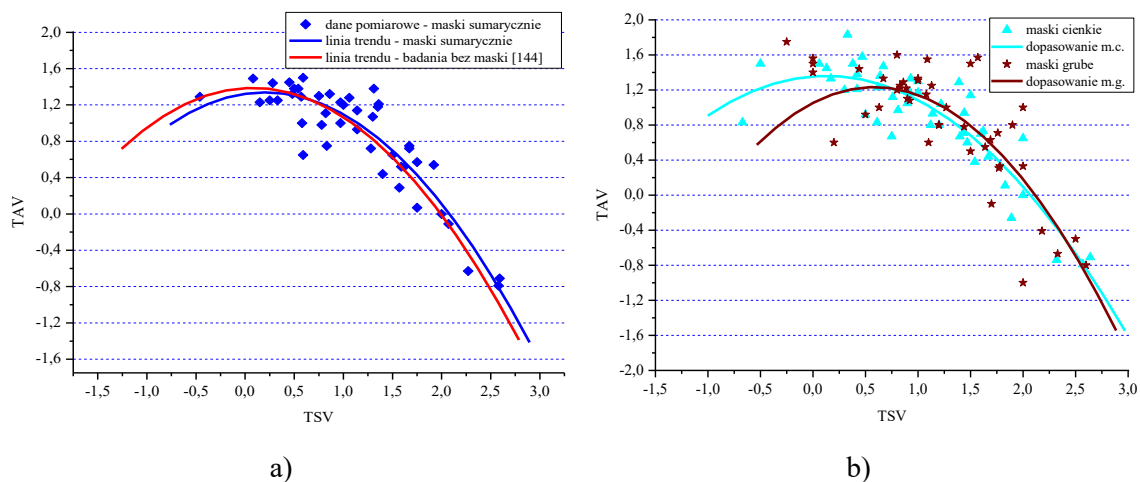
Rys. 7. Zależność między TSV a TPV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych

Gdy respondenci odczuwają coraz wyższą temperaturę (gdy TSV rośnie), należy się spodziewać, że będą oni chcieli spadku temperatury, czyli TPV będzie maleć. Taką właśnie zależność przedstawia Rys. 7a. Wykres przedstawia dane pomiarowe dla badań z maskami w odniesieniu do pomiarów bez masek wykonanych przez Krawczyk [144] w tych samych obiektach, tym samym sprzętem i tą samą metodyką. Różnice między liniami trendu dla obu badań nie są znaczące, a charakter zmienności jest niemal taki sam. W przypadku dwóch typów masek (Rys. 7b) linie trendu się pokrywają, czyli charakter ich zmienności jest identyczny. Współczynnik determinacji dla zależności TSV – TPV (Rys. 7a) wyniósł $R^2 = 0,85$ przy korelacji:

$$TPV = -0,5166TSV + 0,0932 \quad (15)$$

co należy uznać za silną zależność. Dla Rysunków 7b – 10b współczynniki R^2 oraz jego równania prostych aproksymujących przedstawia Załącznik 2.

Na Rysunku 8 przedstawiono zależność między TSV a TAV i jak było to w przypadku zależności TSV – TPV, również i TAV zostało obliczone jako średnia z każdego badania.



Rys. 8. Zależność między TSV a TAV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych

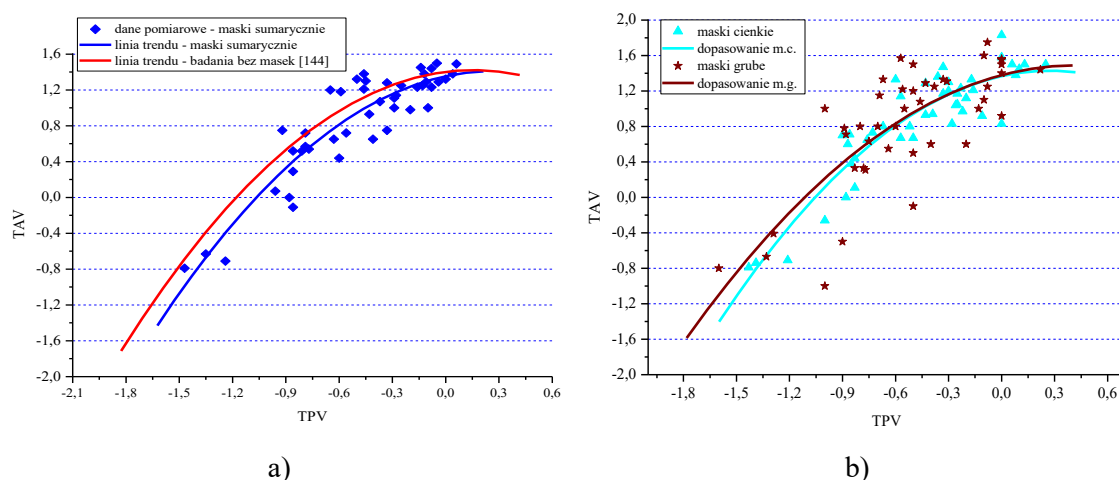
Należy się spodziewać, że najwyższa akceptowalność środowiska wewnętrznego będzie mieć miejsce, gdy ankietowani będą czuć się komfortowo ($TSV=0$ z niewielką odchyłką – wg normy ISO 7730 [31] odchyłka ta dla budynku kategorii II to $\pm 0,5$). Rzeczywiście ekstremum funkcji dopasowującej (Rys. 8a) w przypadku badań z maskami było dla $TSV = +0,25$, natomiast dla badań bez masek [144] było to w przedziale $0 - 0,25$. Współczynnik determinacji dla zależności $TSV - TAV$ (Rys. 8a) wyniósł $R^2 \approx 0,85$ przy korelacji:

$$TAV = -0,3787TSV^2 + 0,1519TSV + 1,3236 \quad (16)$$

Dla współczynnika determinacji masek ponownie występuje związek dość silny.

W przypadku zależności TAV vs. TSV z podziałem na rodzaj maski zaobserwowano istotne rozbieżności w przebiegu krzywych aproksymujących (Rys. 8b) jedynie w obszarze $TSV < 0,7$. Najwyższy stopień akceptowalności dla obu typów masek miał miejsce przy TSV różniącym się o ok. $0,5$.

Najwyższy stopień akceptowalności warunków temperaturowych powinien mieć miejsce, gdy ankietowani nie chcą żadnej zmiany w środowisku, gdy parametry mikroklimatu im odpowiadają (czyli $TPV = 0$), co wyraźnie oddaje zależność między preferencjami dotyczącymi temperatur TPV a akceptowalnością tej temperatury powietrza TAV w badanych pomieszczeniach – Rysunek 9.



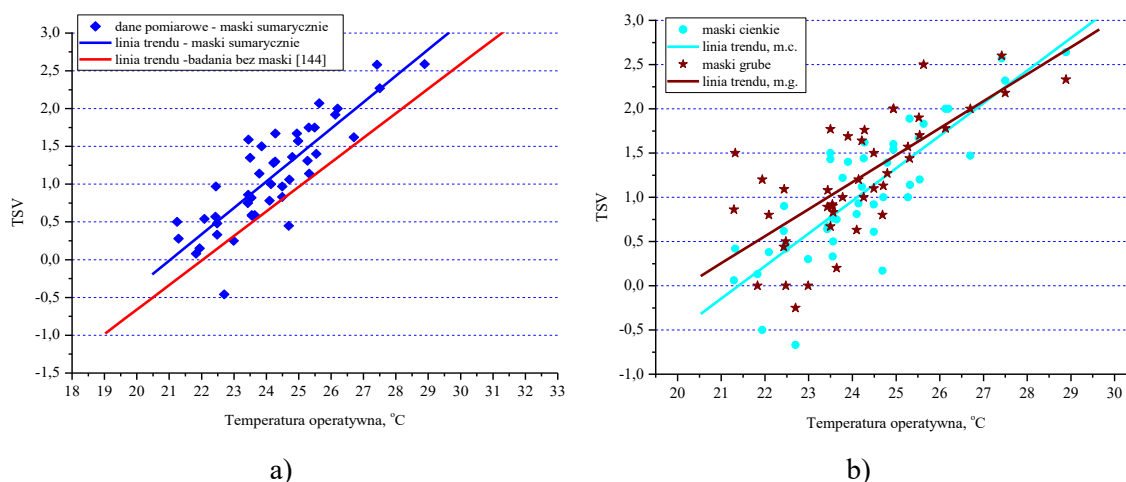
Rys. 9. Zależność między TPV a TAV dla a) maski sumarycznie i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych

Charakter zmian między TPV a TAV (Rys. 9a) dla badań z maskami i bez jest taki sam, to znaczy, że gdy ankietowani chcą coraz większych zmian w zakresie temperatury (w tym przypadku w kierunku jest obniżenia) to maleje akceptowalność TAV. Należy jednocześnie zauważyć, że generalnie stopień akceptowalności temperatury dla badań bez masek jest wyższy niż dla badań z użyciem masek. W przypadku rozróżnienia na rodzaj maski – Rys. 9b – krzywe aproksymujące się pokrywają z wyjątkiem wartości TPV silnie ujemnych, gdzie jednak liczba punktów pomiarowych jest niewielka. Współczynnik determinacji dla zależności TPV – TAV (Rys. 9a) wyniósł $R^2 = 0,84$:

$$TAV = -0,7795TPV^2 + 0,4408TPV + 1,3566 \quad (17)$$

Dla współczynnika determinacji występuje związek dość silny, tak jak w przypadku zależności TSV – TPV oraz TSV – TAV.

Najistotniejszy parametrem, który wpływa na odczucia termiczne jest temperatura operatywna. Przedstawiona na poniższym rysunku zależność odczuć termicznych (TSV) ankietowanych noszących maski i ich nie noszących od temperatury operatywnej stanowi sedno oceny wpływu użytkowania masek na komfort cieplny. Na Rysunku 10 przedstawiono zależność temperatury operatywnej w pomieszczeniach na wrażenia termiczne. Wyniki badań dla warunków bez masek zaczerpnięto z [144] – przeprowadzonych w tych samych obiektach, tym samym zestawem pomiarowym i przy użyciu tej samej metodyki. Dodatkowo ankietowani pochodzili z tego samego obszaru i charakteryzowali ich podobne parametry (wiek, indeks BMI).



Rys. 10. Zależność między temperaturą operatywną a TSV dla a) maski sumarycznie i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych

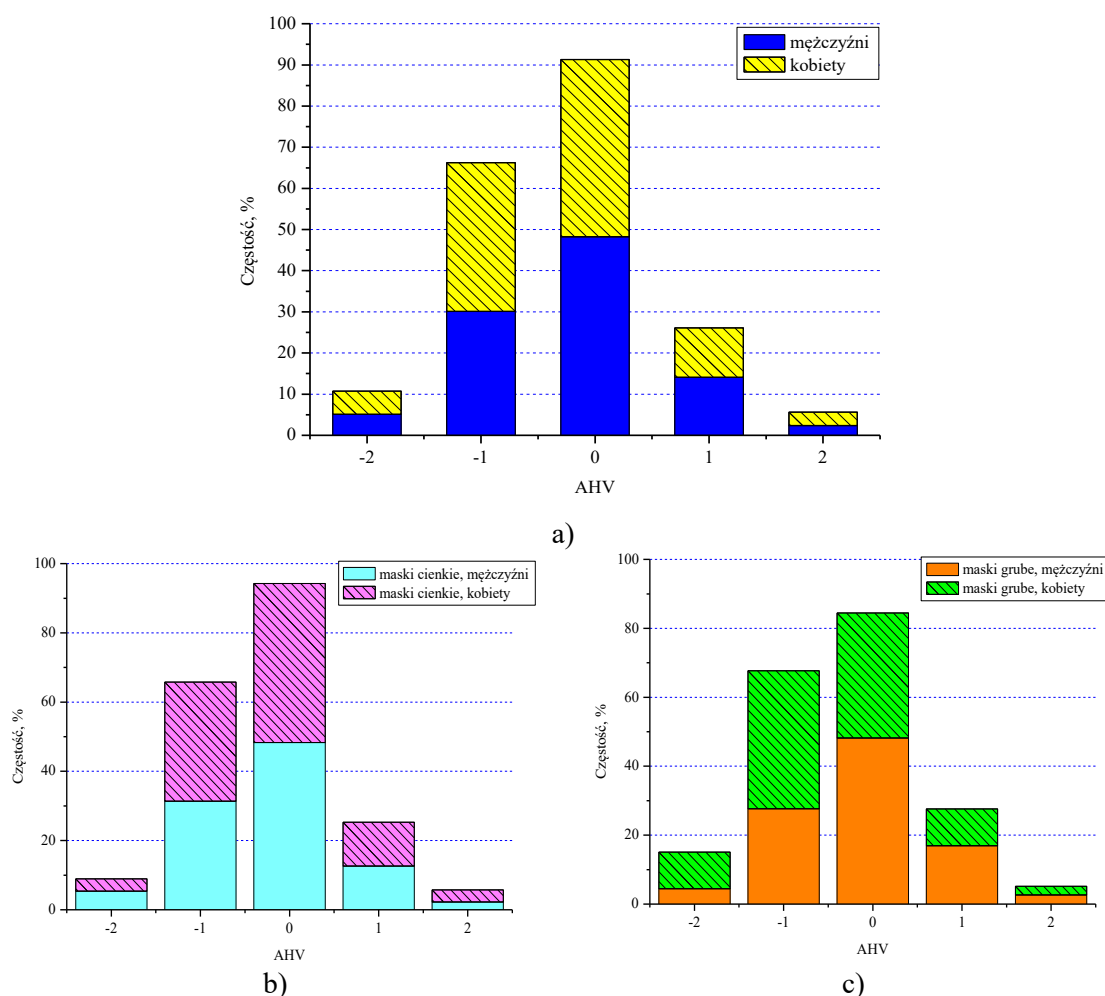
Wraz ze wzrostem temperatury operatywnej liniowo rośnie TSV. Linia trendu dla wyników badań z użyciem masek (Rys. 10a) znajduje się wyraźnie powyżej linii trendu dla badań bez masek wg. [144]. W związku z tym dla tej samej temperatury operatywnej wartości TSV dla osób noszących maski są wyższe (średnio o około 0,4). Zatem osoby w maskach postrzegają środowisko jako cieplejsze. Jednocześnie różnice rosną wraz ze wzrostem temperatury, co wynika z pogorszenia się komfortu cieplnego wraz z rosnącą temperaturą i konieczności odbierania od ciała większych strumieni ciepła. Wówczas maska utrudnia chłodzenie poprzez płuca na drodze przemiany fazowej i najprawdopodobniej z tego wynika rosnąca różnica między TSV dla badań w maskach i bez. Jednocześnie należy zaznaczyć, że w przypadku masek grubych aproksymacja liniowa TSV znajduje się powyżej aproksymacji dla masek cienkich w zakresie temperatur operatywnych do ok. 25,5°C. Respondenci mieli wyższe odczucia temperaturowe w tym obszarze, gdy nosili maski grube, które stanowiły dodatkową barierę i mogły utrudniać oddychanie (a zatem również usuwanie pary wodnej z płuc, która jest nośnikiem ciepła utajonego). Współczynnik determinacji dla zależności TSV – Temperatura Operatywna (TO) (Rys. 10a) wyniósł $R^2 \approx 0,73$, przy korelacji:

$$TSV = 0,3489TO - 7,3384 \quad (18)$$

5.3.1.3 Ocena i preferencje dotyczące wilgotności względnej powietrza

Noszenie maski może zaburzyć ocenę wilgotności w pomieszczeniach, ponieważ stanowi ona barierę między twarzą a powietrzem wewnętrznym. W pierwszej kolejności

zostanie omówiony wskaźnik AHV²⁷, czyli aktualna ocena wilgotności, w drugiej kolejności zostanie omówiona preferencja wilgotności HPV²⁸, w kierunku bardziej suchego/wilgotnego środowiska lub pozostawienia wilgotności bez zmian. Oba wskaźniki zostały przedstawione na Rysunku 11 oraz Rysunku 12. Pytanie w kwestionariuszu ankiety odnośnie oceny wilgotności brzmiało „*Jak oceniasz wilgotność powietrza w tej chwili?*” oraz „*Chciałabym/Chciałabym, aby teraz powietrze w tym pomieszczeniu było...*”.



Rys. 11. Ocena wilgotności względnej AHV na podstawie ankiet wg. płci dla a) całości badań z bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: zbyt sucho, -1: dość sucho, 0: przyjemnie, +1: dość wilgotno. +2: zbyt wilgotno

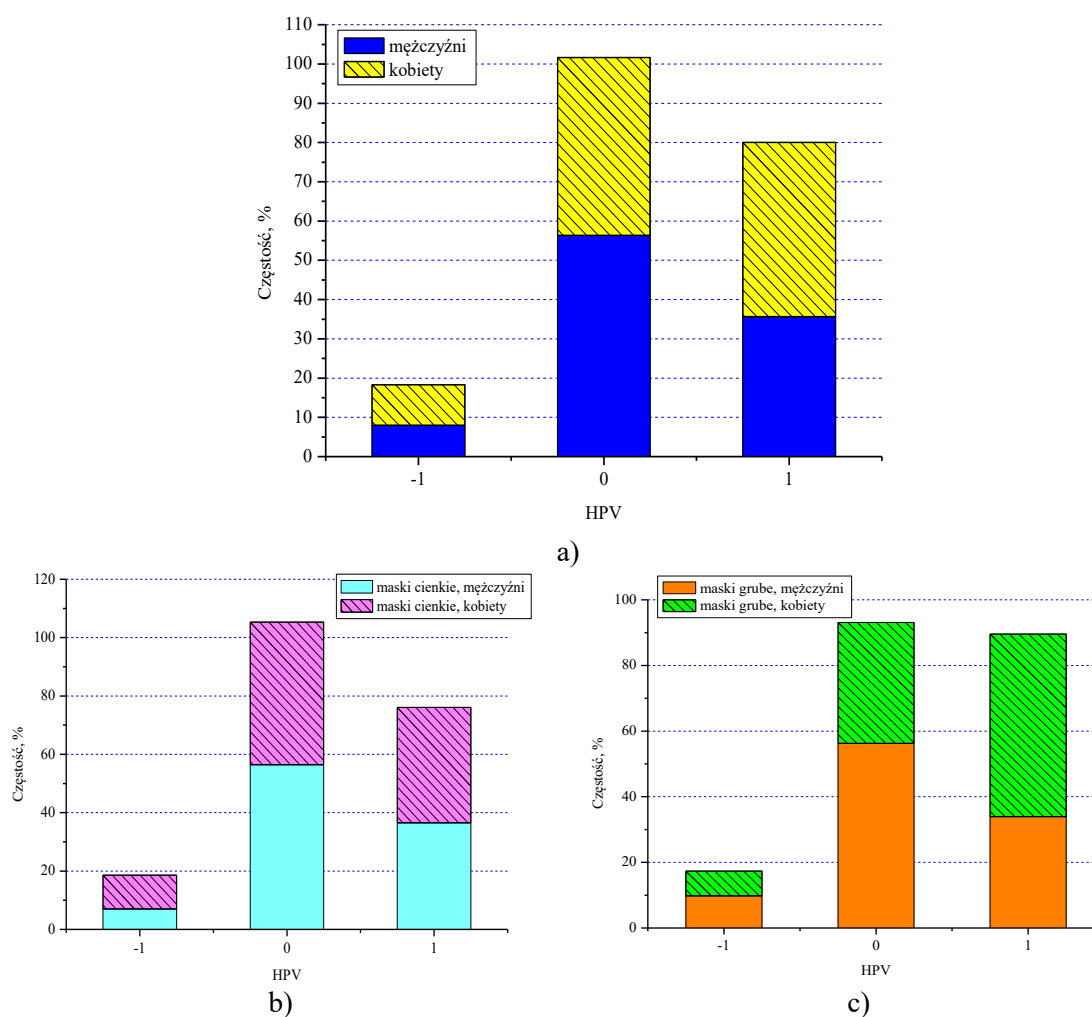
Pewnym zaskoczeniem okazuje się wybór badanych osób oceniających wilgotność względną (Rys. 11a) jako „dość suchą” (-1), ponieważ udział tej odpowiedzi dla kobiet wyniósł 36,09%, a dla mężczyzn to 30,13% – to w obu przypadkach około 1/3 każdej grupy.

²⁷ Assessment Humidity Vote (ang.)

²⁸ Humidity Preference Vote (ang.)

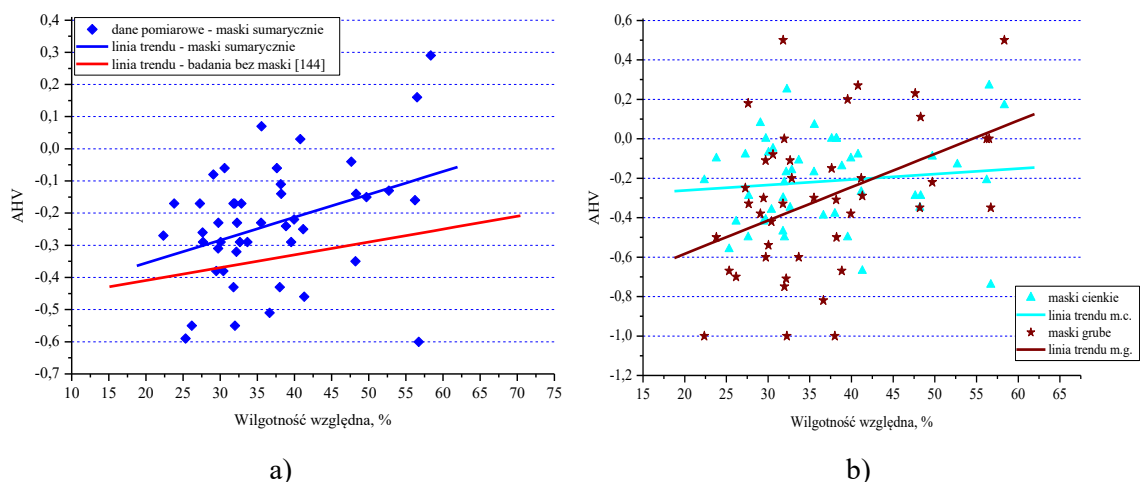
Między 5 a 6%, obie płcie zadeklarowały oceną wilgotności względnej jako „zbyt suchą” (-2). Odpowiedź „przyjemnie” (0) zaznaczyło prawie 50% mężczyzn, a kobiety około 43%. Więcej mężczyzn zaznaczyło odpowiedź „dość wilgotno (+1)” – 14,09%, a kobiet – 12,03%. Ale odwrotna sytuacja jest widoczna przy ocenie wilgotności jako „zbyt wilgotna (+2)” ponieważ jedynie 2,40% mężczyzn zadeklarowało ten wybór, podczas gdy dla kobiet było to 3,20%. Badania wykazały dość standardowy rozkład głosów dla zarejestrowanych podczas badań wartości wilgotności w zakresie 22 – 58% (tj. w większości „przyjemnie (0)” i „dość sucho (-1)”), choć można się było spodziewać, że ocena osób noszących maski przesunie się istotnie w kierunku odpowiedzi „dość wilgotno” i „zbyt wilgotno”, gdyż wydychane powietrze cechuje się wilgotnością względną na poziomie 65 – 89% [149].

Należy podkreślić, że w literaturze dotyczącej badań z maskami głównie zwracano uwagę na wilgotne środowisko między twarzą a wewnętrzną stroną maski [64, 66, 73, 96]. Po omówieniu wskaźnika AHV należy poznać preferencje wybranej grupy badawczej, czyli HPV, co wyraża odpowiedź na pytanie „*Chciałbym/Chciałabym, aby teraz powietrze w tym pomieszczeniu było ...*” zawarte w ankiecie.



Rys. 12. Preferencje wilgotności względnej na podstawie ankiet wg. płci a) maski sumarycznie oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -1: bardziej suche, 0: bez zmian, +1: bardziej wilgotne

Porównując odpowiedzi z Rys. 11a w stosunku do Rys. 12a, można zauważyć analogiczne odpowiedzi ankietowanych, ponieważ osoby zaznaczyły w swoich odpowiedziach na Rys. 11a, że odczuwają środowisko „dość suche” (-1) lub „zbyt suche” (-2). Ukierunkowało to wybór odpowiedzi w pytaniu o preferencje wilgotności na środowisko „bardziej wilgotne (+1)” dla mężczyzn – 35,68%, dla kobiet – 44,36%. Natomiast „bez zmiany (0)” wilgotności chciało pozostawić około 56% mężczyzn oraz 45,30% kobiet. Kobiety, którym było w masce za wilgotno (Rys. 11a) również zagłosowały za odpowiedzią „bardziej sucho (-1)” w wysokości około 10%, podczas gdy dla mężczyzn ten udział wyniósł 7,95%. Na poniższym Rysunku 13 zaprezentowano zależność między AHV a wilgotnością względną.



Rys. 13. Zależność między wilgotnością względną a oceną AHV dla: a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski

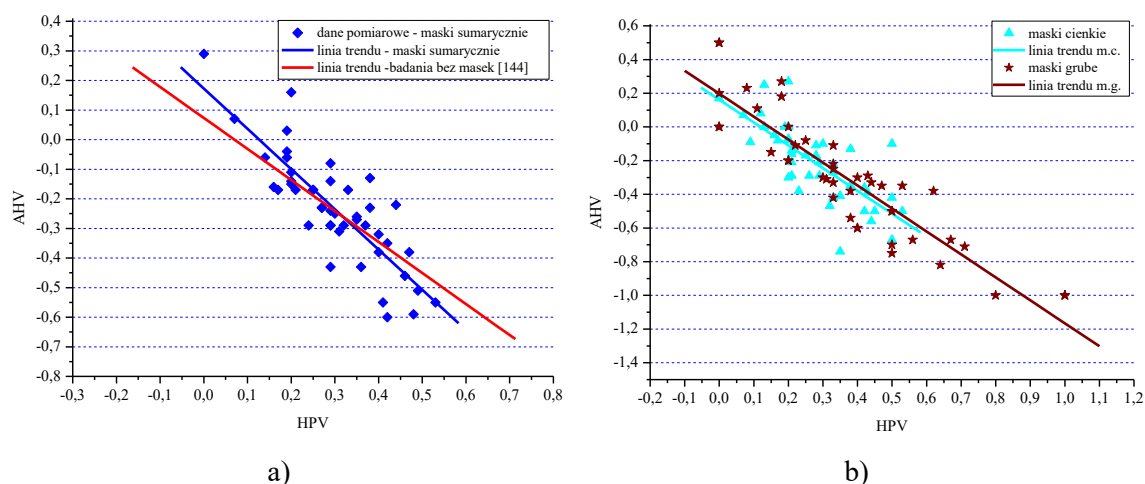
Współczynniki R^2 oraz równanie linii aproksymujących przedstawiono w Załączniku 2 dla Rys. 13b i Rys. 14b.

W pierwszej kolejności (Rys. 13a), można zauważyć znaczny rozrzut średnich wartości AHV względem panującej wilgotności dla każdego pomieszczenia. Nie można było spodziewać się, że taka zależność będzie silnie ze sobą korelować, ponieważ ankietowani mieli na twarzy maski i ocena wilgotności jako parametru środowiska była ograniczona i utrudniona. Nie da się jednoznacznie ocenić wpływu wilgotności względnej jako parametru środowiskowego na ocenę wilgotności ludzi, co potwierdza współczynnik determinacji (Rys. 13a) $R^2 \approx 0,13$ (na potrzeby równania posłużono się skrótem anglojęzycznym RH – Relative Humidity, czyli wilgotność względna), przy korelacji:

$$AHV = 0,007RH - 0,4942 \quad (19)$$

Teoretycznie uzasadnione jest, że krzywa regresji liniowej dla badań w maskach znajduje się powyżej linii regresji dla badań bez masek, tj. dla tej samej wilgotności względnej powietrza respondenci w maskach oceniali wilgotność w stopniu większym (w kierunku rosnących wartości AHV), niż dla badań bez masek – szczególnie dla rosnącej wilgotności względnej – co wynika z akumulacji pary wodnej między twarzą a maską.

Biorąc pod uwagę brak zależności między wilgotnością a AHV, przeanalizowano zależność między HPV a AHV, co zostało zobrazowane na Rysunku 14.



Rys. 14. Zależność między HPV a AHV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) dla masek cienkich i grubych

Im bardziej ankietowani odczuwali powietrze jako wilgotne (wzrost AHV), tym powinni wyrażać wolę zmniejszenia wilgotności (HPV dąży do wartości ujemnych). Znalazło to pełne odzwierciedlenie w wynikach badań (Rys. 14a). Linia regresji liniowej danych dla masek bardzo dobrze pokrywa się z linią regresji dla badań bez masek (wg. [144]), co potwierdza fakt, że ludzkie odczucia w tym zakresie nie zależą od obecności maski na twarzy. Współczynnik determinacji dla zależności HPV – AHV (Rys. 14a) wyniósł $R^2 = 0,69$, przy korelacji:

$$AHV = -1,3558HPV + 0,1714 \quad (20)$$

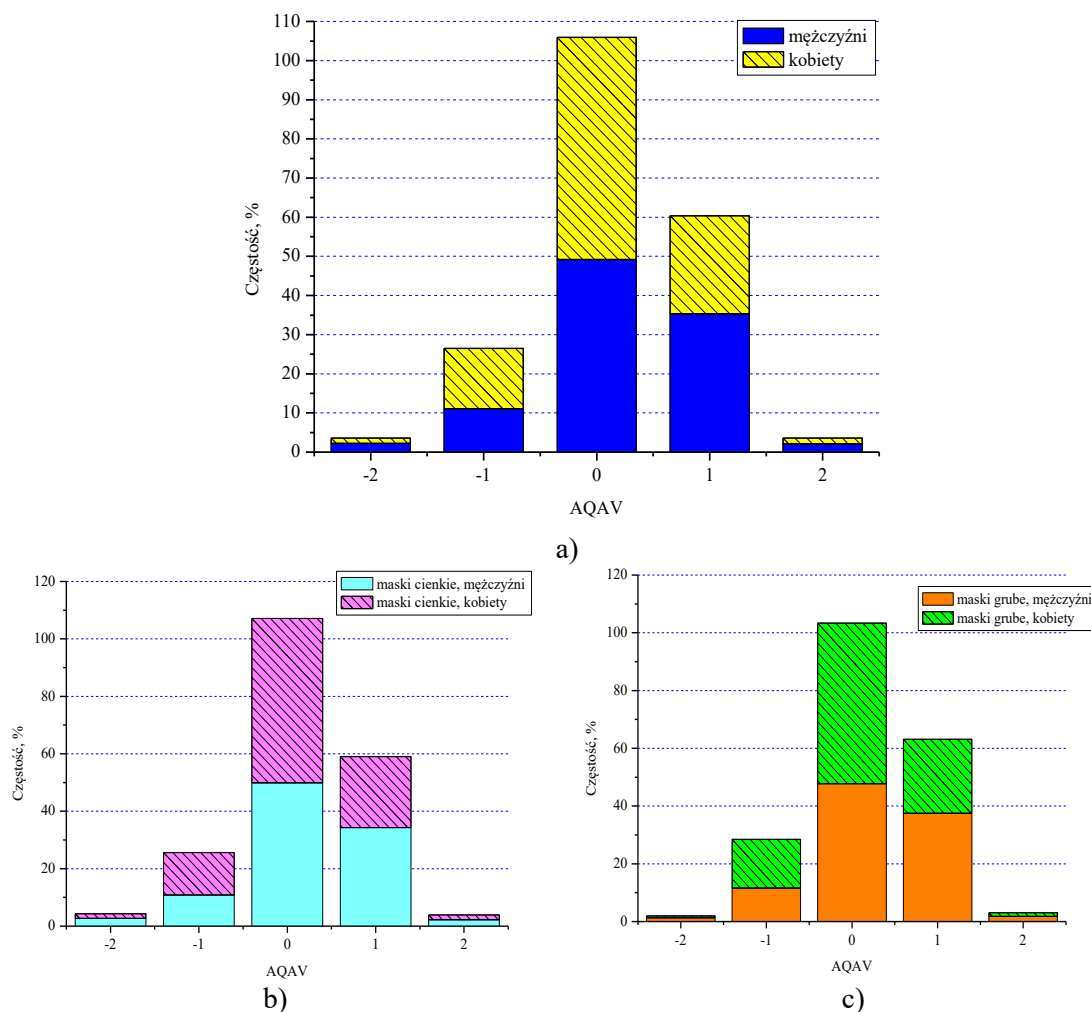
Dla współczynnika determinacji masek występuje związek umiarkowany/ silny.

Należy nadmienić że wiele badań [64, 66, 73, 96] wskazuje na odczuwanie środowiska wilgotnego podczas noszenia masek, a w powyższych danych eksperymentalnych tego nie potwierdzono. Należy zaznaczyć, że badania [64, 66, 73, 96] wykonano dla bardzo nielicznych grup od 5 do 32 osób, a aktualne badania dotyczą niemal 1200 kwestionariuszy ankiet.

5.3.1.4 Ocena jakości powietrza wewnętrznego

W tym podrozdziale zostanie omówione subiektywne wrażenie jakości powietrza na podstawie oceny respondentów noszących maski. Pytanie w kwestionariuszu ankiety

brzmiało „*Jak oceniasz jakość powietrza w tym pomieszczeniu?*”, a sam parametr nazwano AQAV²⁹. Wyniki zostały zaprezentowane na Rysunku 15.



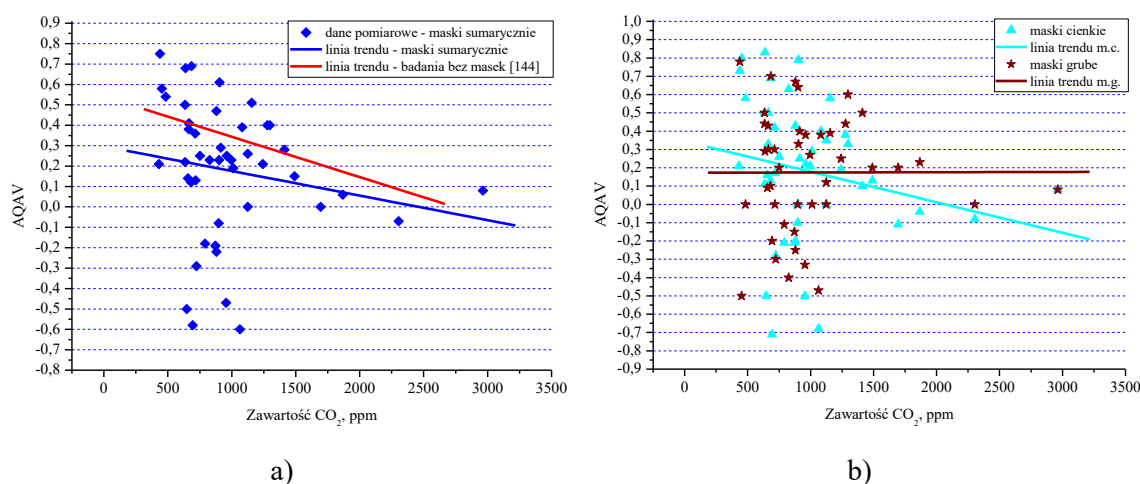
Rys. 15. Ocena jakości powietrza na podstawie ankiet wg podziału na płeć dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: bardzo zła, -1: zła, 0: ani dobra ani zła, +1: dobra, +2: bardzo dobra

W ogólnej ocenie jakości powietrza (Rys. 15a), okazało się że dla 56,77% kobiet i 49,18% mężczyzn to powietrze jest „ani dobre ani złe” (0). Co więcej, około 33% mężczyzn i 25% kobiet oceniła jakość powietrza jako „dobrą” (+1), a „bardzo dobrą” (+2) wybrało odpowiednio 2,10% oraz 1,50%. Więcej kobiet zdecydowało się na ocenę jakości powietrza jako „złą” (-1) – 15,41%, niż mężczyzn – 11,09%, natomiast mężczyźni (2,25%) wybierali częściej odpowiedź „bardzo zła” (-2) jakość powietrza niż kobiety – 1,32%.

²⁹ Air Quality Assessment Vote (ang.)

Mimo utrudnionej wymiany powietrza w wyniku noszenia masek, odsetek niezadowolonych był stosunkowo niewielki i znacząco mniejszy niż zadowolonych.

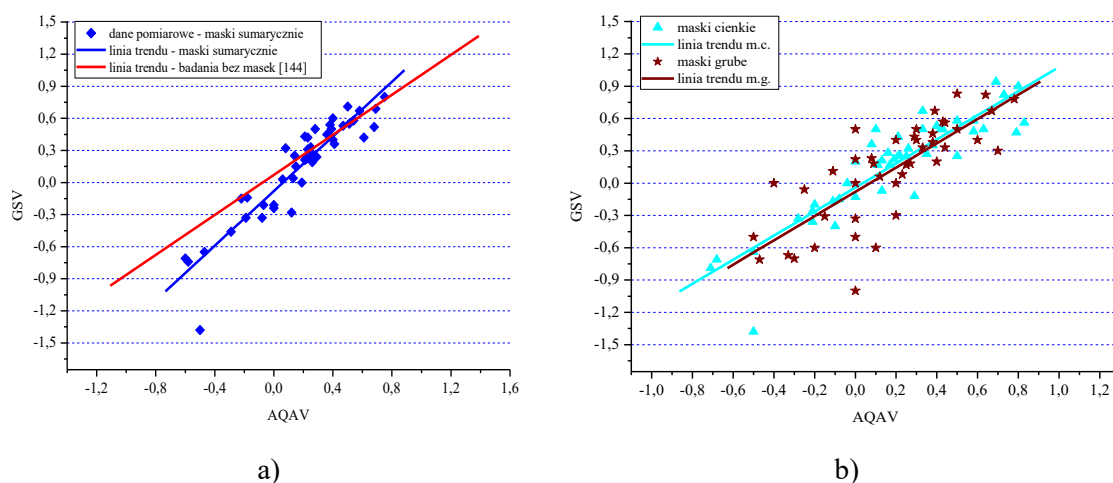
Poniżej przeprowadzono analizę zależności między stężeniem CO₂ a jakością powietrza AQAV na Rysunku 16.



Rys. 16. Zależność między zawartością CO₂ a subiektywną oceną jakości powietrza AQAV a) dla całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski wg. [144] oraz b) wg. podziału na rodzaj maski

Na Rysunku 16a zaobserwowano duży rozrzut średnich wartości AQAV względem stężenia CO₂ w poszczególnych pomieszczeniach (tak jak odbyło się to w przypadku zależności między wilgotnością względną, a oceną wilgotności względnej na Rys. 13a). Ponownie można tutaj odnieść się do wniosku, iż niemożliwa była właściwa ocena jakości powietrza w pomieszczeniu, ponieważ ankietowani nosili podczas pomiaru maski, co wiązało się z tym, że oceniali swój mikroklimat między twarzą a maską (w opracowaniu autora [64] wskazano, że maska jest źródłem gromadzenia się CO₂), a nie dwutlenku węgla jako parametru fizycznego (Baselga i inni [150] podali, że stężenie CO₂ w powietrzu wydychanym wynosi ok. 4% – czyli kilkadziesiąt razy więcej niż jego stężenie w pomieszczeniach). Co więcej zauważono, że jakość powietrza w przypadku noszenia masek została lepiej oceniona (Rys. 16a) niż w porównaniu do badań bez masek. Współczynnik determinacji dla zależności CO₂ – AQAV (Rys. 16a) wyniósł $R^2 = 0,03$, a więc brak jest zależności, choć linia trendu wskazuje, że im wyższe CO₂ tym ocena jakości powietrza była coraz niższa, co jest dosyć logiczne. Współczynnik R^2 oraz jego równanie dla Rysunków 16b – 17b przedstawiono w Załączniku 2.

Na Rysunku 17 zestawiono ze sobą wskaźniki AQAV oraz GSV³⁰, czyli ocenę ogólnego samopoczucia – określoną jako odpowiedź na pytanie w ankiecie „*Jak ogólnie czujesz się w tym pomieszczeniu?*”, a możliwe odpowiedzi to -2: bardzo źle, -1: źle, 0: obojętnie, +1: dobrze, +2: bardzo dobrze. Ten wskaźnik dokładniej zostanie omówiony również w podrozdziale 5.3.1.5. Poniższy rysunek przedstawia średnie wartości AQAV i GSV wg ankiet dla poszczególnych pomieszczeń.



Rys. 17. Zależności między jakością powietrza AQAV oraz GSV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski

Im wyższa ocena jakości powietrza, tym i lepiej oceniane było również samopoczucie w maskach (Rys. 17a). Porównanie z wynikami badań bez masek (wg. [144]) potwierdza taki sam charakter zależności, jednak w badaniach bez masek subiektywne odczucia ogólnego samopoczucia były wyższe przy niskich ocenach jakości powietrza niż dla badań z użyciem masek. Poniżej przedstawiono obliczony współczynnik determinacji dla zależności AQAV – GSV (Rys. 17a) wynoszący $R^2 \approx 0,86$, przy korelacji:

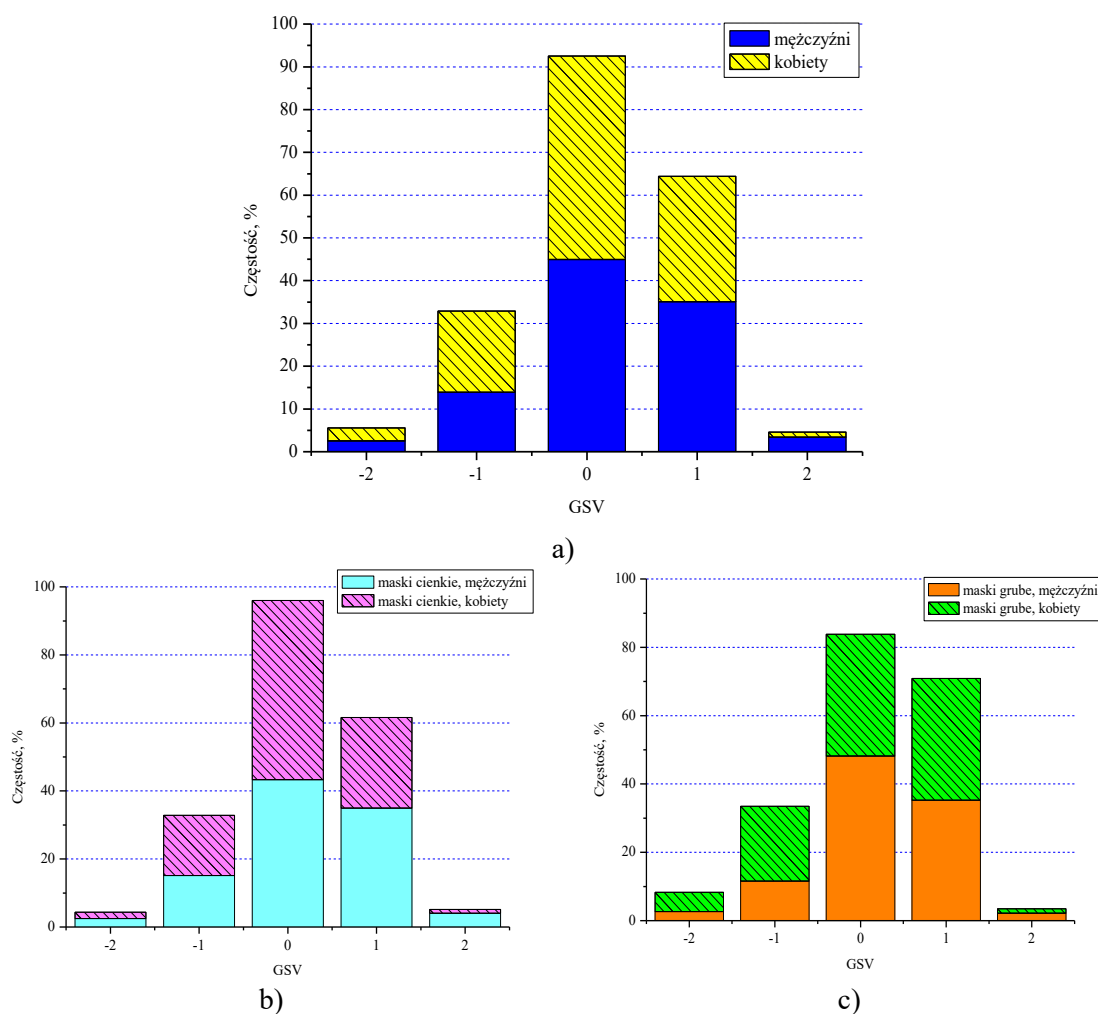
$$GSV = 1,2755AQAV - 0,0807 \quad (21)$$

Jednocześnie linie trendu na Rys. 17b (badania dla dwóch różnych rodzajów masek) niemal pokrywają się, co świadczy jednoznacznie o takich samych odczuciach ankietowanych bez względu na rodzaj maski. Wyniki GSV dla maski cienkiej są nieznacznie powyżej tych dla maski grubej, co może świadczyć o wyższej ocenie ogólnej samopoczucia w maskach cienkich.

³⁰ General Sensation Vote (ang.)

5.3.1.5 Ogólne odczucia osób w pomieszczeniach (GSV)

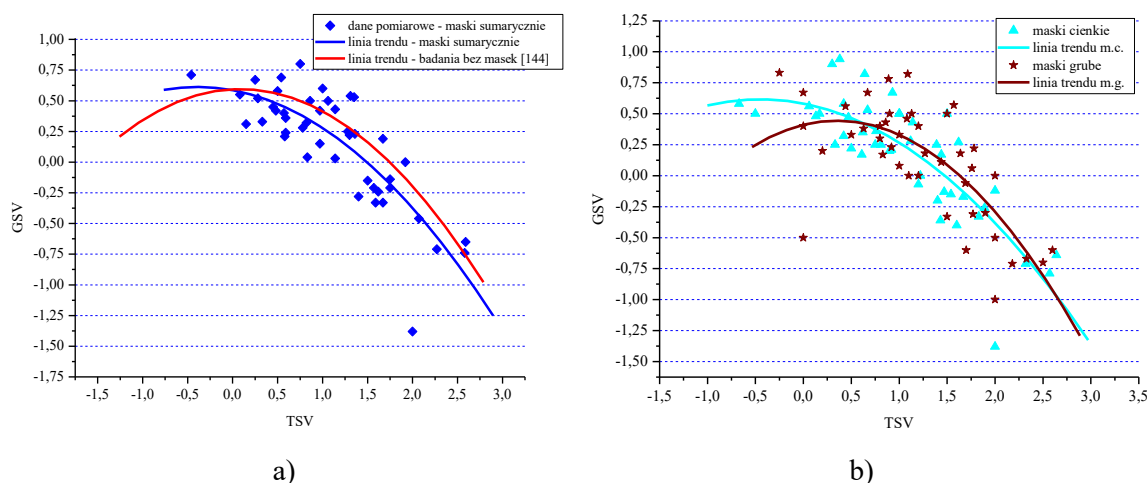
Jak już wspomniano w podrozdziale 5.3.1.4, GSV oznacza ocenę ogólnego samopoczucia. Wartości dodatnie informują o „dobrym” i „bardzo dobrym samopoczuciu”, 0 o „obojętnym samopoczuciu” oraz wartości ujemne jako „złe” i „bardzo złe” samopoczucie. Na Rysunku 18 przedstawiono rozkład odpowiedzi ankietowanych w rozbiciu na płeć.



Rys. 18. Ocena ogólnego samopoczucia GSV na podstawie ankiet wg płci dla: a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube

Ogólne samopoczucie w maskach wyrażone jako „obojętne” (0) zaznaczyło 44,98% mężczyzn oraz 47,56% kobiet – oba wyniki znacząco nie odbiegają od siebie (Rys. 18a). Co więcej, 35,08% mężczyzn zadeklarowało, że ich samopoczucie jest „dobre” (+1), podczas gdy dla kobiet było to niespełna 30%. Znalazły się również osoby, które czuły się „bardzo dobrze” (+2) w badanych salach – 3,45% mężczyzn oraz 1,13% kobiet. Niemniej jednak, blisko 20% badanych kobiet podkreśliła, że w maskach ich samopoczucie jest „złe”

(-1) – taką samą odpowiedź zaznaczyło około 14% badanych mężczyzn. „Bardzo złe” (-2) samopoczucie doświadczyło 2,55% mężczyzn oraz 3,01% kobiet. Istotna jest jednak zależność między ogólnymi odczuciami w pomieszczeniu a oceną termiczną. Zależność między TSV a GSV zaprezentowano na Rysunku 19.



Rys. 19. Zależność między wrażeniami cieplnymi TSV a GSV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski

Otrzymane i zestawione ze sobą średnie odpowiedzi z każdego badania TSV oraz GSV, wskazują, że wraz ze wzrostem TSV (optimum to $0 \pm 0,5$ [31]) GSV maleje, co dowodzi pogorszenia samopoczucia ankietowanych (Rys. 19a). W niniejszych badaniach nie odnotowano TSV silnie ujemnego, stąd taki przebieg krzywej aproksymującej, jednak w badaniach bez masek [144] w obszarze ujemnych wartości TSV również GSV maleje (Rys. 19a). Rys. 19b wskazuje, że optymalna wartość TSV dla badań w masce cienkiej to ok. -0,47, a w masce grubej ok. +0,45. Współczynnik determinacji dla zależności TSV – GSV (Rys. 19a) wynosi $R^2 = 0,68$, przy korelacji:

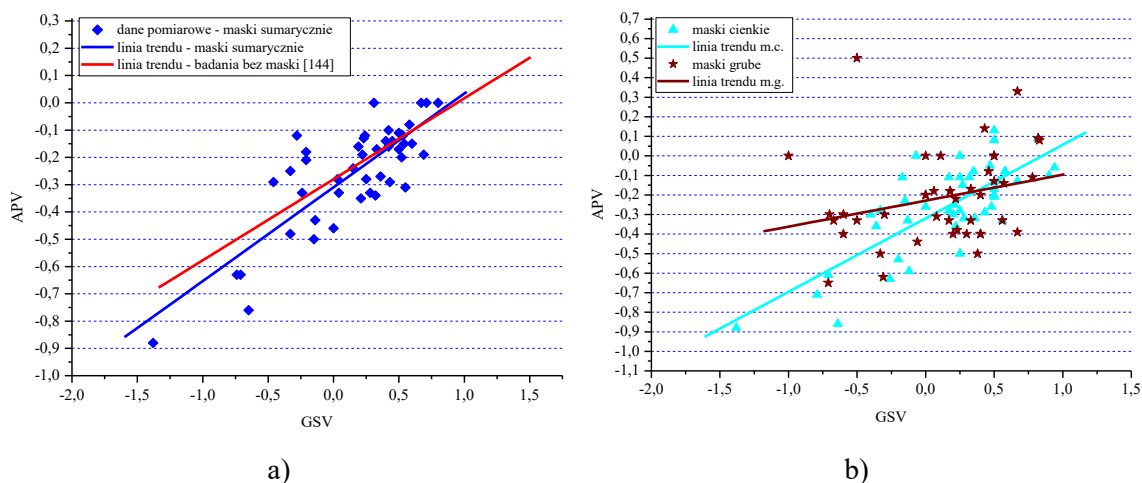
$$GSV = -0,1708TSV^2 - 0,1389TSV + 0,5869 \quad (22)$$

Załącznik 2 przedstawia R^2 oraz jego równanie dla Rysunków 19b – 20b.

Rysunek 20 przedstawia zależność pomiędzy subiektywnym ogólnym samopoczuciem GSV oraz subiektywną oceną produktywności (przyswajania wiedzy) APV³¹ ankietowanych. Przy niekorzystnych warunkach środowiska wewnętrznego można spodziewać się spadku produktywności np. gdy odczuwa się zbyt ciepło lub zbyt zimne środowisko, lub pojawiają się nadmierne potliwości, suchość w gardle itp. – to może mieć

³¹ Assessment Productivity Vote (ang.)

to wpływ na proces koncentracji i przyswajania wiedzy. APV określono pytając „*Jak oceniasz swoją aktualną produktywność (zdolność do przyswajania wiedzy)?*”.



Rys. 20. Zależność między ogólnym samopoczuciem GSV a APV dla a) całości badań w maskach bez podziału na rodzaj i badań bez maski wg. [144] oraz b) wg. podziału na rodzaj maski

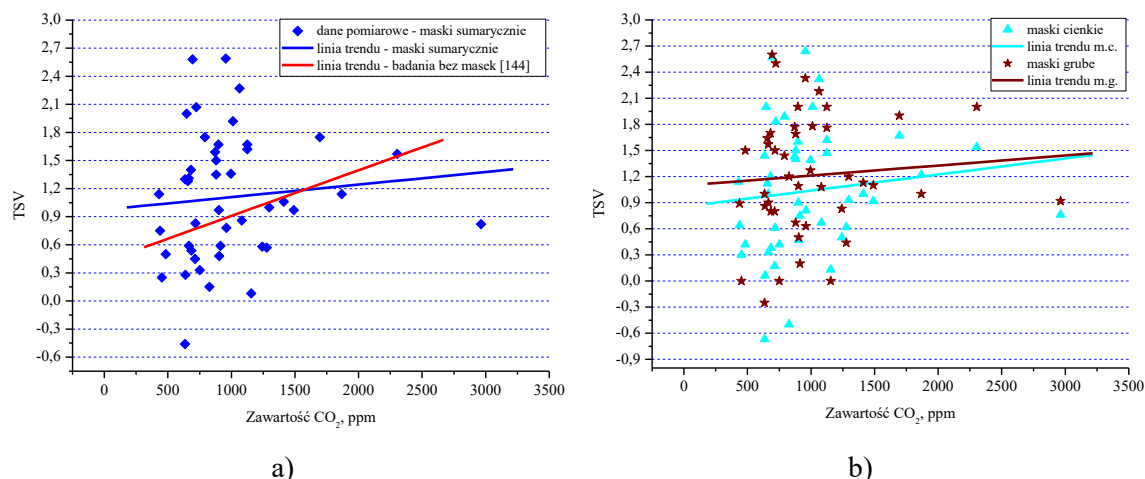
Wraz ze wzrostem GSV, APV również wzrastało (Rys. 20a), co potwierdza powyższe przypuszczenia. Charakter zmian dla badań bez masek jest taki sam. Współczynnik determinacji dla zależności GSV – APV równy jest $R^2 = 0,66$, przy korelacji:

$$APV = 0,3438GSV - 0,3096 \quad (23)$$

Istnieje umiarkowana zależność, jednak do precyzyjniejszej oceny przydałaby się jeszcze większa ilość badań. Szczególnie, że ocena produktywności miała charakter samooceny, a nie wiązała się z realizacją jakiegoś zadania i na podstawie jego wyników – w sposób obiektywny – oceniana byłaby produktywność/zdolność przyswajania wiedzy.

5.3.1.6 Wpływ CO₂ na wrażenia termiczne

Autorzy różnych prac zwracają uwagę, że dwutlenek węgla ma wpływ na wrażenia termiczne. Podjęto analizę tych dwóch parametrów, czyli zawartość CO₂ względem średnich odpowiedzi TSV. Na Rysunku21 zobrazowano średnie wartości TSV w funkcji zawartości CO₂ i wynikająca z nich zależność.



Rys. 21. Zależność między zawartością CO₂ a średnimi wartościami TSV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski

Podczas analizy Rys. 16a (zależność między CO₂ a AQAV), zwrócono uwagę na rozrzut wyników. Na Rysunku 21a również obserwuje się taki rozrzut. W tym przypadku również należy zaznaczyć, że parametry powietrza pod maską są inne niż w pomieszczeniu, stąd trudno mówić o zależności między zawartością CO₂ w pomieszczeniu a TSV (współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,0091$, natomiast dla Rysunku 21b dane linii trendu przedstawiono w Załączniku 2).

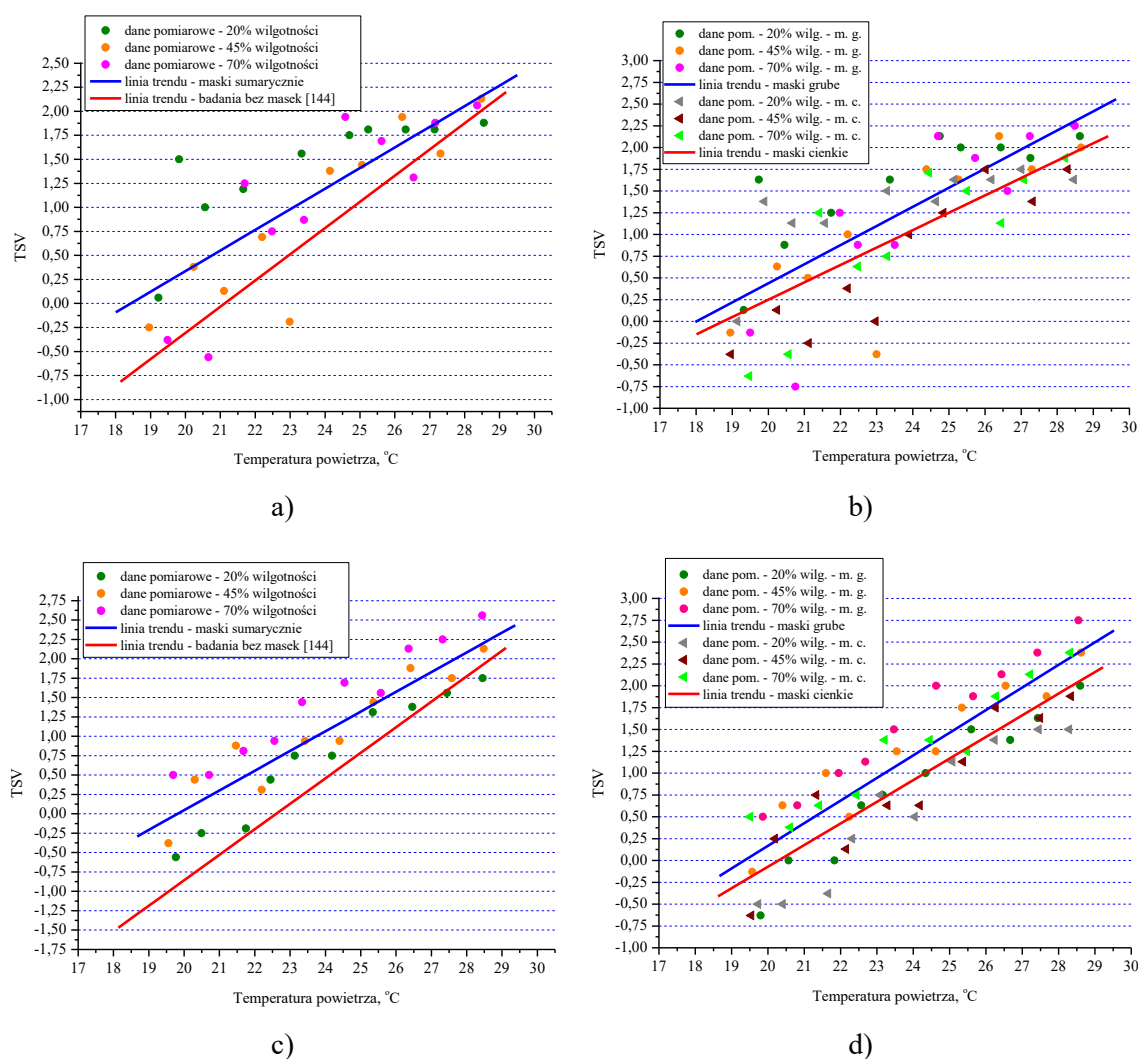
5.3.2 Badania w komorze klimatycznej

W badaniach uczestniczyło każdorazowo 8 ochotników (w ubiorze letnim i/lub zimowym). Temperatura powietrza wynosiła od około: 19°C do 28°C (krok co 1°C), a wilgotność względna około: 20%, 45% i 70%.

5.3.2.1 Wrażenia termiczne (TSV), akceptowalność (TAV) i preferencje (TPV) użytkowników

W podrozdziale 5.3.2.1, w pierwszej kolejności zostaną omówione wrażenia termiczne TSV, następnie akceptowalność temperaturowa TAV oraz preferencje temperatury TPV. Rysunek 22 przedstawia średnie TSV (na podstawie ankiet wypełnionych przez ośmiu respondentów) dla każdej zadanej temperatury podczas noszenia masek dla ubioru a) zimowego; c) letniego oraz dla trzech wilgotności: 20%, 45%, 70%. Dodatkowo na wykresie zaprezentowano linię dopasowania wyników badań bez masek (również prowadzonych w komorze klimatycznej dla 8 –o osobowej grupy przy takich samych warunkach, z wykorzystaniem tego samego sprzętu pomiarowego

i metodyki [144]) oraz podział masek na ich rodzaj (maski cienkie i grube) ubrania zimowego/letniego. Wszystkie równania dotyczące Rys. 22b i d – 25b i d zaprezentowano w Załączniku3. Dodatkowo wykonano wykresy oraz przedstawiono współczynniki determinacji wraz z równaniami dla danych z Rysunków 22 – 25 z podziałem na ubiór, rodzaj maski oraz oddzielnie badaną wilgotność 20%, 45% oraz 70%, którą prezentują Załączniki 4 – 11.



Rys. 22. Wrażenia termiczne TSV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube

Wraz ze wzrostem temperatury powietrza rośnie liniowo średnia z wrażeń termicznych. Takie same obserwacje poczynili inni autorzy [69, 77]). Należy jednak zwrócić uwagę, iż linia trendu dla wyników badań w maskach znajduje się zawsze powyżej linii trendu dla badań bez masek [144] – szczególnie w zakresie niższych temperatur. Zatem

osoby, które korzystają z masek, przy tej samej temperaturze powietrza, określają swoje odczucia termiczne jako cieplejsze. Potwierdza to wyniki badań z poprzedniej części pracy, dotyczącej sal dydaktycznych. Im wyższa temperatura, tym ocena termiczna TSV jest już na tyle wysoka bez masek, że dodatkowy element w postaci maski wpływa na odczucia ankietowanych w coraz mniejszym stopniu. W konsekwencji obie linie regresji (dla badań z maskami i bez) zbliżają się do siebie. Współczynnik determinacji R^2 dla badań z maskami sumarycznie (cienkie i grube) wynosi (Rys. 22a oraz Rys. 22c):

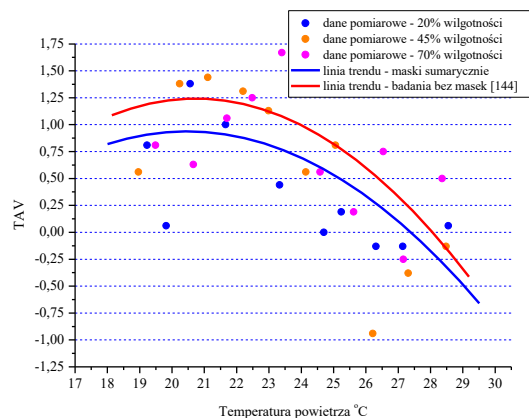
a) ubiór zimowy $R^2 = 0,63$, przy korelacji:

$$TSV = 0,2146TP - 3,9551 \quad (24)$$

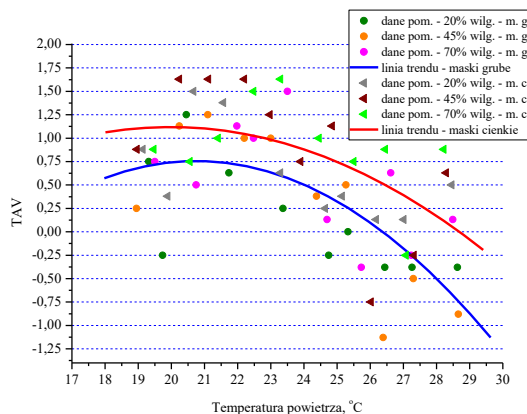
b) ubiór letni $R^2 = 0,80$, przy korelacji:

$$TSV = 0,2544TP - 5,0406 \quad (25)$$

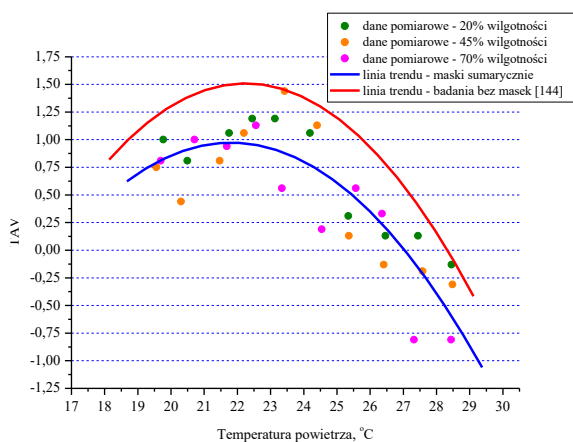
Zależność akceptowalności temperatury od temperatury powietrza przedstawiono na Rysunku 23, uwzględniając podział na ubiór a) zimowy, c) letni z wykorzystaniem badań bez masek wg. [144] oraz na podstawie podziału na rodzaj maski – cienkiej i grubej – uwzględniając ubiór b) zimowy, d) letni.



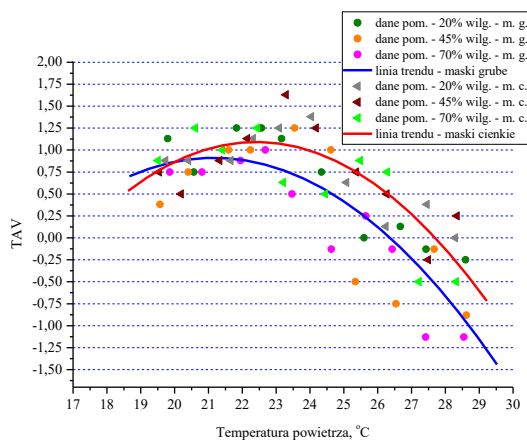
a)



b)



c)



d)

Rys. 23. Akceptowalność temperatury TAV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru
a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube,
c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube

Negatywne wartości TAV dotyczyły odpowiedzi w ankiecie oznaczone jako „nieakceptowalna” (-1) lub „zdecydowanie nie do zaakceptowania” (-2) i pojawiały się w sytuacji, gdy temperatura powietrza przekraczała około 26°C w przypadku badań z maskami. Linia trendu dla badań, gdy respondenci nie nosili masek (wg [144]) była zawsze powyżej linii trendu dla badań z wykorzystaniem masek. Zatem przy takiej samej temperaturze powietrza ich odczucia komfortu były wyższe (czyli w kierunku „akceptowalna”/ „zdecydowanie do zaakceptowania”). Obliczona determinacja zależności TAV – TP wyniosła (Rys. 23a oraz Rys. 23c):

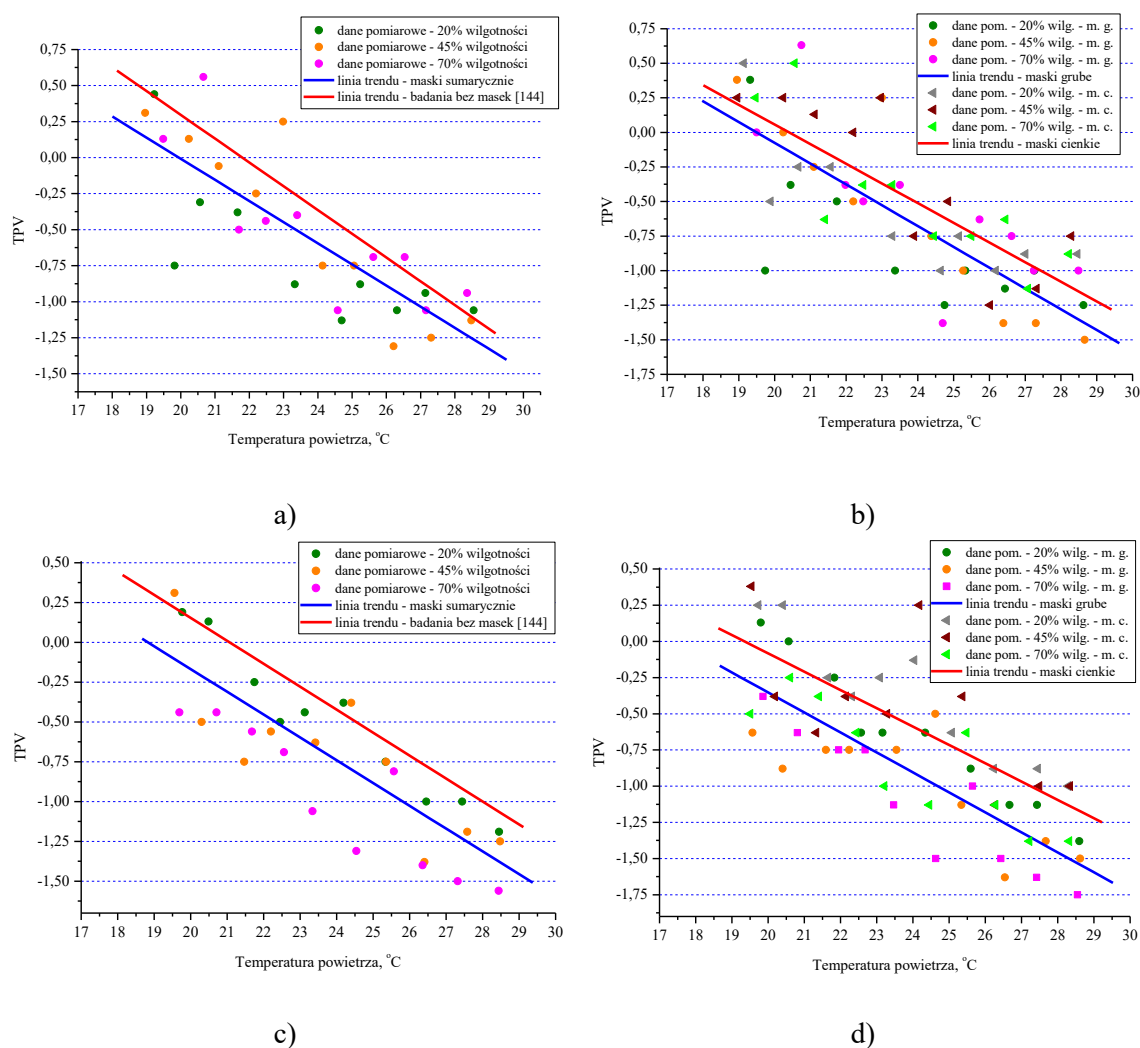
a) ubiór zimowy $R^2 = 0,43$, przy korelacji:

$$TAV = -0,0195TP^2 + 0,7977TP - 7,2218 \quad (26)$$

b) ubiór letni $R^2 = 0,75$, przy korelacji:

$$TAV = -0,0355TP^2 + 1,5501TP - 15,929 \quad (27)$$

Na Rysunku 24 zostały przedstawione wyniki związane z preferencjami cieplnymi – TPV, tj. czy osoby deklarowały chęć zmiany temperatury w kierunku chłodniejszej lub cieplejszej, bądź pozostawienie jej bez zmian. Wyniki przedstawiono w rozbiu na ubiór a) zimowy i c) letni wraz z wynikami badań bez masek wg. [144] oraz z uwzględnieniem rodzaju maski – cienkiej i grubej z podziałem na ubiór b) zimowy, d) letni.



Rys. 24 Preferencja temperatury TPV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube

Wraz ze wzrostem temperatury ankietowani chcieliby jej obniżenia, co jest zrozumiałe. Dotyczy to badań w maskach i bez, natomiast linie trendu dla badań wykonywanych, gdy ankietowani nie nosili masek były zawsze powyżej linii trendu dla

badan z wykorzystaniem masek. Na przykład w przypadku ubioru zimowego wartość TPV = -1 (czyli respondenci chcą, aby było chłodniej) pojawia się przy temperaturze powietrza 27,8°C dla badań bez maski, natomiast dla badań w masce ma to miejsce już przy temperaturze 26,5°C. Zatem respondenci przy temperaturze niższej o 1,3°C odczuwają dyskomfort i chcą, aby temperatura powietrza była niższa. Podobnie dla ubioru letniego: TPV = -1 jest rejestrowane przy temperaturze powietrza 28°C w przypadku badań bez masek i 25,5°C w przypadku pomiarów w maskach. Potwierdza to lepszą akceptowalność wyższych temperatur w sytuacji, gdy respondenci nie noszą masek. Poniżej zaprezentowano R^2 i korelację dla ubioru a) zimowego oraz c) letniego.

Obliczona determinacja zależności TPV – TP wyniosła (Rys. 24a oraz Rys. 24c):

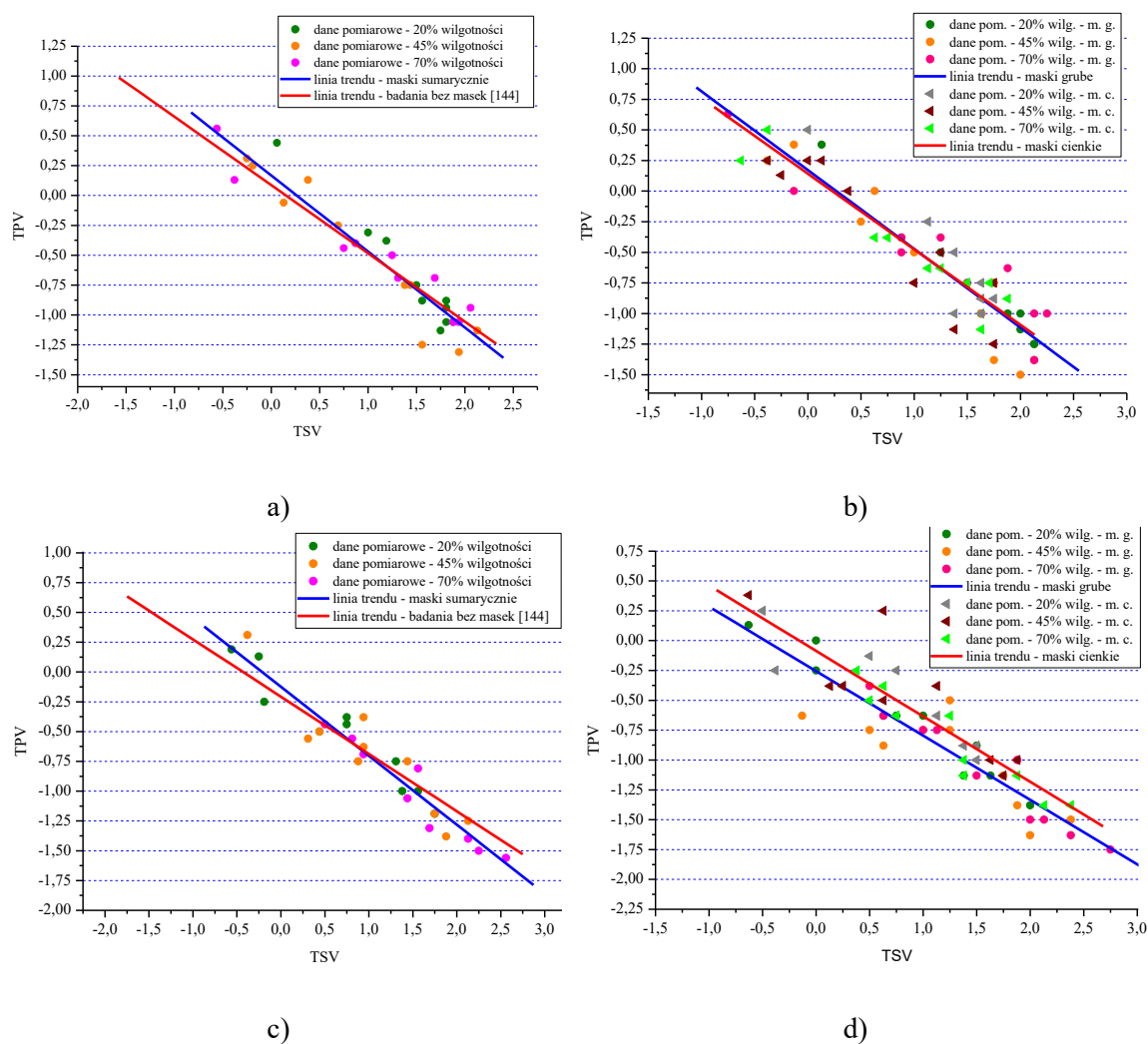
a) ubiór zimowy $R^2 = 0,67$, przy korelacji:

$$TPV = -0,1466TP + 2,924 \quad (28)$$

b) ubiór letni $R^2 \approx 0,70$, przy korelacji:

$$TPV = -0,1431TP + 2,6952 \quad (29)$$

W ostatniej fazie analizy wyników badań z komory zostanie przedstawiona zależność między TSV – TPV, zobrazowana na Rysunku 25 dla ubioru a) zimowego i c) letniego (dodatkowo z wynikami badań bez masek na podst. [144]) oraz według typu masek – cienkiej i grubej – również z uwzględnieniem ubioru na b) zimowy, d) letni.



Rys. 25. Zależność między TSV a TPV dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube

Charakter zależności TSV – TPV jest taki sam jak w przypadku badań w salach dydaktycznych. Natomiast różnice między wynikami uzyskanymi w komorze dotyczące badań w maskach i bez, koncentrują się na różnej wartości tangensa kąta pochylenia linii regresji. W przypadku badań z maskami przy $TSV > 0$ (a takich jest przeważająca większość) wartości TPV (reprezentowana przez linię trendu) są generalnie niższe niż w przypadku badań bez masek. Można to wytłumaczyć w ten sposób, że w przypadku takiej samej oceny środowiska (np. $TSV = +2$ czyli nieprzyjemnie "gorąco") osoby noszące maski i strój letni, chciałoby, aby było bardziej chłodno ($TPV = -1,25$) niż osoby nie noszące masek ($TPV = -1,15$). To jest zrozumiałe, gdyż maska stanowi dodatkowe źródło dyskomfortu i utrudnia chłodzenie się organizmu (zarówno na drodze jawnej jak i utajonej).

Obliczona determinacja zależności TSV – TPV wyniosła (Rys. 25a oraz Rys. 25c):

a) ubiór zimowy $R^2 = 0,91$, przy korelacji:

$$TPV = 0,223TSV - 4,0949 \quad (30)$$

b) ubiór letni $R^2 \approx 0,92$, przy korelacji:

$$TSV = 0,223TP - 4,0949 \quad (31)$$

5.3.3 Porównanie wskaźników PMV i PPD wg modelu Fanger'a z danymi eksperymentalnymi

Do modyfikacji modelu Fanger'a będą brane pod uwagę dane z sal dydaktycznych ze względu na licznosc grup. Uśrednione wyniki dla każdej grupy (pomieszczenia) pochodzą od większej liczby osób (maksymalnie 49 osób w jednej sali, a średnio 26,6), czyli wyraźnie więcej niż 8 osób w komorze. Badania te zostaną wykorzystane do modyfikacji modelu, a dane otrzymane z komory klimatycznej posłużą do jego weryfikacji.

Do analizy statystycznej wykorzystano dane TSV z badań bez masek (wg. [144]) oraz dane TSV otrzymanego z podziału na rodzaj maski – cienkiej i grubej – względem temperatury operatywnej oraz temperatury powietrza. W przeprowadzonej analizie przyjęto poziom istotności statystycznej $\alpha = 0,05$.

W celu oszacowania wartości TSV dla masek o różnych grubościach, przeprowadzono analizę dla tych samych wartości ($n = 92$) temperatury operacyjnej oraz temperatury powietrza, przy których wcześniej oceniano TSV bez użycia maski zgodnie z równaniem (32).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot T \quad (32)$$

Gdzie:

β_0 oraz β_1 – odpowiednio dla wartości stałej i nachylenia modeli regresji obliczające TSV dla masek cienkich i grubych;

T – wartości temperatury operacyjnej (lub powietrza) dla modelu z brakami masek;

$\hat{Y}$ – wartość TSV bez korekty na wariancje oraz błąd dopasowania modelu oryginalnego.

W następnym kroku oszacowano poziom wariancji $\sigma^2 \hat{Y}$ z dalszą korektą na poziom współczynnika determinacji R^2 dla modeli z maskami zgodnie ze wzorem (33).

$$\sigma_Y^2 = \frac{\sigma_{\hat{Y}}^2}{R^2} \quad (33)$$

Następnie za pomocą wzoru (34) oszacowano odchylenie standardowe błędu dopasowania σ_ε dla modeli z maskami.

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_Y^2 - \sigma_{\hat{Y}}^2} \quad (34)$$

Symulacja błędu dopasowania została przeprowadzona przy założeniu, że jego rozkład jest normalny, zgodnie z równaniem (35).

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon) \quad (35)$$

Na koniec wartości TSV dla cienkich i grubych masek Y oszacowano za pomocą równania (36).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \varepsilon \quad (36)$$

Ocena istotności różnic TSV w przypadku trzech grup (brak maski, maski cienkie oraz maski grube) przeprowadzono w oparciu o nieparametryczny test ANOVA (test wariancji) Kruskala – Wallisa (wykorzystywany do wskazywania różnic między grupami, gdy jest ich co najmniej trzy) [151]. Oszacowanie wielkości efektu dokonano z zastosowaniem miary. Istotność pomiędzy poszczególnymi parami grup obliczono z zastosowaniem testu post – hoc Dunna z korektą wartości p (p_{adj}) na porównanie wielokrotne z użyciem metody Holma [152].

Przeprowadzony test ANOVA Kruskala – Wallisa wykazał, że TSV w przypadku braku masek był istotnie mniejszy zarówno w porównaniu do TSV dla masek cienkich jak i masek grubych. Wartość p w obu przypadkach była bardzo istotna, $p_{adj} < 0,001$ (dot. badania bez masek i masek cienkich oraz badania bez masek i masek grubych). Jednocześnie nie wykazano istotnych różnic w TSV pomiędzy typami masek. Wyniki testu zostały przedstawione w Tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki testu Kruskala – Wallisa dla badań bez masek [144], masek cienkich i masek grubych

Kategoria	Mdn (Q1, Q3)
Brak masek	0,74 (0,38, 1,31)
Maski cienkie	1,19 (0,75, 1,71)
Maski grube	1,32 (0,82, 1,76)

Podobnie jak w wyżej omówionym przypadku (TSV – temperatura operatywna), przeprowadzono test ANOVA Kruskala – Wallisa dla TSV i temperatury powietrza, który wykazał, że TSV dla badań bez masek było istotnie mniejsze w porównaniu do TSV dla masek cienkich, jak i masek grubych. Wartość p dla badań bez masek i masek cienkich oraz badań bez masek i masek grubych była tak samo bardzo istotna, $p_{adj} < 0,001$. Dodatkowo, nie wykazano istotnych różnic statystycznych TSV pomiędzy maskami cienkimi i grubymi. Wyniki testu zostały przedstawione w Tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki testu Kruskala – Wallisa dla badań bez masek [144], z maskami cienkimi i maskami grubymi

Kategoria	Mdn (Q1, Q3)
Brak	0,74 (0,38, 1,31)
Maski cienkie	1,14 (0,79, 1,63)
Maski grube	1,43 (0,97, 1,77)

W celu weryfikacji otrzymanej analizy statystycznej, dodatkowo przeprowadzono analizę statystyczną T – studenta (przyjęto poziom istotności statystycznej $\alpha = 0,05$), która potwierdziła analizę otrzymaną z metody Kruskala – Wallisa, iż nie ma statystycznej istotności między maską cienką, a maską grubą. Wyniki przedstawiono w Załączniku 12 oraz Załączniku 13.

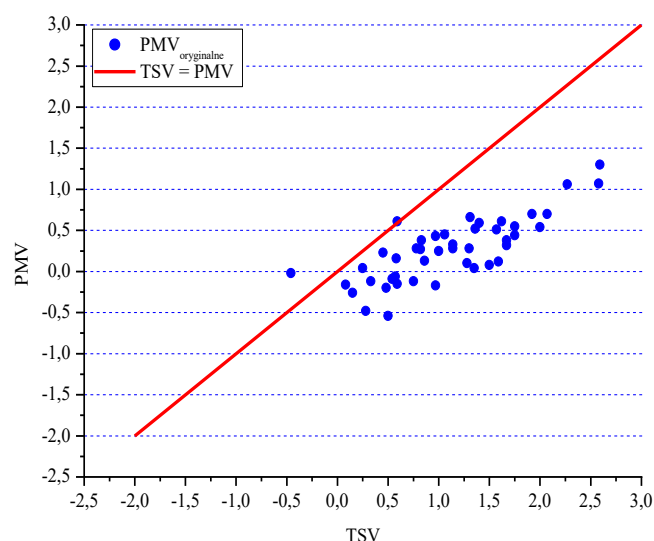
Wykonane badania eksperymentalne pozwoliły na uzyskanie obszernych danych tj. rzeczywistych odczuć cieplnych użytkowników pomieszczeń (wg. ankiet) i parametrów mikroklimatu w poszczególnych 45 pomieszczeniach. Porównanie średnich odpowiedzi TSV oraz APPD³² z anonimowych kwestionariuszy względem PMV oraz PPD obliczonych za pomocą wzoru Fanger [10, 31] (z uwzględnieniem maski jako dodatkowej części ubioru o oporze cieplnym równym 0,111 clo dla osób noszących maskę cienką oraz 0,098 clo dla osób noszących maskę grubą – na podstawie [62, 145], przedstawiono w Tabeli 7 i na Rysunku 26 (prosta PMV = TSV określa linię idealnego odwzorowania rzeczywistości za pomocą modelu).

³² APPD – na potrzeby pracy stworzono nowy symbol, który charakteryzuje procent osób niezadowolonych z ankiet

Tabela 7. Porównanie wskaźników wrażeń termicznych TSV, PMV oraz odsetka osób niezadowolonych APPD oraz PPD

Lp.	Liczba osób w pomieszczeniu	Wskaźnik			
		TSV	PMV	APPD, %	PPD, %
1	20	0,75	-0,12	20	5
2	49	0,08	-0,16	20	6
3	39	1,36	0,52	44	11
4	13	1,31	0,66	38	14
5	40	0,78	0,28	33	7
6	12	1,67	0,38	67	8
7	31	0,48	-0,20	13	6
8	34	0,97	0,43	29	9
9	48	0,58	0,16	38	6
10	26	0,54	-0,09	15	5
11	22	0,59	0,61	9	13
12	28	0,86	0,13	29	5
13	24	-0,46	-0,02	17	5
14	25	0,28	-0,48	16	10
15	13	0,15	-0,26	23	6
16	27	1,30	0,28	41	7
17	35	0,57	-0,06	11	5
18	26	0,50	-0,54	19	11
19	28	1,75	0,44	75	9
20	26	1,92	0,70	73	15
21	12	0,25	0,04	17	5
22	28	1,75	0,55	79	11
23	24	0,83	0,38	33	8
24	24	0,33	-0,12	21	5
25	46	1,50	0,08	52	5
26	36	1,28	0,10	47	5
27	17	2,59	1,30	94	40
28	14	1,14	0,33	43	7
29	21	1,62	0,61	52	13
30	22	0,45	0,23	5	6
31	17	0,59	-0,15	35	5
32	27	1,59	0,12	59	5
33	43	1,67	0,32	65	7
34	8	2,00	0,54	88	11
35	19	2,58	1,07	100	29
36	25	1,40	0,59	56	12
37	28	2,07	0,70	71	15
38	48	2,27	1,06	85	29
39	20	1,00	0,25	30	6
40	18	1,06	0,45	33	9
41	31	0,97	-0,17	32	6

42	14	1,57	0,51	64	10
43	17	1,35	0,04	47	5
44	38	0,82	0,27	39	6
45	36	1,14	0,28	56	7



Rys. 26. TSV vs PMV, wraz z linią idealnego odwzorowania modelu

Analizując dane z Tabeli 7, należy zwrócić uwagę, że model Fanger'a (PMV) w porównaniu do średnich wrażeń termicznych z kwestionariuszy (TSV), zaniża wrażenia cieplne ludzi względem ich realnych odczuć (tak jak w badaniach [82, 91, 144]). Co więcej, takie zjawisko również zostało zaobserwowane w przypadku osób niezadowolonych (PPD) względem APPD. Wniosek jaki się z tego tytułu nasuwa, jest taki, że model nie potrafi prawidłowo przewidzieć rzeczywistych wrażeń cieplnych przez ludzi noszących maski i należy go zmodyfikować.

5.3.4 Modyfikacja wskaźników PMV oraz PPD

Nałożenie na twarz maski ochronnej powoduje nieznaczne zwiększenie oporu cieplnego odzieży, co jednak zostało uwzględnione w obliczeniach w Tabeli 7 i na Rysunku 26. Jednak ma to bardzo niewielki wpływ na uzyskane wyniki PMV. O wiele istotniejszy wydaje się być fakt, że nałożenie maski na twarz powoduje zwiększenie oporu przepływu powietrza z zewnątrz do płuc i odwrotnie, czyli wymusza intensywniejszą pracę organizmu w celu pokonania tych oporów. To wpływa na zmianę tempa metabolizmu, który jest istotnym elementem wzoru na PMV.

Samo pojęcie tempa metabolizmu oznacza ilość energii jaka jest zużywana podczas spoczynku lub aktywności fizycznej w ciągu dnia czy w nocy. Aktywność metaboliczna jest dzielona na pracę mechaniczną oraz produkcję ciepła. W zależności od wybranego rodzaju zadania/ pracy, produkcja ciepła musi być tak rozpraszana by cały czas to ciepło było utrzymywane w równowadze, czyli aby temperatura ciepła utrzymywała się na stałym poziomie.

W pracy [96] badano zmiany zachodzące w tempie metabolizmu u osób noszących maski. Na podstawie danych tam zawartych określono, że osoby noszące maski ochronne mają wyższe tempo metabolizmu. W związku z tym – na podstawie wyników badań eksperymentalnych [96] – odpowiednio zwiększono tempo metabolizmu dla osób noszących maski o współczynnik 1,197 i taką zapisano w zmodyfikowanym wzorze. Dodatkowo zaproponowano nowe wartości stałych eksperymentalnych w stosunku do oryginalnego wzoru (13). Po modyfikacjach wzór na PMV przyjmuje następującą postać:

$$PMV = [0,55 \cdot \exp(-0,036 \cdot 1,197M) + 0,052] \cdot \left\{ \begin{aligned} & (1,197M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (1,197M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(1,197M - W) - 58,15] \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 1,197M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot 1,197M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} + t_a) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

5.3.5 Weryfikacja zmodyfikowanego modelu

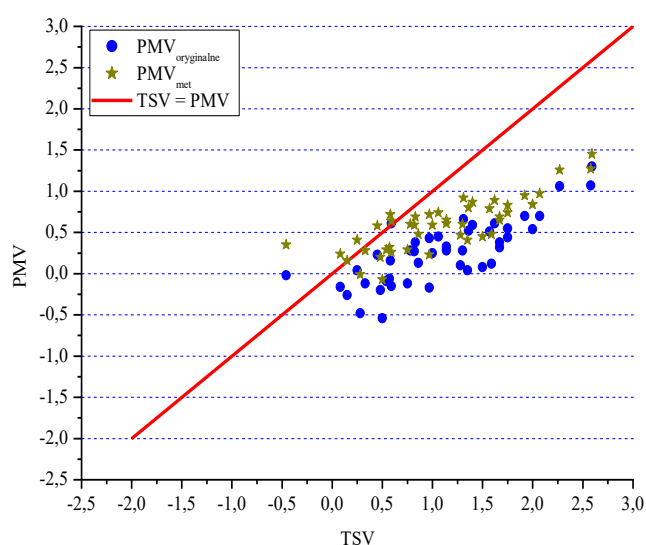
Zmodyfikowany wzór został wykorzystany do wyznaczenia wartości PMV dla 45 pomieszczeń, gdzie odbywały się badania. Prezentacja zmodyfikowanego modelu zostanie przedstawiona dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczone zostanie PMV_{met} (uwzględniające tylko element modyfikacji tempa metabolizmu przy zachowaniu stałych z modelu oryginalnego), a w drugim etapie uwzględniona zostanie całość zmian tj. zarówno dotyczących tempa metabolizmu jak i stałych (nazwane PMV_{modyf}). Zdecydowano się na taki podział, aby zobrazować jak zmieniały się otrzymane wyniki względem siebie, gdy podstawiano nowe wartości do wzoru. Tabela 8 prezentuje zestawienie TSV względem $PMV_{oryginalne}$, PMV_{met} , PMV_{modyf} .

Tabela 8. Zestawienie TSV z PMV oryginalnym oraz ze zmodyfikowanym (PMV_{met}) o wartość tempa metabolizmu oraz z uwzględniającym tempo metabolizmu i nowych stałych (PMV_{modyf})

Parametr					
Lp.	Liczba osób w pomieszczeniu	TSV	$PMV_{oryginalne}$	PMV_{met}	PMV_{modyf}
1	20	0,75	-0,12	0,29	0,54
2	49	0,08	-0,16	0,24	0,44
3	39	1,36	0,52	0,80	1,47
4	13	1,31	0,66	0,92	1,70
5	40	0,78	0,28	0,60	1,11
6	12	1,67	0,38	0,69	1,27
7	31	0,48	-0,20	0,20	0,38
8	34	0,97	0,43	0,72	1,32
9	48	0,58	0,16	0,72	1,32
10	26	0,54	-0,09	0,29	0,54
11	22	0,59	0,61	0,64	1,18
12	28	0,86	0,13	0,48	0,88
13	24	-0,46	-0,02	0,35	0,65
14	25	0,28	-0,48	-0,01	-0,03
15	13	0,15	-0,26	0,16	0,30
16	27	1,30	0,28	0,60	1,11
17	35	0,57	-0,06	0,32	0,59
18	26	0,50	-0,54	-0,07	-0,13
19	28	1,75	0,44	0,74	1,36
20	26	1,92	0,70	0,95	1,75
21	12	0,25	0,04	0,41	0,75
22	28	1,75	0,55	0,83	1,53
23	24	0,83	0,38	0,69	1,27
24	24	0,33	-0,12	0,28	0,51
25	46	1,50	0,08	0,45	0,83
26	36	1,28	0,10	0,47	0,86
27	17	2,59	1,30	1,45	2,68
28	14	1,14	0,33	0,65	1,21
29	21	1,62	0,61	0,89	1,64
30	22	0,45	0,23	0,58	1,06
31	17	0,59	-0,15	0,26	0,48
32	27	1,59	0,12	0,48	0,88
33	43	1,67	0,32	0,65	1,19
34	8	2,00	0,54	0,84	1,55
35	19	2,58	1,07	1,27	2,34
36	25	1,40	0,59	0,87	1,60
37	28	2,07	0,70	0,97	1,79
38	48	2,27	1,06	1,26	2,32
39	20	1,00	0,25	0,59	1,08
40	18	1,06	0,45	0,74	1,37
41	31	0,97	-0,17	0,23	0,43

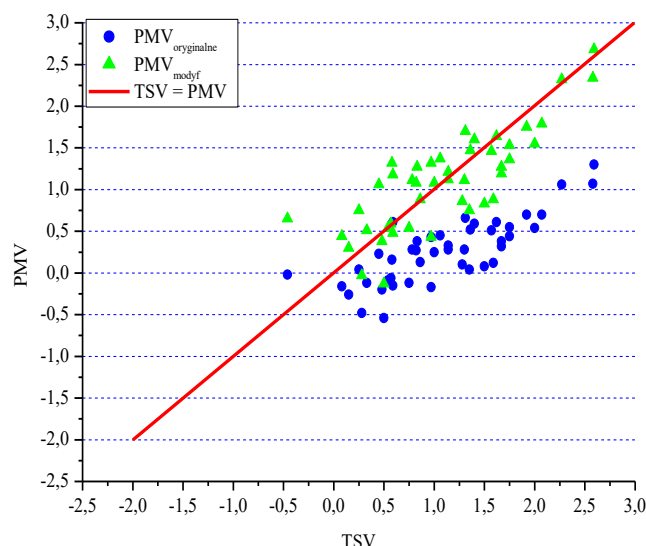
42	14	1,57	0,51	0,79	1,46
43	17	1,35	0,04	0,41	0,75
44	38	0,82	0,27	0,59	1,08
45	36	1,14	0,28	0,61	1,12

Porównując wartości TSV w trzeciej kolumnie do wartości PMV_{modyf} w ostatniej kolumnie, można zauważyć, że proponowane zmiany „przybliżyły” wyniki PMV do rzeczywistych wrażeń cieplnych (linia $TSV = PMV$). Aby lepiej zobrazować każdy etap modyfikacji, na Rysunku 27 oraz Rysunku 28 przedstawiono graficznie oryginalny model ze zmianą tempa metabolizmu, a następnie całość modyfikacji (tempa metabolizmu wraz z nowymi stałymi).



Rys. 27. Porównanie TSV i oryginalnego modelu PMV względem PMV_{met}

Zmiana tempa metabolizmu uwzględniająca fakt noszenia masek „przesunęła” wartości PMV w kierunku linii idealnego dopasowania ($TSV = PMV$). W związku z tym widać już, że proponowana pierwsza modyfikacja przyniosła poprawę i „przybliżyła” do siebie wartości PMV do TSV. Natomiast na Rysunku 28 przedstawiono model zmodyfikowany dodatkowo o nowe stałe eksperymentalne.



Rys. 28. Porównanie TSV i oryginalnego modelu PMV do PMV_{modyf} uwzględniającego nowe tempo metabolizmu oraz nowe wartości stałych

Po wprowadzeniu zmian w sposobie obliczenia metabolizmu osób noszących maski i zmianie dwóch wartości stałych na nowe, można zauważyć, że model dużo lepiej przewiduje wrażenia termiczne (punkty pomiarowe znajdują się wzdłuż linii idealnego dopasowania $TSV = PMV$). Oprócz graficznej interpretacji poniżej przedstawiono wyniki obliczeń zgodnie z klasyfikacją Shrout i Fleissa oraz Blanda i Altmana, które pokazują lepsze dopasowanie modelu zmodyfikowanego niż oryginalnego.

W ramach przeprowadzonej analizy statystycznej weryfikującej zaproponowaną modyfikację modelu, przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$. Zgodność między różnymi ocenami analizowano wykorzystując współczynnik zgodności wewnątrzklasowej (ICC), który stanowi mniej konserwatywne podejście do oceny spójności między ocenami. Użyto sześć różnych schematów eksperymentalnych ICC, zgodnie z klasyfikacją Shrout i Fleiss [153]. Te schematy obejmują: ICC1, ICC2, ICC3, ICC1k, ICC2k, ICC3k, które różnią się metodologią obliczania oraz założeniami dotyczącymi konsystencji i niezależności ocen. Takie podejście pozwala na szczegółowe zrozumienie różnic w zgodności ocen zależności pomiędzy TSV a PMV.

W celu dokładniejszej oceny zgodności pomiędzy subiektywnymi wrażeniami termicznymi (TSV) a PMV, zastosowano bardziej konserwatywne podejście metodologiczne, oparte na statystyce Blanda – Altmana [154, 155]. Analiza ta uwzględniała oszacowanie średnich wartości oraz różnic pomiędzy TSV a PMV, co umożliwiło ocenę

stronniczości pomiarowej. Dodatkowo, obliczono granice zgodności – LOA³³, błąd standardowy pomiaru – SEM³⁴ oraz przeprowadzono analizę proporcji. Badanie zakończono analizą modelu regresji liniowej, co pozwoliło na ocenę zależności i tendencji zmienności pomiędzy zmiennymi, zwiększając tym samym wiarygodność i dokładność oszacowań.

Przedstawiona Tabela 9 zawiera wyniki oceny zgodności pomiędzy TSV a PMV, przeprowadzonej na podstawie różnych schematów, w tym oryginalnego modelu Fanger'a oraz jego modyfikacji. Analiza zgodności została dokonana z użyciem współczynnika ICC, który został zastosowany w różnych konfiguracjach (ICC1, ICC2, ICC3, ICC1k, ICC2k, ICC3k) w celu oceny spójności między parametrami.

Tabela 9. Ocena zgodności pomiędzy TSV względem PMV_{oryginalne} oraz PMV_{modyf}

Typ	Model PMV	ICC	F	Df ₁	Df ₂	p	CI 95%
ICC1	Oryg.	0,08	1,20	44	45	0,310	-0,22 – 0,36
ICC1	Modyf.	0,81	9,30	44	45	< 0,001	0,67 – 0,89
ICC2	Oryg.	0,32	5,40	44	44	< 0,001	-0,09 – 0,67
ICC2	Modyf.	0,81	9,30	44	44	< 0,001	0,67 – 0,89
ICC3	Oryg.	0,69	5,40	44	44	< 0,001	0,50 – 0,82
ICC3	Modyf.	0,81	9,30	44	44	< 0,001	0,67 – 0,89
ICC1k	Oryg.	0,14	1,20	44	45	0,310	-0,56 – 0,53
ICC1k	Modyf.	0,89	9,30	44	45	< 0,001	0,81 – 0,94
ICC2k	Oryg.	0,49	5,40	44	44	< 0,001	-0,20 – 0,81
ICC2k	Modyf.	0,89	9,30	44	44	< 0,001	0,81 – 0,94
ICC3k	Oryg.	0,82	5,40	44	44	< 0,001	0,66 – 0,90
ICC3k	Modyf.	0,89	9,30	44	44	< 0,001	0,80 – 0,94

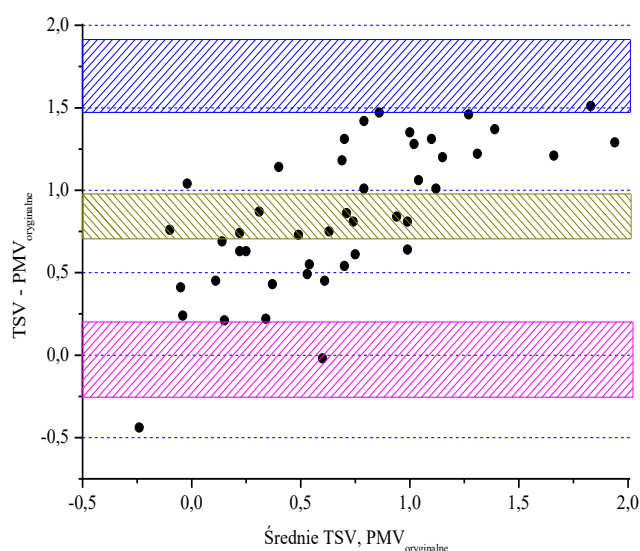
W dogłębnej analizie danych z Tabeli 9 odnośnie zgodności pomiędzy TSV a PMV, obserwuje się znaczącą przewagę modyfikacji schematu PMV nad schematem Fanger'a. Wyniki dla modyfikacji w każdym z typów współczynnika zgodności wewnątrzklasowej (ICC) są znacząco wyższe, co wskazuje na lepsze odwzorowanie rzeczywistej zgodności z percepcyjnym komfortem termicznym. Przy szczegółowym rozpatrzeniu, dla każdej z kategorii ICC, wartości uzyskane dla modyfikacji są wyraźnie wyższe i osiągają poziom

³³ Limits of Agreement (ang.)

³⁴ Standard Error of Measurement (ang.)

statystycznej istotności $p < 0,001$, co demonstrowuje silne odwzorowanie TSV. Oznacza to, że modyfikacja schematu PMV jest bardziej spójna i niezawodna w odwzorowaniu TSV niż oryginalny model Fanger. Wartości F (statystyka testu) okazały się wyższe dla modyfikacji, co świadczy o silniejszej statystycznej różnicy pomiędzy grupami, a przedziały ufności CI 95% nie pokrywają się z wartościami dla wzoru Fanger, co podkreśla lepsze dopasowanie proponowanej modyfikacji. Najbardziej znaczące różnice obserwuje się w kategoriach ICC1k, ICC2k oraz ICC3k, gdzie modyfikacja osiąga wartości ICC zbliżające się do 0,9, co interpretuje się jako bardzo wysoką zgodność. Odpowiednio niskie wartości p dla tych kategorii ($p < 0,001$) podkreślają silne podstawy statystyczne tych wyników. Z kolei, model Fanger wykazuje znacznie niższą zgodność, co jest szczególnie widoczne w kategorii ICC1, gdzie wartość ICC wynosi jedynie 0,08 z wartością $p = 0,310$. Podsumowując, powyższa analiza potwierdza, że modyfikacja modelu PMV_{modyf} oferuje znacznie lepsze odwzorowanie TSV, niż model Fanger, co jest wspierane przez silne podstawy statystyczne i wyższe wartości współczynników zgodności wewnątrzklasowej.

Poniżej przedstawiono graficzne porównanie TSV do oryginalnego modelu PMV za pomocą metody Blanda – Altmana na Rysunku 29. Średnie wartości TSV oraz PMV różnią się, przyjmując zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne, co wskazuje na zmienne różnice między pomiarami. Stronniczość wynosi 0,84, a towarzyszący mu 95% przedział ufności (od 0,71 do 0,97) sugeruje systematyczną różnicę pomiędzy metodami (kolor złoty), z typowo wyższymi wartościami rejestrowanymi przez PMV niż TSV. Granica dolna została oznaczona kolorem różowym, granica górna kolorem niebieskim.



Rys. 29. Porównanie TSV vs. PMV (wartości oryginalne) za pomocą wykresu Blanda – Altmana

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują na stałe, proporcjonalne obciążenia między parametrem PMV często rejestrującym wyższe wartości niż dla TSV. Szerokie granice zgodności sugerują, że PMV i TSV nie mogą być stosowane zamiennie, zwłaszcza w przypadkach, gdy konieczna jest precyzyjna zgodność. Wyniki potwierdziły jak istotne jest przeprowadzenie modyfikacji wzoru Fangera.

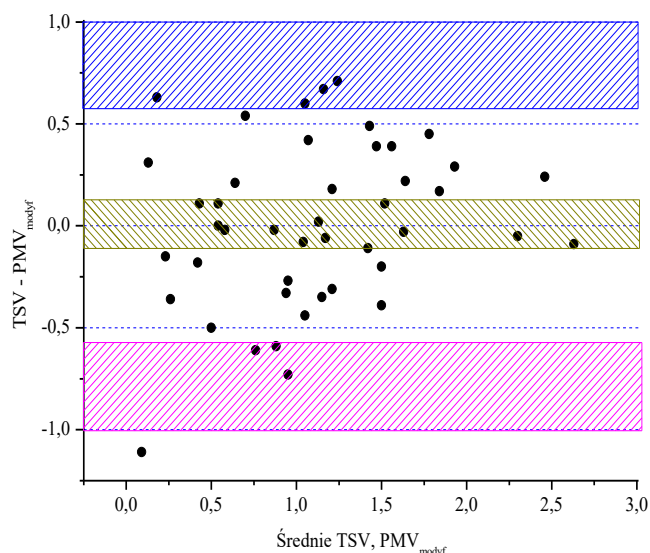
Równanie regresji (38) wynikające z analizy, wskazuje, że różnice między pomiarami zwiększają się wraz ze wzrostem średniej, sugerując proporcjonalną stroniczość. Stała wartość nachylenia równa 0,6 oraz przecięcie na poziomie 0,43 dalej potwierdzają tę proporcjonalną zależność między średnimi (x – średnia: TSV, $PMV_{\text{oryginalne}}$) a ich różnicami (Y – różnice: $TSV - PMV_{\text{oryginalne}}$).

$$Y = 0,6 \cdot x + 0,43 \quad (38)$$

Granice zgodności, które oceniają, jak bardzo pomiary wykonane dwoma metodami różnią się od siebie – odpowiednio 1,70 dla górnej granicy (CI 95%: 1,47 – 1,92) oraz -0,02 dla dolnej granicy (CI 95%: -0,24 – 0,21). Szerokie granice wskazują na znaczną zmienność różnic między metodami.

Błąd standardowy pomiaru dla stroniczości jest stosunkowo niski, wynoszący 0,07, co wskazuje na precyzyjne oszacowanie stroniczości. SEM dla LOA wynoszące 0,11. Sugeruje to rozsądną precyzję w szacowaniu zakresu, w którym prawdopodobnie znajdzie się większość różnic. Wartości proporcji odnoszące się do różnic i średnich, pokazują szeroki zakres, wskazując na to, że związek między różnicami a średnimi nie jest stały.

Poniżej przedstawiono graficzne porównanie TSV do modelu zmodyfikowanego PMV_{modyf} za pomocą metody Blanda – Altmana na Rysunku 30. Średnie wartości z 45 obserwacji wahają się od 0,09 do 2,63. Te wartości wskazują na zróżnicowanie w zbiorze danych, co może świadczyć o różnorodności wyników pomiarów lub zmiennych warunkach, w których były one przeprowadzane. Granicę dolną oznaczono kolorem różowym, a granicę górną kolorem niebieskim.



Rys. 30. Porównanie TSV vs. PMV_{modyf} za pomocą wykresu Blanda – Altmana

TSV i PMV_{modyf} wykazują mniejszą stronniczość, węższe granice zgodności oraz słabszą zależność proporcjonalną w analizie regresji w porównaniu do modelu Fanger'a. To sugeruje, że modyfikacja może być zastosowana w sytuacjach, gdzie wymagana jest większa precyzja i spójność wyników z odczuciami ludzkimi.

Wartość stronniczości 0,01, $SD = 0,40$, wskazuje na brak znaczącego systematycznego błędu. Jednakże duże odchylenie standardowe wskazuje na znaczną zmienność stronniczości w różnych pomiarach. Przedziały ufności dla stronniczości mieszczą się w zakresie CI 95%: -0,11 – 0,13 (kolor złoty) dodatkowo popiera brak znaczącej stronniczości.

Granice zgodności są obliczone jako -0,78 do 0,79, a ich odpowiednie przedziały ufności również obejmują zero. Te granice są stosunkowo szerokie, co wskazuje na wariancję między metodami w różnych pomiarach. Błąd standardowy pomiaru dla LOA wynosi 0,10, co sugeruje pewną niepewność w szacowaniu tych granic.

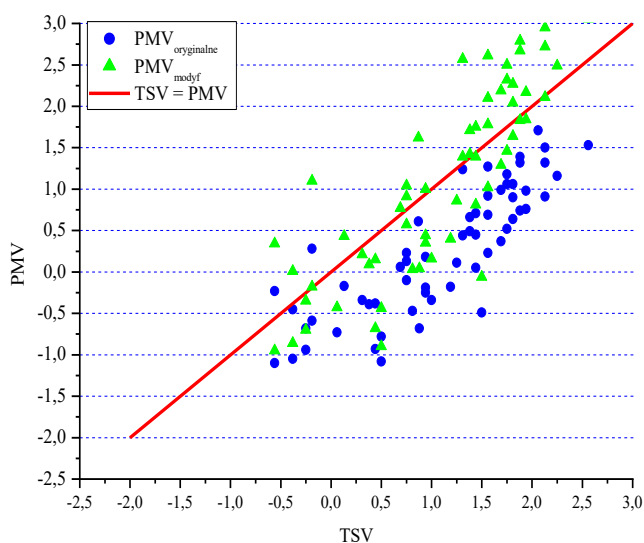
Proporcje różnic znacząco się wahają, osiągając wartości do 1168,55% oraz spadając do -137,75%, co wskazuje na możliwą stronniczość proporcjonalną. Może to sugerować, że różnice między pomiarami mogą zależeć od wielkości mierzonych wartości.

Równanie regresji (39) pokazuje lekko dodatnie nachylenie, co implikuje niewielką tendencję do wzrostu różnic w miarę wzrostu średnich. Jednakże stałe nachylenie i przecięcie wzmacniają przekonanie, że ta zależność nie jest szczególnie silna (x – średnia: TSV, PMV_{modyf}) a ich różnicami (Y – różnice: $TSV - PMV_{\text{modyf}}$).

$$Y = 0,15 \cdot x - 0,16 \quad (39)$$

Od strony praktycznej, proponowana modyfikacja może być wsparciem dla projektantów budynków i eksploatorów, którzy będą mogli zaprojektować tak instalacje HVAC i sposób ich sterowania, aby mogły stwarzać jak najdogodniejsze warunki mikroklimatu dla osób noszących maski podczas pracy lub nauki (w budynkach ochrony zdrowia czy ewentualnie w przyszłości, jeśli pandemie będą się powtarzać).

W celu dodatkowej weryfikacji zmodyfikowanego modelu wykorzystano dane pomiarowe uzyskane w komorze klimatycznej. Poniżej na Rysunku 31, przedstawiono średnie odpowiedzi TSV ośmioosobowej grupy w komorze w stosunku do wyników obliczeń $PMV_{\text{oryginalnego}}$ i zmodyfikowanego PMV_{modyf} .



Rys. 31. Porównanie TSV i oryginalnego/ zmodyfikowanego wzoru na PMV badań w komorze klimatycznej

W przypadku wyników badań w komorze klimatycznej również udało się uzyskać poprawę dokładności modelu. PMV układają się wzdłuż linii idealnego dopasowania ($TSV = PMV$). Pozytywna weryfikacja modelu w oparciu o dane z komory klimatycznej wykazała większą uniwersalność zaproponowanej modyfikacji.

Analiza danych z Tabeli 10 wskazuje na znaczące różnice w zgodności ocen pomiędzy parametrami TSV a PMV w kontekście modelu Fanger'a oraz jego modyfikacji na podstawie wyników badań z komory klimatycznej.

Tabela 10. Ocena zgodności pomiędzy TSV oraz $PMV_{\text{oryginalnego}}$ i PMV_{modyf} oraz typu ubioru

Typ ICC	Model PMV	ICC	F	df1	df2	p	CI 95%
ICC1	Oryg.	0,42	2,5	29	30	0,008	0,09 – 0,68
ICC1	Modyf.	0,85	13,0	29	30	< 0,001	0,72 – 0,93
ICC2	Oryg.	0,54	24,5	29	29	< 0,001	-0,05 – 0,86
ICC2	Modyf.	0,85	14,0	29	29	< 0,001	0,71 – 0,93
ICC3	Oryg.	0,92	24,5	29	29	< 0,001	0,84 – 0,96
ICC3	Modyf.	0,86	14,0	29	29	< 0,001	0,73 – 0,93
ICC1k	Oryg.	0,59	2,5	29	30	0,008	0,16 – 0,81
ICC1k	Modyf.	0,92	13,0	29	30	< 0,001	0,84 – 0,96
ICC2k	Oryg.	0,70	7,3	29	29	< 0,001	-0,19 – 0,90
ICC2k	Modyf.	0,84	6,6	29	29	< 0,001	0,67– 0,92
ICC3k	Oryg.	0,96	24,5	29	29	< 0,001	0,91 – 0,98
ICC3k	Modyf.	0,93	14,0	29	29	< 0,001	0,84 – 0,96

W przypadku wskaźnika ICC wyniki dla modyfikacji były zazwyczaj wyższe niż dla modelu Fanger'a. Podobne wzorce obserwujemy dla innych typów ICC (ICC2, ICC3, ICC1k, ICC2k, ICC3k), gdzie model zmodyfikowany wykazuje konsekwentnie wyższą zgodność. Przedziały ufności dla PMV_{modyf} są węższe i lepiej umiejscowione w wyższym zakresie niż w modelu Fanger'a, sugerując większą pewność w osiągniętych wynikach zgodności. Zmodyfikowany wzór przyczynił się do lepszej reprezentatywności i spójności w ocenach ludzi co może być wsparciem dla przewidywania wrażeń cieplnych ludzi w różnych warunkach.

Oprócz wzoru PMV, istotny jest również odsetek osób niezadowolonych (PPD) i sposób jego wyznaczania. Do modyfikacji PPD zostaną wzięte pod uwagę dane z sal dydaktycznych (tak jak było to w przypadku PMV) ze względu na licznosc grup. W poniższej Tabeli 11 zaprezentowano procent osób, który odczuwał dyskomfort wyznaczony na podstawie anonimowych kwestionariuszy ankiet – APPD, a także wyniki obliczeń wg. oryginalnego wzoru na $PPD_{\text{oryginalne}}$ oraz jego modyfikacji obejmującej wyznaczanie nowych stałych (opisano równaniem (40)) tj.:

$$PPD_{\text{modyf}} = 100 - 95 \cdot \exp(0,0019PMV^4 - 0,3743PMV^2) \quad (40)$$

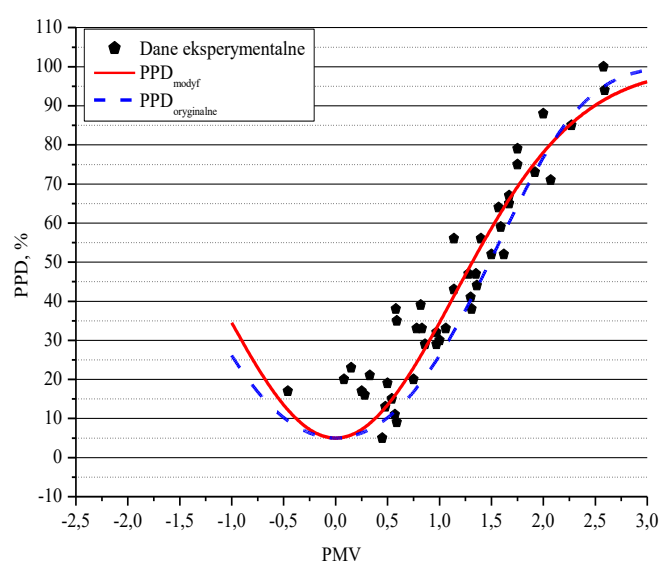
Stałe w w/w wzorze wyznaczono poprzez procedurę najlepszego dopasowania, a R^2 wyniósł 0,88.

Tabela 11. Porównanie wyników osób odczuwających dyskomfort na podstawie kwestionariuszy ankiet APPD, $PPD_{\text{oryginalne}}$ obliczonego ze wzoru oraz PPD_{modyf} obliczonego na podstawie zmodyfikowanego wzoru

Parametr					
Lp.	Liczba osób w pomieszczeniu	APPD	$PPD_{\text{oryginalne}}$	APPD	PPD_{modyf}
1	20	20	5	20	15
2	49	20	6	20	12
3	39	44	11	44	57
4	13	38	14	38	67
5	40	33	7	33	40
6	12	67	8	67	48
7	31	13	6	13	10
8	34	29	9	29	50
9	48	38	6	38	50
10	26	15	5	15	15
11	22	9	13	9	43
12	28	29	5	29	29
13	24	17	5	17	19
14	25	16	10	16	5
15	13	23	6	23	8
16	27	41	7	41	40
17	35	11	5	11	17
18	26	19	11	19	6
19	28	75	9	75	52
20	26	73	15	73	69
21	12	17	5	17	23
22	28	79	11	79	60
23	24	33	8	33	48
24	24	21	5	21	14
25	46	52	5	52	26
26	36	47	5	47	28
27	17	94	40	94	93
28	14	43	7	43	45
29	21	52	13	52	65
30	22	5	6	5	37
31	17	35	5	35	13
32	27	59	5	59	29
33	43	65	7	65	44
34	8	88	11	88	61

35	19	100	29	100	87
36	25	56	12	56	63
37	28	71	15	71	71
38	48	85	29	85	87
39	20	30	6	30	38
40	18	33	9	33	53
41	31	32	6	32	11
42	14	64	10	64	57
43	17	47	5	47	23
44	38	39	6	39	39
45	36	56	7	56	40

Na Rysunku 32 przedstawiono graficzne porównanie APPD, $PPD_{\text{oryginalnego}}$ oraz $PPD_{\text{modyf.}}$



Rys. 32. Porównanie oryginalnego modelu PPD Fangera ze modyfikowanym wskaźnikiem PPD_{modyf}

PPD zmodyfikowane lepiej odzwierciedliło niezadowolenie ludzi względem modelu oryginalnego. Oprócz graficznej interpretacji, poniżej przedstawiono wyniki obliczeń zgodnie ze współczynnikiem zgodności wewnątrzklasowej ICC [153] (w tym: ICC1, ICC2, ICC3, ICC1K, ICC2K, ICC3K), które pokazują lepsze dopasowanie modelu zmodyfikowanego niż oryginalnego do APPD w Tabeli 12.

Tabela 12. Ocena zgodności pomiędzy APPD oraz PPD_{oryginalne} oraz wg. PPD_{modyf}

Typ	Model PPD	ICC	F	Df ₁	df ₂	p	CI 95%
ICC1	Oryg.	-0,27	0,57	44	45	0,967	-0,520 – 0,019
ICC1	Modyf.	0,77	7,80	44	45	< 0,001	0,620 – 0,870
ICC2	Oryg.	0,13	2,01	44	44	0,011	-0,081 – 0,373
ICC2	Modyf.	0,77	7,80	44	44	< 0,001	0,620 – 0,870
ICC3	Oryg.	0,34	2,01	44	44	0,011	0,050 – 0,571
ICC3	Modyf.	0,77	7,80	44	44	< 0,001	0,620 – 0,870
ICC1k	Oryg.	-0,75	0,57	44	45	0,967	-2,166 -0,037
ICC1k	Modyf.	0,87	7,80	44	45	< 0,001	0,770 – 0,870
ICC2k	Oryg.	0,22	2,01	44	44	0,011	-0,176 – 0,544
ICC2k	Modyf.	0,87	7,80	44	44	< 0,001	0,770 – 0,870
ICC3k	Oryg.	0,50	2,01	44	44	0,011	0,095 – 0,727
ICC3k	Modyf.	0,87	7,80	44	44	< 0,001	0,770 – 0,870

Analizując PPD ze wzoru Fangera, wartości ICC wskazują na ograniczoną i często nieistotną zgodność z ankietą – APPD. W szczególności, ICC1 dla PPD_{oryginalne} wykazuje ujemny współczynnik wynoszący ICC = -0,27 z wartością p = 0,967, co wskazuje na brak istotnej korelacji. Podobnie, ICC1k przyjmuje wyraźnie ujemną wartość ICC = -0,75, również z nieistotnym statystycznie wynikiem p = 0,967. Wartości ICC2 i ICC3 dla PPD_{oryginalne} wynoszą odpowiednio ICC = 0,13 i ICC = 0,34, z wartościami p = 0,011 — mimo, że są istotne statystycznie, współczynniki te odzwierciedlają jedynie od słabego do umiarkowanego poziomu zgodności. Przedziały ufności dla tych wskaźników dodatkowo podkreślają niespójność, obejmując wartości bliskie zeru, co sugeruje, że zaobserwowane zgodności mogą być wynikiem losowej zmienności, a nie rzeczywistego związku.

W przeciwieństwie do zmodyfikowanego PPD_{modyf}, który wykazuje znacznie większą i wysoce istotniejszą zgodność z APPD we wszystkich miarach ICC. ICC1, ICC2 i ICC3 dla PPD_{modyf} każdorazowo odnotowują współczynniki na poziomie 0,77 z wartościami p < 0,001, co wskazuje na silne i statystycznie istotne korelacje. Miary ICC1k, ICC2k i ICC3k wzmacniają tę spójność, wykazując współczynniki równe 0,87 we wszystkich typach, z wartościami p < 0,001 oraz wąskimi przedziałami ufności (0,770–0,870). Te wysokie wartości ICC oznaczają doskonałą wiarygodność oraz silną zgodność między zmodyfikowanym PPD_{modyf} a APPD, potwierdzając wyższość zmodyfikowanego

podejścia w dokładniejszym odwzorowaniu niezadowolenia respondentów względem oryginalnego wzoru.

Podsumowując, porównawcza analiza jednoznacznie wskazuje, że PPD_{modyf} cechuje się wyższym stopniem zgodności z odpowiedziami ankietowymi APPD w porównaniu do oryginalnego wzoru na PPD Fangera. Niskie, a często nieistotne wartości ICC dla $PPD_{\text{oryginalne}}$ sugerują jego niską wiarygodność oraz niewystarczające dopasowanie do wyników z ankiet, co czyni go mniej odpowiednim narzędziem do precyzyjnej oceny. Z kolei konsekwentnie wysokie wartości ICC dla schematu zmodyfikowanego wskazują na jego niezawodność i trafność, co czyni go bardziej odpowiednim i skutecznym narzędziem do przewidywania odsetka osób niezadowolonych z panujących warunków środowiska wewnętrznego.

Rozdział VI

Podsumowanie i wnioski

Badania prowadzone w salach ćwiczeniowych i aulach Politechniki Świętokrzyskiej i w komorze klimatycznej w latach 2021 – 2023, dostarczyły bazy eksperymentalnej, dotyczącej subiektywnej oceny środowiska wewnętrznego przez ankietowanych noszących maski ochronne (jako efekt wybuchu pandemii COVID – 19). Łącznie w pomieszczeniach uzyskano 1298 ankiet, z czego 1199 kwestionariuszy przyjęto do dalszej analizy (w komorze klimatycznej było to 960 ankiet). Na podstawie otrzymanych wyników analiz wskazano następujące wnioski:

1. W przeprowadzonych badaniach w budynkach - przy zakresie temperatur powietrza od 20,9 do 28,8°C – subiektywne odczucia cieplne ludzi (TSV) ukierunkowywały się na środowisko „przyjemnie ciepłe”, „za ciepłe” i „za gorące”, a tym samym przy ocenie preferencji temperatury respondenci generalnie wyrażali chęć mniejszego lub większego zmniejszenia temperatury powietrza.
2. Najwyższy stopień akceptowalności termicznej obserwowano dla TSV równego +0,25, co było porównywalne z wynikami badań bez masek (wg. [144]), z tą różnicą, że w tamtym przypadku należy mówić o przedziale TSV w zakresie 0 – 0,25.
3. Wzrost temperatury operatywnej w pomieszczeniu prowadził do liniowego wzrostu TSV. Linia trendu dla wyników badań z użyciem masek znajduje się wyraźnie powyżej linii trendu dla badań bez masek (wg. [144]) - dla identycznej temperatury operatywnej wartości TSV dla osób noszących maski były wyższe (średnio o około 0,4). Zatem osoby w maskach postrzegały środowisko jako cieplejsze. Jednocześnie różnice rosły wraz ze wzrostem temperatury, co wynika z pogorszenia się komfortu cieplnego wraz z rosnącą temperaturą i konieczności odbierania od ciała większych strumieni ciepła. W takich warunkach maska wydaje się utrudniać chłodzenie poprzez płuca na drodze przemiany fazowej, czym można tłumaczyć rosnącą różnicę między TSV dla badań w maskach i bez.
4. W przeważającej części respondenci ocenili wilgotność w pomieszczeniach jako „przyjemną” lub „dość suchą”. Przy zakresie wilgotności względnej od 22,4 do 58,4% w rozpatrywanych pomieszczeniach jest to dość uzasadnione, jednak

mikroklimat wytworzony między maską a twarzą wydaje się być bardziej wilgotny w związku z dużą zawartością pary wodnej w powietrzu wydychanym (natomiast ankietowani wskazali odpowiedź „dość sucho” w około 1/3 ankiet).

5. Im ankietowani wyżej oceniali jakości powietrza, tym lepiej oceniali swoje samopoczucie. Porównanie z wynikami badań bez masek (wg. [144]) potwierdza taki sam charakter tej zależności, jednak w badaniach bez masek subiektywne odczucia ogólnego samopoczucia były wyższe przy niskich ocenach jakości powietrza niż dla badań z użyciem masek.
6. Obliczone wartości PMV odbiegały od rzeczywistych odczuć cieplnych (TSV) ankietowanych noszących maski. Podobnie było w przypadku wskaźnika PPD.
7. Zaproponowana modyfikacja wskaźnika PMV w oparciu o dane z pomieszczeń, uwzględniająca inne tempo metabolizmu osób noszących maski w porównaniu do osób bez masek, doprowadziła do uzyskania bardziej dokładnych wyników obliczeń modelowych (bliżej wartości rzeczywistych).
8. Weryfikacja zmodyfikowanego wskaźnika PMV w oparciu o dane z komory klimatycznej potwierdziła lepsze dopasowanie i skuteczność zaproponowanej modyfikacji.
9. Modyfikacja dotyczyła również wskaźnika PPD, a w jej wyniku również poprawiono skuteczność przewidywania wartości rzeczywistych dla osób noszących maski.
10. Przyjęta teza pracy tj.:
 - a) fakt noszenia masek ochronnych wpływa na subiektywne wrażenia cieplne użytkowników pomieszczeń – została potwierdzona kompleksową analizą dotyczącą wrażeń cieplnych;
 - b) wskaźniki PMV i PPD nie przewidują w sposób prawidłowy rzeczywistych odczuć cieplnych użytkowników pomieszczeń, którzy noszą maski ochronne – została potwierdzona analizą porównawczą, że oba te wskaźniki odbiegają od rzeczywistych odczuć (wg ankiet);
 - c) możliwe jest opracowanie modyfikacji modelu Fanger'a (tj. wyznaczenie zmodyfikowanych wartości wskaźników PMV i PPD) w celu poprawy dokładności przewidywania wskaźników PMV i PPD dla grupy użytkowników pomieszczeń, noszących maski ochronne – została

potwierdzona: modyfikacja skuteczniej przewiduje wrażenia cieplne ludzi oraz odsetek osób niezadowolonych.

11. Niniejsza praca, jej wyniki oraz modyfikacja wzorów na PMV oraz PPD, może stanowić źródło wiedzy dla projektantów i eksploatorów budynków. Możliwość wykorzystania zmodyfikowanych wzorów może przyczynić się do poprawy odczuć cieplnych oraz samopoczucia osób, które przez dłuższy okres czasu noszą maski ochronne.

Streszczenie

Celem pracy „Analiza komfortu cieplnego w budynkach w warunkach stosowania masek ochronnych” było przeprowadzanie badań nad subiektywnymi odczuciami respondentów w dwóch rodzajach masek ochronnych (cieńszych i grubszych) w warunkach rzeczywistych w pomieszczeniach edukacyjnych Politechniki Świętokrzyskiej i w komorze klimatycznej, a następnie przeprowadzenie modyfikacji modelu komfortu cieplnego (wzoru Fangera) przy zastosowaniu dodatkowego elementu uwzględniającego wpływ masek ochronnych na wrażenia termiczne TSV. W rozdziale I opisano historię badań nad komfortem cieplnym oraz opisano parametry mikroklimatu wpływające na odczucia cieplne. Dodatkowo w tym samym rozdziale przeanalizowano literaturę związaną z komfortem cieplnym w maskach ochronnych. W rozdziale II omówiono model Fangera i wskaźniki PMV oraz PPD. Przedstawiono trendy zastosowania m.in. sztucznej inteligencji w przewidywaniu modelu komfortu cieplnego. W rozdziale III, podsumowano zebrane informacje z literatury, a w rozdziale IV zaprezentowano główne cele i tezy pracy w oparciu o wnioski otrzymane z rozdziału III. W rozdziale V opisano przedmiot i zakres badań – budynki oraz komorę klimatyczną, następnie metodykę badań w tym procedurę badawczą, miernik środowiskowy oraz anonimowy kwestionariusz ankiety. W kolejnym etapie przeprowadzono szczegółową analizę komfortu cieplnego w badanych pomieszczeniach i komorze klimatycznej przy zastosowaniu masek ochronnych. W następnym kroku porównano otrzymane wyniki TSV – PMV oraz APPD – PPD i dokonano modyfikacji wskaźnika PMV uwzględniającą obecność masek ochronnych na twarzach oraz przeprowadzono modyfikację wskaźnika PPD. Ostatecznie w rozdziale V zweryfikowano otrzymane modyfikacje wskaźników oraz potwierdzono metodami statystycznymi istotność wprowadzonych zmian. W rozdziale VI podsumowano omówioną analizę odczuć cieplnych w maskach ochronnych oraz przedstawiono końcowe wnioski z analizy oraz z przeprowadzonej modyfikacji wskaźników PMV oraz PPD. Generalnie należy stwierdzić, że zastosowanie masek prowadzi do zawyżania odczuć termicznych w porównaniu do sytuacji, gdy nie korzysta się z masek ochronnych (dla tej samej temperatury operatywnej), a zmodyfikowane wartości wskaźników PMV i PPD lepiej odzwierciedlają rzeczywiste odczucia termiczne w warunkach zastosowania masek ochronnych.

Słowa kluczowe: komfort cieplny, mikroklimat, wskaźniki komfortu, PMV, PPD, maska ochronna, komora klimatyczna, budynki edukacyjne, metabolizm

Summary

The aim of the study “Analysis of thermal comfort in buildings under the conditions of using protective masks” was to conduct research on the subjective feelings of respondents in two types of protective masks (thinner and thicker) in real conditions in educational rooms of the Kielce University of Technology and in a climatic chamber, and then to modify the thermal comfort model (Fanger's formula) using an additional element taking into account the influence of protective masks on thermal sensations TSV. Chapter I describes the history of research on thermal comfort and describes the microclimate parameters influencing thermal sensations. Additionally, the same chapter analyzes the literature related to thermal comfort in protective masks. Chapter II discusses the Fanger model and the PMV and PPD indices. Trends in the use of artificial intelligence, among others, in predicting the thermal comfort model are presented. Chapter III summarizes the information collected from the literature, and Chapter IV presents the main objectives and theses of the work, based on the conclusions obtained from Chapter III. Chapter V describes the subject and scope of the research – buildings and the climatic chamber, then the research methodology, including the research procedure, environmental meter and anonymous survey questionnaire. In the next stage, a detailed analysis of thermal comfort in the tested rooms and the climatic chamber using protective masks was carried out. In the next step, the obtained TSV – PMV and APPD – PPD results were compared, and the PMV index was modified to take into account the presence of protective masks on the faces, and the PPD index was modified. Finally, in Chapter V, the obtained modifications of the indicators were verified and the significance of the introduced changes was confirmed by statistical methods. Chapter VI summarizes the discussed analysis of thermal sensations in masks and presents the final conclusions from the analysis and the modification of the PMV and PPD indicators. In general, it should be stated that the use of masks leads to an overestimation of thermal sensations compared to the situation when protective masks are not used (for the same operative temperature), and the modified values of the PMV and PPD indicators better reflect the actual thermal sensations in the conditions of using protective masks.

Key words: thermal comfort, microclimate, comfort indicators, PMV, PPD, protective mask, climatic chamber, educational buildings, metabolism

Literatura

1. Taleghani M, Tenpierik M, Kurvers S, Van Den Dobbelsteen A (2013) A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26:201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>
2. Hill L, Barnard H, Sequeira JH (1897) The Effect of Venous Pressure on the Pulse. *The Journal of Physiology* 21:147–159. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1897.sp000648>
3. Haldane JS (1905) The Influence of High Air Temperatures No. I. *Epidemiol Infect* 5:494–513. <https://doi.org/10.1017/S0022172400006811>
4. Liu Z, Li J, Xi T (2023) A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces. *Buildings* 13:3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>
5. Houghton F, Yaglou C (1923) Determining equal comfort lines. *American Society of Heating Ventilation Engineers* 1923:165–7629 1923:165–76.
6. Dufton A (1926) The eupatheostat. *Scientific Instruments* 1929;6:249–51.
7. Winslow C-EA, Herrington LP, Gagge AP (1937) PHYSIOLOGICAL REACTIONS OF THE HUMAN BODY TO VARYING ENVIRONMENTAL TEMPERATURES. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 120:1–22. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1937.120.1.1>
8. Belding H, Hatch T (1955) Index for evaluating Heat Stress in Terms of resulting Physiological Strains. *Heating, piping, and air conditioning* 27:129–136
9. Thom EC (1959) The Discomfort Index. *Weatherwise* 12:57–61. <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>
10. Fanger PO (1974) *Komfort cieplny*. Arkady, Warszawa
11. Givoni B, Goldman RF (1972) Predicting rectal temperature response to work, environment, and clothing. *Journal of Applied Physiology* 32:812–822. <https://doi.org/10.1152/jappl.1972.32.6.812>

12. Moran DS, Pandolf KB, Shapiro Y, et al (2001) An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of Thermal Biology* 26:427–431. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(01\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(01)00055-9)
13. Nicol F (1993) *Thermal Comfort: A Handbook for Field Studies Towards an Adaptive Model*. University of East London, London
14. Humphreys MA, Fergus Nicol J (2002) The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings* 34:667–684. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X)
15. Humphreys M, Nicol F (1998) Understanding the adaptive approach to thermal comfort. 104:991–1004
16. Enescu D (2017) A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79:1353–1379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175>
17. Zomorodian ZS, Tahsildoost M, Hafezi M (2016) Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59:895–906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>
18. Lin Z, Deng S (2008) A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment* 43:70–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>
19. Shooshtarian S, Lam CKC, Kenawy I (2020) Outdoor thermal comfort assessment: A review on thermal comfort research in Australia. *Building and Environment* 177:106917. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106917>
20. Gagge AP, Stolwijk J, Nishi Y An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. 77:247–262
21. Ganesh GA, Sinha SL, Verma TN, Dewangan SK (2021) Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: A critical review. *Building and Environment* 204:108146. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108146>

22. Kingma B, Van Marken Lichtenbelt W (2015) Energy consumption in buildings and female thermal demand. *Nature Clim Change* 5:1054–1056. <https://doi.org/10.1038/nclimate2741>
23. Nikam S, Bartaria V (2012) Indoor environment in air conditioned spaces a review. *Int J Adv Technol Eng Res* 2:226–230
24. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. International Standard PN-ISO 7726, 2001
25. European Standard, EN 15251 - Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings - Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, 2007
26. Goto T, Toftum J, de Dear R, Fanger P (2002) Thermal sensation and comfort with transient metabolic rates. 1038–1043
27. Goto T, Toftum J, De Dear R, Fanger PO (2006) Thermal sensation and thermophysiological responses to metabolic step-changes. *Int J Biometeorol* 50:323–332. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0016-5>
28. Djongyang N, Tchinda R, Njomo D (2010) Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:2626–2640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>
29. Ma N, Aviv D, Guo H, Braham WW (2021) Measuring the right factors: A review of variables and models for thermal comfort and indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135:110436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110436>
30. Mamani T, Herrera RF, Muñoz-La Rivera F, Atencio E (2022) Variables That Affect Thermal Comfort and Its Measuring Instruments: A Systematic Review. *Sustainability* 14:1773. <https://doi.org/10.3390/su14031773>
31. ISO International Organisation for Standardization, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using

- calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, International Standard ISO 7730, 2005
32. ASHRAE STANDARD 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
 33. Romero P, Valero-Amaro V, Isidoro R, Miranda MT (2024) Analysis of determining factors in the thermal comfort of university students. A comparative study between Spain and Portugal. *Energy and Buildings* 308:114022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114022>
 34. Krawczyk N, Dębska L, Alzaben H (2024) Assessment of thermal comfort in the modern lecture theater: Kielce University of Technology, Poland - case study. *J Phys: Conf Ser* 2701:012137. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2701/1/012137>
 35. Dębska L, Zender M (2022) Analysis of the accuracy of the Fanger model in the intelligent building – a case study. *E3S Web Conf* 347:04012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234704012>
 36. Krawczyk N, Kapjor A, Orman ŁJ (2020) Verification of the Fanger Model in Real Conditions. *MATEC Web Conf* 328:01001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202032801001>
 37. Stokowiec K, Kotrys-Działak D, Jastrzębska P (2022) Verification of the Fanger model with field experimental data. *J Phys: Conf Ser* 2339:012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2339/1/012027>
 38. Krawczyk N, Dębska L (2022) Modeling of indoor thermal comfort in the intelligent building. *J Phys: Conf Ser* 2339:012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2339/1/012026>
 39. Dębska L (2022) Developing the modified model of thermal comfort. *J Phys: Conf Ser* 2346:012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2346/1/012003>
 40. Guevara G, Soriano G, Mino-Rodriguez I (2021) Thermal comfort in university classrooms: An experimental study in the tropics. *Building and Environment* 187:107430. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107430>

41. Balbis-Morejón M, Rey-Hernández JM, Amaris-Castilla C, et al (2020) Experimental Study and Analysis of Thermal Comfort in a University Campus Building in Tropical Climate. *Sustainability* 12:8886. <https://doi.org/10.3390/su12218886>
42. Torriani G, Lamberti G, Salvadori G, et al (2023) Thermal comfort and adaptive capacities: Differences among students at various school stages. *Building and Environment* 237:110340. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110340>
43. Rodríguez CM, Coronado MC, Medina JM (2021) Thermal comfort in educational buildings: The Classroom-Comfort-Data method applied to schools in Bogotá, Colombia. *Building and Environment* 194:107682. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107682>
44. Dębska L, Honus S, Krawczyk N, et al (2023) Thermal Comfort Analysis in the Smart Sustainable Building with Correlation Development. *Rocznik Ochrona Środowiska* 25:116–127. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.012>
45. Fu P, Zhao Z, Norback D, et al (2022) Associations between indoor environment and lifestyles and sick building syndrome symptoms among adults in Taiyuan and Urumqi of China. *Indoor Air* 32:. <https://doi.org/10.1111/ina.13081>
46. Nezis I, Biskos G, Eleftheriadis K, et al (2022) Linking indoor particulate matter and black carbon with sick building syndrome symptoms in a public office building. *Atmospheric Pollution Research* 13:101292. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101292>
47. Salari M, Tabatabaei FS, Fouladi-Fard R, et al (2023) Influence of heating systems on indoor air quality and sick building syndrome (a case study in Qom, Iran). *International Journal of Ventilation* 22:257–272. <https://doi.org/10.1080/14733315.2022.2068250>
48. Farrag N, Abou El-Ela MAS, Ezzeldin S (2022) Sick building syndrome and office space design in Cairo, Egypt. *Indoor and Built Environment* 31:568–577. <https://doi.org/10.1177/1420326X211016507>

49. Krawczyk N, Dębska L, Piotrowski JZb, et al (2023) Validation of the Fanger Model and Assessment of SBS Symptoms in the Lecture Room. *Rocznik Ochrona Środowiska* 25:68–76. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.008>
50. WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020. <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>
51. Chan JF-W, Yuan S, Kok K-H, et al (2020) A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster. *The Lancet* 395:514–523. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30154-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30154-9)
52. Liu J, Liao X, Qian S, et al (2020) Community Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, Shenzhen, China, 2020. *Emerg Infect Dis* 26:. <https://doi.org/10.3201/eid2606.200239>
53. Morawska L, Cao J (2020) Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International* 139:105730. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
54. Xie Z, Qin Y, Li Y, et al (2020) Spatial and temporal differentiation of COVID-19 epidemic spread in mainland China and its influencing factors. *Science of The Total Environment* 744:140929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140929>
55. Bourouiba L (2020) Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *JAMA*. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.4756>
56. Oliver SE, Gargano JW, Marin M, et al (2020) The Advisory Committee on Immunization Practices' Interim Recommendation for Use of Pfizer-BioNTech COVID-19 Vaccine — United States, December 2020. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 69:1922–1924. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6950e2>
57. Zhang R, Li Y, Zhang AL, et al (2020) Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *Proc Natl Acad Sci USA* 117:14857–14863. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009637117>

58. Kim M-N (2020) What Type of Face Mask is Appropriate for Everyone-Mask-Wearing Policy Amidst COVID-19 Pandemic? *J Korean Med Sci* 35:e186. <https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e186>
59. Krajewski PK, Matusiak Ł, Szepietowska M, et al (2020) Increased Prevalence of Face Mask—Induced Itch in Health Care Workers. *Biology* 9:451. <https://doi.org/10.3390/biology9120451>
60. Matuschek C, Moll F, Fangerau H, et al (2020) The history and value of face masks. *Eur J Med Res* 25:23. <https://doi.org/10.1186/s40001-020-00423-4>
61. Lipp A, Edwards P (2002) Disposable surgical face masks for preventing surgical wound infection in clean surgery. In: The Cochrane Collaboration (ed) *Cochrane Database of Systematic Reviews*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, p CD002929
62. Zender-Świercz E, Telejko M, Galiszewska B (2021) Influence of Masks Protecting against SARS-CoV-2 on Thermal Comfort. *Energies* 14:3315. <https://doi.org/10.3390/en14113315>
63. Zhang T (Tim), Zhang T, Liu S (2022) A Modified Surgical Face Mask to Improve Protection and Wearing Comfort. *Buildings* 12:663. <https://doi.org/10.3390/buildings12050663>
64. Huo S, Zhang T (Tim) (2021) Ventilation of ordinary face masks. *Building and Environment* 205:108261. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108261>
65. Zhang R, Liu J, Zhang L, et al (2021) The distorted power of medical surgical masks for changing the human thermal psychology of indoor personnel in summer. *Indoor Air* 31:1645–1656. <https://doi.org/10.1111/ina.12830>
66. Zhong Q, Song J, Shi D, Dung C-H (2023) Protective facemask-induced facial thermal stress and breathing burden during exercise in gyms. *Building and Environment* 244:110840. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110840>
67. Lin Y-C, Chen C-P (2019) Thermoregulation and thermal sensation in response to wearing tight-fitting respirators and exercising in hot-and-humid indoor

- environment. *Building and Environment* 160:106158. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.036>
68. Scarano A, Inchingolo F, Lorusso F (2020) Facial Skin Temperature and Discomfort When Wearing Protective Face Masks: Thermal Infrared Imaging Evaluation and Hands Moving the Mask. *IJERPH* 17:4624. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134624>
 69. Liu T, Shan X, Deng Q, et al (2022) Thermal Perception and Physiological Responses under Different Protection States in Indoor Crowded Spaces during the COVID-19 Pandemic in Summer. *Sustainability* 14:5477. <https://doi.org/10.3390/su14095477>
 70. Hu C, Wang Z, Bo R, et al (2023) Effect of the cooling clothing integrating with phase change material on the thermal comfort of healthcare workers with personal protective equipment during the COVID-19. *Case Studies in Thermal Engineering* 42:102725. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102725>
 71. Akbar-Khanzadeh F (1998) Factors Contributing to Discomfort or Dissatisfaction as a Result of Wearing Personal Protective Equipment.
 72. Akbar-Khanzadeh F, Bisesi MS, Rivas RD (1995) Comfort of personal protective equipment. *Applied Ergonomics* 26:195–198. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00017-7](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00017-7)
 73. Jiang H, Cao B, Zhu Y (2023) Thermal comfort of personal protective equipment (PPE) wearers in different temperatures and activity conditions. *Journal of Building Engineering* 78:107609. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107609>
 74. Mao Y, Zhu Y, Guo Z, et al (2022) Experimental investigation of the effects of personal protective equipment on thermal comfort in hot environments. *Building and Environment* 222:109352. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109352>
 75. Białek A, Dębska L (2022) Verification of the selected thermal comfort model in real and simulated conditions. *E3S Web Conf* 347:04013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234704013>

76. Dębska L, Krawczyk N (2022) Comparison of Thermal Sensations Under the Same Conditions in the Climatic Chamber and the Lecture Hall. *MATEC Web Conf* 369:02004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202236902004>
77. Ji W, Cao B, Zhu Y (2019) A physiological chamber experiment to explore human thermal adaption on the seasonal scale. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 609:042013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/4/042013>
78. Kong D, Liu H, Wu Y, et al (2019) Effects of indoor humidity on building occupants' thermal comfort and evidence in terms of climate adaptation. *Building and Environment* 155:298–307. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.039>
79. Chen Y, Tao M, Liu W (2020) High temperature impairs cognitive performance during a moderate intensity activity. *Building and Environment* 186:107372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107372>
80. Liu H, Liao J, Yang D, et al (2014) The response of human thermal perception and skin temperature to step-change transient thermal environments. *Building and Environment* 73:232–238. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.007>
81. Yang Y, Li B, Liu H, et al (2015) A study of adaptive thermal comfort in a well-controlled climate chamber. *Applied Thermal Engineering* 76:283–291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.004>
82. Ji W, Cao B, Luo M, Zhu Y (2017) Influence of short-term thermal experience on thermal comfort evaluations: A climate chamber experiment. *Building and Environment* 114:246–256. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.021>
83. Liu C, Li G, He Y, et al (2020) Effects of wearing masks on human health and comfort during the COVID-19 pandemic. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* 531:012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/531/1/012034>
84. Cheok GJW, Gatot C, Sim CHS, et al (2021) Appropriate attitude promotes mask wearing in spite of a significant experience of varying discomfort. *Infection, Disease & Health* 26:145–151. <https://doi.org/10.1016/j.idh.2021.01.002>

85. Westermann C, Zielinski N, Altenburg C, et al (2022) Prevalence of Adverse Skin Reactions in Nursing Staff Due to Personal Protective Equipment during the COVID-19 Pandemic. *IJERPH* 19:12530. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912530>
86. Wojtasz I, Cofta S, Czudaj P, et al (2022) Effect of Face Masks on Blood Saturation, Heart Rate, and Well-Being Indicators in Health Care Providers Working in Specialized COVID-19 Center. *IJERPH* 19:1397. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031397>
87. Alreshidi NM, Alghamdi S, Shibily F, et al (2021) The Association between Using Personal Protective Equipment and Headache among Healthcare Workers in Saudi Arabia Hospitals during the COVID-19 Pandemic. *Nursing Reports* 11:568–583. <https://doi.org/10.3390/nursrep11030054>
88. Scarano A, Inchingolo F, Rapone B, et al (2021) Protective Face Masks: Effect on the Oxygenation and Heart Rate Status of Oral Surgeons during Surgery. *IJERPH* 18:2363. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052363>
89. Jiménez-García S, De Juan Pérez A, Pérez-Cañaveras RM, Vizcaya-Moreno F (2022) Working Environment, Personal Protective Equipment, Personal Life Changes, and Well-Being Perceived in Spanish Nurses during COVID-19 Pandemic: A Cross-Sectional Study. *IJERPH* 19:4856. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084856>
90. Rus T, Moldovan R, Albu H, Beu D (2023) Impact of Pandemic Safety Measures on Students' Thermal Comfort—Case Study: Romania. *Buildings* 13:794. <https://doi.org/10.3390/buildings13030794>
91. Wu Y, Jiang A, Liu H, et al (2024) Climate chamber investigation of the effect of indoor thermal histories on thermal adaptation in different seasons. *Energy and Built Environment* 5:455–463. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.02.002>
92. Tang T, Zhu Y, Zhou X, et al (2022) Investigation of the effects of face masks on thermal comfort in Guangzhou, China. *Building and Environment* 214:108932. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108932>

93. Tang T, Zhou X, Dai K, et al (2023) Comparison of adaptive thermal comfort with face masks in library building in Guangzhou, China. *Thermal Science and Engineering Progress* 37:101597. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101597>
94. Fakir MH, Kim JK (2022) Prediction of individual thermal sensation from exhaled breath temperature using a smart face mask. *Building and Environment* 207:108507. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108507>
95. Zhou Z, Dong L (2023) Experimental investigation of the effect of surgical masks on outdoor thermal comfort in Xiamen, China. *Building and Environment* 229:109893. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109893>
96. Zhang Y, He H, Dai K, et al (2023) Thermal responses of face-masked pedestrians during summer: An outdoor investigation under tree-shaded areas. *Building and Environment* 233:110058. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110058>
97. Zheng Z, Lu J, Dai K, et al (2024) Comparison of the adaption of outdoor thermal comfort of pedestrians with face masks in semi-open spaces. *Thermal Science and Engineering Progress* 49:102429. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102429>
98. Oner E, Seçkin AÇ, Egeli D, Seçkin M (2022) Investigation of the Thermal Comfort Properties of Masks Used during the COVID-19 Pandemic. *IJERPH* 19:11275. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811275>
99. Gericke A, Militký J, Venkataraman M, et al (2022) The Effect of Mask Style and Fabric Selection on the Comfort Properties of Fabric Masks. *Materials* 15:2559. <https://doi.org/10.3390/ma15072559>
100. Lee K-P, Yip J, Kan C-W, et al (2020) Reusable Face Masks as Alternative for Disposable Medical Masks: Factors that Affect their Wear-Comfort. *IJERPH* 17:6623. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186623>
101. Spennemann DHR (2023) Documenting COVID-19 for Posterity: A Review of the Types of Fitted Face Masks Worn in Albury (Australia). *Hygiene* 3:176–196. <https://doi.org/10.3390/hygiene3020013>

102. Spennemann DHR (2022) Environmental Decay of Single Use Surgical Face Masks as an Agent of Plastic Micro-Fiber Pollution. *Environments* 9:94. <https://doi.org/10.3390/environments9070094>
103. Spennemann DHR (2021) COVID-19 Face Masks as a Long-Term Source of Microplastics in Recycled Urban Green Waste. *Sustainability* 14:207. <https://doi.org/10.3390/su14010207>
104. Oteef MDY, Otaif KD, Idris AM (2023) Personal Protective Equipment as a Potential Source of Phthalate Exposure during the COVID-19 Pandemic. *Applied Sciences* 13:9076. <https://doi.org/10.3390/app13169076>
105. De La Torre Bayo JJ, Martín-Lara MÁ, Calero Hoces M, et al (2023) Management of Used COVID-19 Personal Protective Equipment: A Bibliometric Analysis and Literature Review. *Applied Sciences* 13:2377. <https://doi.org/10.3390/app13042377>
106. Yao R, Li B, Liu J (2009) A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment* 44:2089–2096. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>
107. Orosa JA, Oliveira AC (2011) A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models. *Renewable Energy* 36:951–956. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.013>
108. Nguyen AT, Singh MK, Reiter S (2012) An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia. *Building and Environment* 56:291–300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.021>
109. Buratti C, Ricciardi P, Vergoni M (2013) HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments. *Applied Energy* 104:117–127. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.015>
110. Ruiz MA, Correa EN (2015) Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate. *Building and Environment* 85:40–51. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.018>

111. Kim JT, Lim JH, Cho SH, Yun GY (2015) Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances. *Energy and Buildings* 98:100–105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.051>
112. Broday EE, De Paula Xavier AA, De Oliveira R (2017) Comparative analysis of methods for determining the clothing surface temperature (t_{cl}) in order to provide a balance between man and the environment. *International Journal of Industrial Ergonomics* 57:80–87. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.12.002>
113. Broday EE, Moreto JA, Xavier AADP, De Oliveira R (2019) The approximation between thermal sensation votes (TSV) and predicted mean vote (PMV): A comparative analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics* 69:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.09.007>
114. Zhang S, Cheng Y, Olaide Oladokun M, et al (2020) Improving predicted mean vote with inversely determined metabolic rate. *Sustainable Cities and Society* 53:101870. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101870>
115. Zhang S, Lin Z (2020) Extending Predicted Mean Vote using adaptive approach. *Building and Environment* 171:106665. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106665>
116. Omidvar A, Kim J (2020) Modification of sweat evaporative heat loss in the PMV/PPD model to improve thermal comfort prediction in warm climates. *Building and Environment* 176:106868. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106868>
117. Niza IL, Broday EE (2022) An Analysis of Thermal Comfort Models: Which One Is Suitable Model to Assess Thermal Reality in Brazil? *Energies* 15:5429. <https://doi.org/10.3390/en15155429>
118. Yao R, Zhang S, Du C, et al (2022) Evolution and performance analysis of adaptive thermal comfort models – A comprehensive literature review. *Building and Environment* 217:109020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109020>
119. Williamson T, Daniel L (2020) A new adaptive thermal comfort model for homes in temperate climates of Australia. *Energy and Buildings* 210:109728. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109728>

120. Forcada N, Gangolells M, Casals M, et al (2021) Field study on adaptive thermal comfort models for nursing homes in the Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 252:111475. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111475>
121. Yue L, Zhongqing C (2023) Seasonal thermal comfort and adaptive behaviours for the occupants of residential buildings: Shaoxing as a case study. *Energy and Buildings* 292:113165. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113165>
122. Yadeta C, Indraganti M, Terefe Tucho G, Alemayehu E (2023) Study on adaptive thermal comfort model and behavioral adaptation in naturally ventilated residential buildings, Jimma Town, Ethiopia. *Energy and Buildings* 298:113483. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113483>
123. Cho S, Nam HJ, Shi C, et al (2023) Wireless, AI-enabled wearable thermal comfort sensor for energy-efficient, human-in-the-loop control of indoor temperature. *Biosensors and Bioelectronics* 223:115018. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.115018>
124. Halhoul Merabet G, Essaaïdi M, Ben Haddou M, et al (2021) Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144:110969. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110969>
125. Zhao Y, Genovese PV, Li Z (2020) Intelligent Thermal Comfort Controlling System for Buildings Based on IoT and AI. *Future Internet* 12:30. <https://doi.org/10.3390/fi12020030>
126. Kim J, Kang J (2023) AI based temperature reduction effect model of fog cooling for human thermal comfort: Climate adaptation technology. *Sustainable Cities and Society* 95:104574. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104574>
127. Palladino D, Nardi I, Buratti C (2020) Artificial Neural Network for the Thermal Comfort Index Prediction: Development of a New Simplified Algorithm. *Energies* 13:4500. <https://doi.org/10.3390/en13174500>

128. Deng Z, Chen Q (2018) Artificial neural network models using thermal sensations and occupants' behavior for predicting thermal comfort. *Energy and Buildings* 174:587–602. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.060>
129. Zhang S, Yao R, Wei H, Li B (2024) Prediction of occupant thermal state via infrared thermography and explainable AI. *Energy and Buildings* 312:114153. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114153>
130. Chai Q, Wang H, Zhai Y, Yang L (2020) Using machine learning algorithms to predict occupants' thermal comfort in naturally ventilated residential buildings. *Energy and Buildings* 217:109937. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109937>
131. Yang B, Li X, Liu Y, et al (2022) Comparison of models for predicting winter individual thermal comfort based on machine learning algorithms. *Building and Environment* 215:108970. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108970>
132. Qavidel Fard Z, Zomorodian ZS, Korsavi SS (2022) Application of machine learning in thermal comfort studies: A review of methods, performance and challenges. *Energy and Buildings* 256:111771. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111771>
133. Krawczyk N, Dębska L, Starzomska M (2022) Measurements of thermal fields in view of heat losses determination in the smart building. *J Phys: Conf Ser* 2346:012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2346/1/012010>
134. Dębska L, Krawczyk N, Kapjor A (2024) Thermovision as a non – destructive method of technical condition assessment: case study in a smart building. *J Phys: Conf Ser* 2723:012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2723/1/012006>
135. Body Mass Index (BMI). <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/body-mass-index>
136. Lovec V, Premrov M, Leskovar VŽ (2021) Practical Impact of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort in Kindergartens. A Case Study of Slovenia. *IJERPH* 18:9712. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189712>

137. Ricciardi P, Buratti C (2012) Thermal comfort in open plan offices in northern Italy: An adaptive approach. *Building and Environment* 56:314–320. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.019>
138. Luo W, Kramer R, De Kort Y, Van Marken Lichtenbelt W (2022) Effectiveness of personal comfort systems on whole-body thermal comfort – A systematic review on which body segments to target. *Energy and Buildings* 256:111766. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111766>
139. Aghniaey S, Lawrence TM, Sharpton TN, et al (2019) Thermal comfort evaluation in campus classrooms during room temperature adjustment corresponding to demand response. *Building and Environment* 148:488–497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.013>
140. Indraganti M, Ooka R, Rijal HB (2013) Thermal comfort in offices in summer: Findings from a field study under the ‘setsuden’ conditions in Tokyo, Japan. *Building and Environment* 61:114–132. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.008>
141. Wang X, Yang L, Gao S, et al (2021) Thermal comfort in naturally ventilated university classrooms: A seasonal field study in Xi’an, China. *Energy and Buildings* 247:111126. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111126>
142. Zhao P, Zhu N, Chong D, Hou Y (2022) Developing a new heat strain evaluation index to classify and predict human thermal risk in hot and humid environments. *Sustainable Cities and Society* 76:103440. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103440>
143. Huizenga C, Hui Z, Arens E (2001) A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment* 36:691–699. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00061-5)
144. Krawczyk N (2023) Analiza komfortu cieplnego i jakości powietrza wewnętrznego w budynkach użyteczności publicznej. Politechnika Świętokrzyska, Kielce
145. Gu C, Li Y, Nian X, et al (2023) Effects of masks on physiological and thermal responses of college students during outdoor activities. *Urban Climate* 52:101720. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101720>

146. Miernik wielofunkcyjny do pomiaru parametrów systemów wentylacji i klimatyzacji oraz jakości powietrza wewnętrznego. <https://static-int.testo.com/media/c5/ac/cffcf4a54151/testo-400-sondy-i-akcesoria.pdf>
147. Tam C, Zhao Y, Liao Z, Zhao L (2020) Mitigation Strategies for Overheating and High Carbon Dioxide Concentration within Institutional Buildings: A Case Study in Toronto, Canada. *Buildings* 10:124. <https://doi.org/10.3390/buildings10070124>
148. Borowski M, Zwolińska K, Czerwiński M (2022) An Experimental Study of Thermal Comfort and Indoor Air Quality—A Case Study of a Hotel Building. *Energies* 15:2026. <https://doi.org/10.3390/en15062026>
149. Mansour E, Vishinkin R, Rihet S, et al (2020) Measurement of temperature and relative humidity in exhaled breath. *Sensors and Actuators B: Chemical* 304:127371. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127371>
150. Baselga M, Alba JJ, Schuhmacher AJ (2023) Development and Validation of a Methodology to Measure Exhaled Carbon Dioxide (CO₂) and Control Indoor Air Renewal. *COVID* 3:1797–1817. <https://doi.org/10.3390/covid3120124>
151. Kruskal WH, Wallis WA (1952) Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47:583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
152. Dunn OJ (1964) Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics* 6:241–252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
153. Shrout PE, Fleiss JL (1979) Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin* 86:420–428. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.2.420>
154. Altman DG, Bland JM (2002) Commentary on Quantifying Agreement between Two Methods of Measurement. *Clinical Chemistry* 48:801–802. <https://doi.org/10.1093/clinchem/48.5.801>
155. Martin Bland J, Altman DouglasG (1986) STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL

MEASUREMENT. *The Lancet* 327:307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)

Wykaz rysunków, tabel, zdjęć i załączników

Fot. 1. Budynek Energis, Kielce, Politechnika Świętokrzyska: a) widok od strony południowo – zachodniej, b) widok od strony północno – zachodniej.....	52
Fot. 2. Termogramy zewnętrznej elewacji Energis podczas okresu zimowego dla a) widok od strony północno – zachodniej, b) widok od strony południowo – wschodniej.....	53
Fot. 3. Termogramy z wewnątrz budynku Energis dla okresu zimowego: a) korytarz II piętro, b) c) d) sale dydaktyczne	54
Fot. 4. Kompleks budynków dydaktycznych Politechniki Świętokrzyskiej (zdjęcia wraz z termogramami): a) A – Wydział Budownictwa i Architektury; b) B – Wydział Mechaniki i Budowy Maszyn; c) C – Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego oraz d) Aula Główna	55
Fot. 5. Komora klimatyczna: a) lewa część komory; b) prawa część komory	56
Fot. 6. Przykładowe zdjęcia badań z różnych sal i aul wykładowych Politechniki Świętokrzyskiej.....	59
Fot. 7. Przykład masek użytych podczas badań: a) maska cienka chirurgiczna, b) maska gruba bawełniana	60
Fot. 8. Stacja pomiarowa wraz z sondami Testo 400	61

Tabela 1. Wzory składające się na finalny model stworzony przez Fanger [10]	40
Tabela 2. Wybrane parametry obiektu Energis	52
Tabela 3. Dokładność sond na podstawie danych technicznych producenta urządzenia Testo 400 [146]	62
Tabela 4. Maksymalnie, minimalne oraz średnie wartości parametrów wewnętrznych badanych pomieszczeń.....	67
Tabela 5. Wyniki testu Kruskala – Wallisa dla badań bez masek [144], masek cienkich i masek grubych	99
Tabela 6. Wyniki testu Kruskala – Wallisa dla badań bez masek [144], z maskami cienkimi i maskami grubymi	100
Tabela 7. Porównanie wskaźników wrażeń termicznych TSV, PMV oraz odsetka osób niezadowolonych APPD oraz PPD	101
Tabela 8. Zestawienie TSV z PMV oryginalnym oraz ze zmodyfikowanym (PMV_{met}) o wartość tempa metabolizmu oraz z uwzględniającym tempo metabolizmu i nowych stałych (PMV_{modyf})	104
Tabela 9. Ocena zgodności pomiędzy TSV względem $PMV_{oryginalne}$ oraz PMV_{modyf}	107
Tabela 10. Ocena zgodności pomiędzy TSV oraz $PMV_{oryginalnego}$ i PMV_{modyf} oraz typu ubioru	112
Tabela 11. Porównanie wyników osób odczuwających dyskomfort na podstawie kwestionariuszy ankiet APPD, $PPD_{oryginalnego}$ obliczonego ze wzoru oraz PPD_{modyf} obliczonego na podstawie zmodyfikowanego wzoru	113
Tabela 12. Ocena zgodności pomiędzy APPD oraz $PPD_{oryginalne}$ oraz wg. PPD_{modyf}	115

Rys. 1. Metryka danych dotyczących a) wieku, b) wzrostu, c) wagi oraz d) indeksu BMI	57
Rys. 2. Temperatura powietrza i zawartość CO ₂ we wszystkich badanych pomieszczeniach	69
Rys. 3. Temperatura operatywna i wilgotność względna dla wszystkich pomieszczeń	69
Rys. 4. Wrażenia cieplne TSV studentów na podstawie ankiet wg. płci dla a) całości badań bez podziału na rodzaj masek oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -3: zbyt zimno, -2: za chłodno, -1: przyjemnie ciepło, 0: komfortowo, +1: przyjemnie ciepło, +2: za ciepło, +3: zbyt gorąco	71
Rys. 5. Ocena akceptowalności temperatury TAV powietrza na podstawie ankiet wg. płci dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: zdecydowanie nieprzyjemna, -1: nieprzyjemna, +1: akceptowalna, +2: komfortowa.....	73
Rys. 6. Preferencje temperatury TPV powietrza na podstawie ankiet wg. płci a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: zdecydowanie chłodniej, -1: chłodniej, 0: bez zmian, +1: cieplej, +2: zdecydowanie cieplej	74
Rys. 7. Zależność między TSV a TPV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych.....	76
Rys. 8. Zależność między TSV a TAV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych.....	77
Rys. 9. Zależność między TPV a TAV dla a) maski sumarycznie i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych.....	78
Rys. 10. Zależność między temperaturą operatywną a TSV dla a) maski sumarycznie i badań bez masek wg. [144] oraz b) dla masek cienkich i grubych.....	79
Rys. 11. Ocena wilgotności względnej AHV na podstawie ankiet wg. płci dla a) całości badań z bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: zbyt sucho, -1: dość sucho, 0: przyjemnie, +1: dość wilgotno. +2: zbyt wilgotno	80
Rys. 12. Preferencje wilgotności względnej na podstawie ankiet wg. płci a) maski sumarycznie oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -1: bardziej suche, 0: bez zmian, +1: bardziej wilgotne.....	82

Rys. 13. Zależność między wilgotnością względną a oceną AHV dla: a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski	83
Rys. 14. Zależność między HPV a AHV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) dla masek cienkich i grubych	84
Rys. 15. Ocena jakości powietrza na podstawie ankiet wg podziału na płeć dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube; gdzie -2: bardzo zła, -1: zła, 0: ani dobra ani zła, +1: dobra, +2: bardzo dobra	85
Rys. 16. Zależność między zawartością CO ₂ a subiektywną oceną jakości powietrza AQAV a) dla całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski wg. [144] oraz b) wg. podziału na rodzaj maski	86
Rys. 17. Zależności między jakością powietrza AQAV oraz GSV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski	87
Rys. 18. Ocena ogólnego samopoczucia GSV na podstawie ankiet wg płci dla: a) całości badań bez podziału na rodzaj maski oraz z podziałem na b) maski cienkie; c) maski grube	88
Rys. 19. Zależność między wrażeniami cieplnymi TSV a GSV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski	89
Rys. 20. Zależność między ogólnym samopoczuciem GSV a APV dla a) całości badań w maskach bez podziału na rodzaj i badań bez maski wg. [144] oraz b) wg. podziału na rodzaj maski	90
Rys. 21. Zależność między zawartością CO ₂ a średnimi wartościami TSV dla a) całości badań bez podziału na rodzaj maski i badań bez maski (wg. [144]) oraz b) wg. podziału na rodzaj maski	91
Rys. 22. Wrażenia termiczne TSV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube	92
Rys. 23. Akceptowalność temperatury TAV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube	94

Rys. 24 Preferencja temperatury TPV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube	95
Rys. 25. Zależność między TSV a TPV dla ubioru a) zimowego i badań bez masek wg. [144], b) zimowego z podziałem na maski cienkie i grube, c) letniego i badań bez masek wg. [144], d) letniego z podziałem na maski cienkie i grube	97
Rys. 26. TSV vs PMV, wraz z linią idealnego odwzorowania modelu	102
Rys. 27. Porównanie TSV i oryginalnego modelu PMV względem PMV_{met}	105
Rys. 28. Porównanie TSV i oryginalnego modelu PMV do PMV_{modyf} uwzględniającego nowe tempo metabolizmu oraz nowe wartości stałych.....	106
Rys. 29. Porównanie TSV vs. PMV (wartości oryginalne) za pomocą wykresu Blanda – Altmana.....	109
Rys. 30. Porównanie TSV vs. PMV_{modyf} za pomocą wykresu Blanda – Altmana.....	110
Rys. 31. Porównanie TSV i oryginalnego/ zmodyfikowanego wzoru na PMV badań w komorze klimatycznej.....	111
Rys. 32. Porównanie oryginalnego modelu PPD Fanger'a ze zmodyfikowanym wskaźnikiem PPD_{modyf}	114

Załącznik 1. Parametry mikroklimatu wewnątrz badanych sal, gdzie: TP – temperatura promieniowania, TCK – temperatura czarnej kuli, RH – wilgotność względna, V – prędkość powietrza, CO ₂ – stężenie dwutlenku węgla, LX – natężenie oświetlenia	146
Załącznik 2. Tabela z danymi wartości R ² oraz równaniami dopasowania wartości wyników masek cienkich i grubych na wykresach: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba	148
Załącznik 3. Tabela z danymi wartości R ² oraz równaniami dopasowania wartości wyników masek cienkich i grubych dla ubioru zimowego i letniego, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba.....	149
Załącznik 4. Wrażenia termiczne TSV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru zimowego i letniego dla wilgotności względnej a) 20%, b) 45% oraz c) 70%	150
Załącznik 5. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TSV i temperatury powietrza (Zał. 4) w komorze klimatycznej, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba	151
Załącznik 6. Akceptowalność temperatury TAV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru zimowego i letniego dla wilgotności względnej a) 20%, b) 45% oraz c) 70%	152
Załącznik 7. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TAV i temperatury powietrza (Zał. 6) w komorze klimatycznej, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba	153
Załącznik 8. Preferencja temperatury TPV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru zimowego i letniego dla wilgotności względnej a) 20%, b) 45% oraz 70%.....	154
Załącznik 9. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TPV i temperatury powietrza (Zał. 8) w komorze klimatycznej, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba	155
Załącznik 10. Zależność między TSV a TPV dla masek cienkich i grubych dla ubioru letniego lub zimowego z podziałem na wilgotność: a) 20%, b) 45% oraz c) 70%.....	156
Załącznik 11. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TSV i TPV dla badań z komory klimatycznej (Zał. 10), gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba	157
Załącznik 12. Dane statystyczne opracowane na podstawie badań dla masek cienkich i grubych na podstawie Testu T – studenta	158
Załącznik 13. Poziom istotności statystycznej opracowanej przy pomocy Testu T – studenta	159

Załączniki

Załącznik 1. Parametry mikroklimatu wewnątrz badanych sal, gdzie: TP – temperatura promieniowania, TCK – temperatura czarnej kuli, RH – wilgotność względna, V – prędkość powietrza, CO₂ – stężenie dwutlenku węgla, LX – natężenie oświetlenia

Lp. badania	Liczba osób	TP °C	TCK °C	RH %	V m/s	CO ₂ ppm	LX lx
1	20	23,4	23,5	49,7	0,08	438	119,9
2	49	21,8	21,9	48,29	0,11	1156	281,7
3	39	24,8	24,8	36,64	0,07	996	304,4
4	13	25,3	25,2	41,3	0,09	663	157,7
5	40	24,1	24,1	31,97	0,11	960	435,6
6	12	25,0	24,8	31,8	0,07	898	181,3
7	31	22,6	22,2	30,58	0,09	904	244,9
8	34	24,4	24,7	29,46	0,09	1491	455,8
9	48	23,5	23,7	30,42	0,1	1243	385,7
10	26	22	22,3	29,74	0,07	685	359,3
11	22	23,4	23,9	26,17	0,07	666	410,4
12	28	23,5	23,3	30,05	0,08	1081	253,2
13	24	22,7	22,7	27,27	0,09	635	807,7
14	25	20,9	22,2	32,18	0,1	638	376
15	13	21,7	22,5	32,25	0,06	826	103,8
16	27	24,3	24,2	25,33	0,05	635	300,5
17	35	22,1	23,2	32,64	0,07	1277	494,7
18	26	21	21,8	22,36	0,03	483	60,8
19	28	25,4	25,1	31,79	0,06	791	31,4
20	26	26,1	26,2	29,72	0,07	1012	777,8
21	12	22,6	23,9	23,81	0,08	453	392,9
22	28	25,4	25,7	33,67	0,05	1695	406,7
23	24	24,4	24,7	31,95	0,06	717	43,3
24	24	22,3	22,9	32,84	0,08	751	352,3
25	46	23,7	24,2	38,16	0,05	879	298,3
26	36	24,1	24,5	40,79	0,1	658	289
27	17	28,8	29,1	38,85	0,08	956	1355,1
28	14	25,2	25,6	35,56	0,1	430	217,3
29	21	26,7	26,7	38,22	0,1	1124	684,9
30	22	24,6	24,9	35,51	0,06	714	377,3
31	17	23,4	24,2	39,54	0,13	913	20,1
32	27	23,3	23,8	47,64	0,05	871	23,6

33	43	24,1	24,7	48,2	0,06	1124	208,2
34	8	26,2	26,2	52,71	0,07	648	250,1
35	19	27,3	27,7	56,22	0,08	694	1265,5
36	25	25,3	26,1	56,51	0,09	681	558
37	28	25,3	26,4	58,35	0,08	723	465,6
38	48	27,5	27,5	56,72	0,08	1063	117,7
39	20	24,2	24	41,18	0,08	1297	67,8
40	18	24,8	24,5	39,94	0,07	1412	36
41	31	22,2	23	27,62	0,13	901	360,2
42	14	25,1	24,7	38,02	0,05	2305	78,4
43	17	23,5	23,5	27,68	0,08	879	459,4
44	38	23,3	24,1	29,08	0,06	2963	407,2
45	36	23,6	24,2	37,63	0,06	1868	456,3

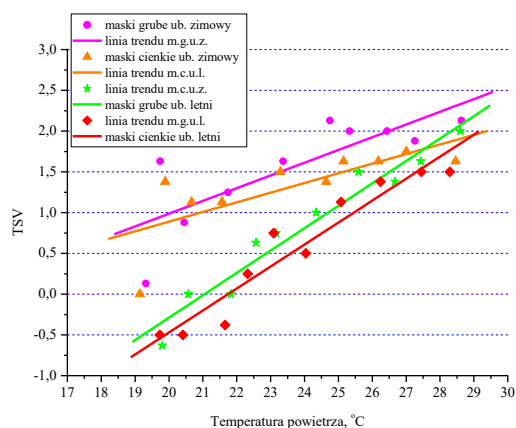
Załącznik 2. Tabela z danymi wartości R^2 oraz równaniami dopasowania wartości wyników masek cienkich i grubych na wykresach: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba

Lp.	Rodzaj maski	Wartość R^2	Równanie
Rys. 7	A	0,84	$TPV = -0,5023TSV + 0,068$
	B	0,74	$TPV = -0,4959TSV + 0,076$
Rys. 8	A	0,82	$TAV = -0,3581TSV^2 + 0,0877TSV + 1,3564$
	B	0,68	$TAV = -0,3864TSV^2 + 0,1614TSV + 1,3819$
Rys. 9	A	0,84	$TAV = -0,8122TPV^2 + 0,4395TPV + 1,3675$
	B	0,61	$TAV = -0,6354TPV^2 + 0,5286TPV + 1,3795$
Rys. 10	A	0,69	$TSV = 0,3685TO - 7,8864$
	B	0,53	$TSV = 0,3056TO - 6,1639$
Rys. 13	A	0,01	$AHV = 0,0027WW - 0,352$
	B	0,18	$AHV = 0,0169WW - 0,9213$
Rys. 14	A	0,58	$AHV = -1,3519HPV + 0,1619$
	B	0,81	$AHV = -1,3665HPV + 0,1991$
Rys. 16	A	0,046	$AQAV = -0,0002CO_2 + 0,3453$
	B	4E-06	$AQAV = 1E -0,6CO_2 + 0,1728$
Rys. 17	A	0,80	$GSV = 1,1167AQAV - 0,0406$
	B	0,60	$GSV = -1,1247AQAV - 0,0801$
Rys. 19	A	0,67	$GSV = -0,1644TSV^2 - 0,1525TSV + 0,5831$
	B	0,56	$GSV = -0,2693TSV^2 + 0,1884TSV + 0,4107$
Rys. 20	A	0,58	$APV = 0,3755GSV - 0,3199$
	B	0,07	$APV = 0,1336GSV - 0,229$
Rys. 21	A	0,01	$TSV = 0,00002CO_2 + 0,8552$
	B	0,01	$TSV = 0,0001CO_2 + 1,0956$

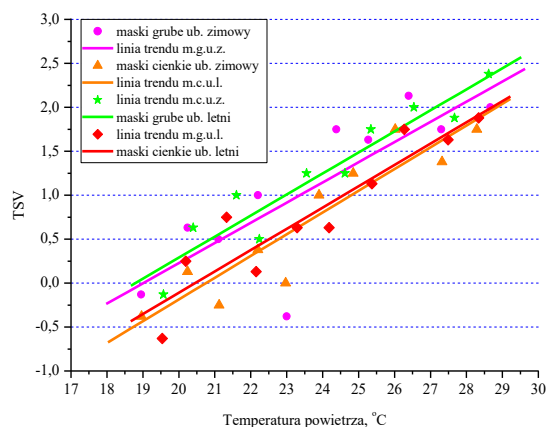
Załącznik 3. Tabela z danymi wartości R^2 oraz równaniami dopasowania wartości wyników masek cienkich i grubych dla ubioru zimowego i letniego, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba

Lp.	Rodzaj ubioru	Rodzaj maski	Wartość R^2	Równanie
Rys. 22	b) Ubiór zimowy	A	0,60	$TSV = 0,2001TP - 3,7518$
		B	0,61	$TSV = 0,22TP - 3,9619$
	d) Ubiór letni	A	0,78	$TSV = 0,2476TP - 5,024$
		B	0,81	$TSV = 0,2589TP - 5,0108$
Rys. 23	b) Ubiór zimowy	A	0,34	$TAV = -0,0146TP^2 + 0,5891TP - 4,7655$
		B	0,50	$TAV = -0,0239TP^2 + 0,9927TP - 9,5442$
	d) Ubiór letni	A	0,68	$TAV = -0,039TP^2 + 1,7491TP - 18,507$
		B	0,72	$TAV = -0,0337TP^2 + 1,4261TP - 14,182$
Rys. 24	b) Ubiór zimowy	A	0,67	$TPV = -0,1469TP + 3,0043$
		B	0,61	$TPV = -0,1505TP + 2,9355$
	d) Ubiór letni	A	0,56	$TPV = -0,1266TP + 2,4487$
		B	0,68	$TPV = -0,138TP + 2,4082$
Rys. 25	b) Ubiór zimowy	A	0,84	$TPV = -0,6178TSV + 0,1424$
		B	0,89	$TPV = -0,6431TSV + 0,1716$
	d) Ubiór letni	A	0,83	$TPV = -0,5479TSV - 0,0864$
		B	0,86	$TPV = 0,5395TSV - 0,2556$

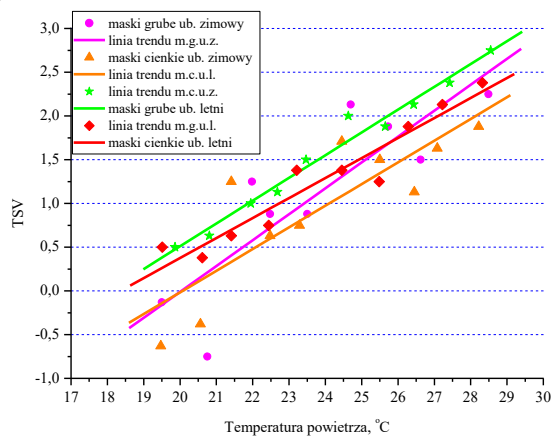
Załącznik 4. Wrażenia termiczne TSV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru zimowego i letniego dla wilgotności względnej a) 20%, b) 45% oraz c) 70%



a)



b)

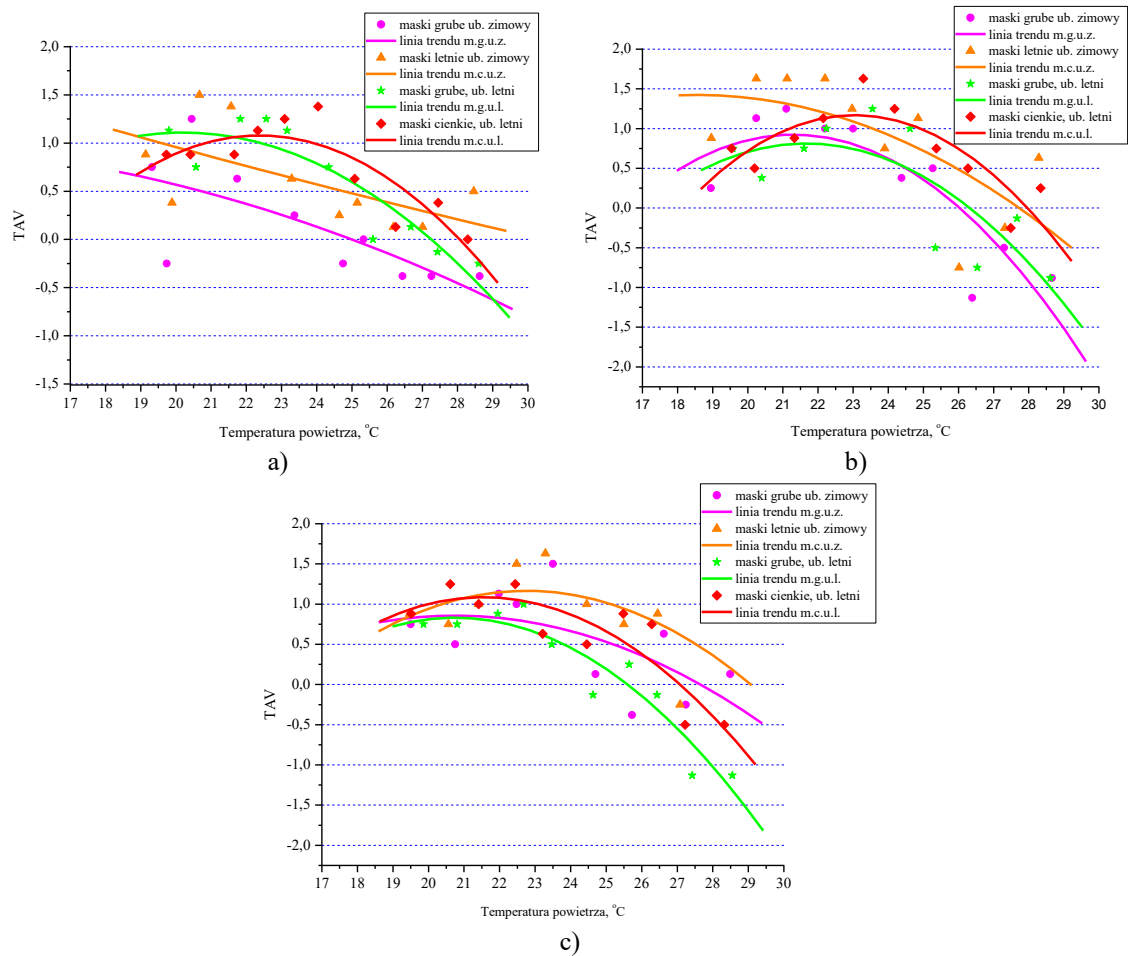


c)

Załącznik 5. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TSV i temperatury powietrza (Zał. 4) w komorze klimatycznej, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba

Wilgotność względna	Rodzaj ubioru	Rodzaj maski	Wartość R^2	Równanie
20%	Ubiór zimowy	A	0,55	$TSV = 0,1183TP - 1,4763$
		B	0,64	$TSV = 0,1562TP - 2,1369$
20%	Ubiór letni	A	0,92	$TSV = 0,2696TP - 5,8612$
		B	0,95	$TSV = 0,2748TP - 5,7838$
45%	Ubiór zimowy	A	0,86	$TSV = 0,2474TP - 5,1336$
		B	0,66	$TSV = 0,2297TP - 4,3666$
45%	Ubiór letni	A	0,85	$TSV = 0,2423TP - 4,9547$
		B	0,90	$TSV = 0,2394TP - 4,499$
70%	Ubiór zimowy	A	0,71	$TSV = 0,2478TP - 4,9736$
		B	0,75	$TSV = 0,2962TP - 5,9351$
70%	Ubiór letni	A	0,92	$TSV = 0,2288TP - 4,2$
		B	0,98	$TSV = 0,2604TP - 4,698$

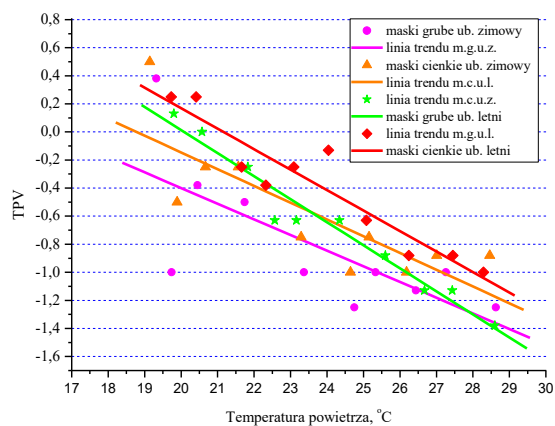
Załącznik 6. Akceptowalność temperatury TAV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru zimowego i letniego dla wilgotności względnej a) 20%, b) 45% oraz c) 70%



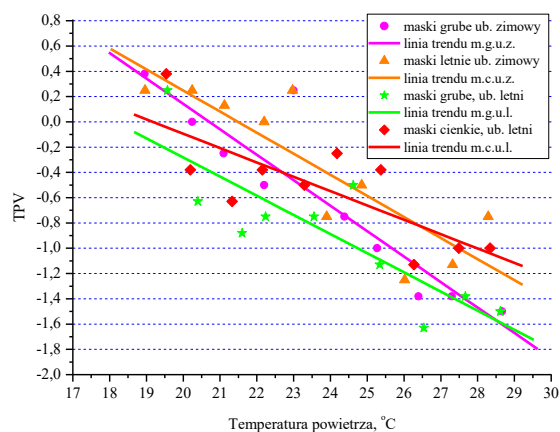
Załącznik 7. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TAV i temperatury powietrza (Zał. 6) w komorze klimatycznej, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba

Wilgotność względna	Rodzaj ubioru	Rodzaj maski	Wartość R^2	Równanie
20%	Ubiór zimowy	A	0,38	$TAV = 0,0008TP^2 - 0,1311TP - 3,2704$
		B	0,52	$TAV = -0,0047TP^2 + 0,0976TP + 0,4943$
20%	Ubiór letni	A	0,74	$TAV = -0,0334TP^2 + 1,493TP - 15,622$
		B	0,83	$TAV = -0,0224TP^2 + 0,904TP - 8,0274$
45%	Ubiór zimowy	A	0,46	$TAV = -0,0168TP^2 + 0,6277TP - 4,3999$
		B	0,75	$TAV = -0,0411TP^2 + 1,7527TP - 17,742$
45%	Ubiór letni	A	0,68	$TAV = -0,0483TP^2 + 2,2256TP - 24,48$
		B	0,63	$TAV = -0,0375TP^2 + 1,6234TP - 16,775$
70%	Ubiór zimowy	A	0,31	$TAV = -0,0292TP^2 + 1,3289TP - 13,954$
		B	0,37	$TAV = -0,0179TP^2 + 0,7427TP - 6,8454$
70%	Ubiór letni	A	0,77	$TAV = -0,0355TP^2 + 1,5293TP - 15,387$
		B	0,89	$TAV = -0,0352TP^2 + 1,4625TP - 14,342$

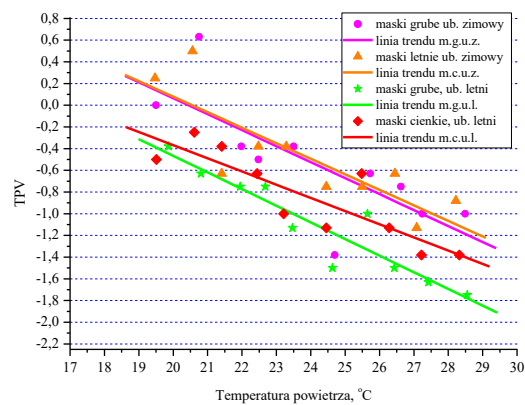
Załącznik 8. Preferencja temperatury TPV wg badań w komorze klimatycznej dla ubioru zimowego i letniego dla wilgotności względnej a) 20%, b) 45% oraz 70%



a)



b)

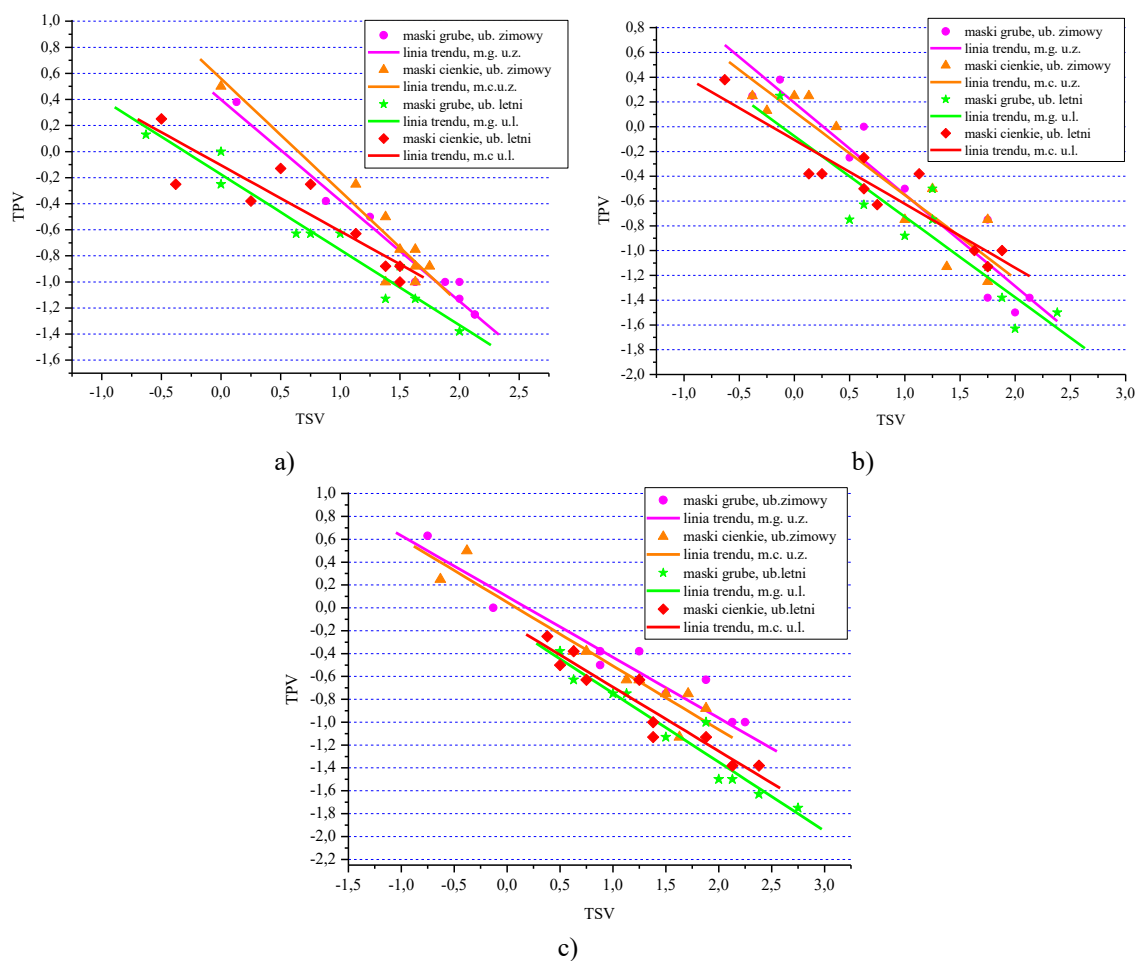


c)

Załącznik 9. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TPV i temperatury powietrza (Zał. 8) w komorze klimatycznej, gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba

Wilgotność względna	Rodzaj ubioru	Rodzaj maski	Wartość R^2	Równanie
20%	Ubiór zimowy	A	0,66	$TPV = -0,1194TP + 2,2409$
		B	0,52	$TPV = -0,1116TP + 1,8326$
20%	Ubiór letni	A	0,89	$TPV = -0,1459TP + 3,0874$
		B	0,96	$TPV = -0,1642TP + 3,2973$
45%	Ubiór zimowy	A	0,74	$TPV = -0,1668TP + 3,584$
		B	0,85	$TPV = -0,2014TP + 4,1712$
45%	Ubiór letni	A	0,60	$TPV = -0,1135TP + 2,1759$
		B	0,70	$TPV = -0,1516TP + 2,7496$
70%	Ubiór zimowy	A	0,69	$TPV = -0,1431TP + 2,9417$
		B	0,59	$TPV = -0,1474TP + 3,0122$
70%	Ubiór letni	A	0,75	$TPV = -0,1216TP + 2,0635$
		B	0,87	$TPV = -0,1534TP + 2,6027$

Załącznik 10. Zależność między TSV a TPV dla masek cienkich i grubych dla ubioru letniego lub zimowego z podziałem na wilgotność: a) 20%, b) 45% oraz c) 70%



Załącznik 11. Współczynnik determinacji i jej korelacja dla zależności TSV i TPV dla badań z komory klimatycznej (Zał. 10), gdzie: „A” – maska cienka, „B” – maska gruba

Wilgotność względna	Rodzaj ubioru	Rodzaj maski	Wartość R^2	Równanie
20%	Ubiór zimowy	A	0,97	$TPV = -0,7722TSV + 0,3968$
		B	0,87	$TPV = -0,8607TSV + 0,5576$
20%	Ubiór letni	A	0,95	$TPV = 0,5746TSV - 0,1753$
		B	0,84	$TPV = -0,5046TSV - 0,1034$
45%	Ubiór zimowy	A	0,91	$TPV = -0,7384TSV + 0,1908$
		B	0,86	$TPV = -0,6728TSV + 0,1216$
45%	Ubiór letni	A	0,86	$TPV = -0,65TSV - 0,0744$
		B	0,85	$TPV = -0,5145TSV - 0,1056$
70%	Ubiór zimowy	A	0,89	$TPV = 0,5299TSV + 0,0994$
		B	0,91	$TPV = -0,5552TSV + 0,0508$
70%	Ubiór letni	A	0,93	$TPV = -0,6032TSV - 0,1409$
		B	0,90	$TPV = -0,5588TSV - 0,1301$

Załącznik 12. Dane statystyczne opracowane na podstawie badań dla masek cienkich i grubych
na podstawie Testu T –studenta

Grupa	Średnia	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy średniej	Dolna granica	Górna granica
Maski cienkie	0,88	0,63	0,10	0,68	1,08
Maski grube	1,11	0,64	0,10	0,90	1,31

Załącznik 13. Poziom istotności statystycznej opracowanej przy pomocy Testu T–studenta

Istotność p	Różnica średnich	Błąd standardowy różnicy	Dolna granica	Górna granica
0,126	-0,22	0,14	-0,51	0,06