

dr inż. Artur Miszczuk¹⁾
ORCID: 0000-0002-1743-1451

Assessment of thermal comfort in residential buildings in the Iron Triangle of South Australia

Ocena komfortu cieplnego w budynkach mieszkalnych w Żelaznym Trójkącie Australii Południowej

DOI: 10.15199/33.2025.12.22

Abstract. To assess the impact of indoor environmental conditions on occupants' thermal comfort, a study was conducted in 30 homes in South Australia. A total of 3,540 surveys and sensor data on indoor conditions were collected. The analysis showed a neutral operative temperature of 23.9°C (living rooms: 23.7°C, bedrooms: 24.4°C). Thermal comfort ranges defined using the MTSV method were broader than those from the PMV method, suggesting greater occupant tolerance and potential energy savings.

Keywords: thermal comfort; operative temperature; PMV (Predicted Mean Vote); energy efficiency.

Streszczenie. W celu oceny wpływu warunków wewnętrznych na komfort cieplny mieszkańców badanie przeprowadzono w trzydziestu domach (Port Augusta, Whyalla, Port Pirie) w Australii Południowej. Zebrano 3540 ankiet oraz dane z czujników mierzących warunki wewnętrzne. Analiza wykazała, że temperatura operatywna wynosi 23,9°C (salony: 23,7°C, sypialnie: 24,4°C). Zakres komfortu cieplnego wyznaczonego metodą MTSV jest szerszy niż uzyskany metodą PMV, co może oznaczać większą tolerancję mieszkańców i potencjalne oszczędności energii. **Słowa kluczowe:** komfort cieplny; temperatura operatywna; PMV (Predicted Mean Vote); efektywność energetyczna.

In industrialised countries, a substantial proportion of energy consumed in buildings is allocated to ensuring thermal comfort [1], indicating significant potential for energy savings during the operational phase [2–4]. However, inadequate energy consumption reduction has the potential to compromise building comfort. The present study analyses the indoor climate of buildings and the subjective perception thereof by residents in three cities in the Iron Triangle region of South Australia. The objective of this study was to ascertain the correlation between the indoor environment and perceptions of thermal comfort. This is a multifaceted phenomenon influenced by various factors, including metabolic activity, clothing insulation, air temperature, radiant temperature, humidity, and airflow velocity. The analysis employed the PMV (Predicted Mean Vote) index and the (Operative Temperature) index, which integrates these parameters.

As demonstrated in [5], elevated indoor temperatures have the capacity to engender prolonged discomfort amongst occupants, in addition to exerting a detrimental effect on their health. Consequently, field studies in various Australian climate zones are imperative to develop local criteria for assessing thermal comfort. This is of particular significance in South Australia's climate zone 4, where episodes of extreme heat are a frequent occurrence.

The Australian building energy efficiency rating system, NatHERS (Nationwide House Energy Rating Scheme), operates under the assumption of uniform thermal comfort across the country. However, there is a paucity of empirical research

W krajach uprzemysłowionych znaczna część energii zużywanej w budynkach przeznaczana jest na zapewnienie komfortu cieplnego [1], co wskazuje na istotny potencjał oszczędności energii w fazie eksploatacji [2–4]. Jednak nieodpowiednia redukcja zużycia energii może pogarszać komfort użytkowania budynków. Prezentowane badanie analizuje klimat środowiska wewnętrznego budynków oraz ich subiektywny odbiór przez mieszkańców w trzech miastach Żelaznego Trójkąta w Australii Południowej. Celem było zrozumienie zależności między środowiskiem wewnętrznym a odczuciami komfortu cieplnego, który zależy m.in. od aktywności metabolicznej, izolacyjności odzieży, temperatury powietrza, temperatury promieniowania, wilgotności i prędkości przepływu powietrza. Do analizy wykorzystano wskaźnik PMV (Predicted Mean Vote) oraz T_o (temperaturę operatywną), integrującą wymienione parametry.

Wysoka temperatura wewnątrz budynków może powodować długotrwały dyskomfort i negatywnie wpływać na zdrowie mieszkańców [5]. Konieczne są więc badania terenowe w różnych strefach klimatycznych Australii, które pozwolą opracować lokalne kryteria oceny komfortu cieplnego. Szczególnie istotne jest to w strefie klimatycznej 4 Australii Południowej, gdzie często występują epizody ekstremalnych upałów.

Obowiązujący w Australii system oceny efektywności energetycznej budynków NatHERS (Nationwide House Energy Rating Scheme) zakłada jednolite odczucia komfortu cieplnego w całym kraju. Brakuje jednak badań empirycznych dokumentujących praktyki dotyczące ogrzewania i chłodzenia w tej strefie klimatycznej oraz analizujących ryzyko przegrzewania budynków w warunkach naturalnych, bez wsparcia systemów chłodzenia. Powstaje pytanie, czy kryteria przyjmowane przez

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; artur.miszczuk@pw.edu.pl

documenting heating and cooling practices in this climate zone and analysing the risk of overheating buildings under natural conditions, without the support of cooling systems. The question arises as to whether the NatHERS criteria are adequate for regions with extreme weather conditions, such as the Iron Triangle (Port Augusta, Whyalla, Port Pirie).

The primary question that this research seeks to address is as follows: The objective of this study is to examine the relationships between indoor conditions in residential buildings and the subjective thermal comfort of South Australian residents. Furthermore, the study will explore the differences between standard PMV (Predicted Mean Vote) models and actual user assessments (Mean Thermal Sensation Votes). The responses thus obtained should furnish a superior comprehension of thermal comfort in hot and dry climates and could provide a foundation for modifying the NatHERS system to accommodate local occupant preferences and promote increased building energy efficiency.

Literature Review

The importance of thermal comfort has been extensively documented in the extant literature (see reference 6). The research conducted by Frontczak and Wargocki [7] has resulted in a significant advancement in our comprehension of the elements that influence indoor environmental quality and thermal comfort. The importance of maintaining optimal conditions for the enhancement of well-being and productivity has been corroborated by a substantial body of research [8, 9]. In Australia, the studies conducted by de Dear, Kim, and Parkinson's [10] in residential homes in Sydney demonstrated that the neutral temperature experienced by occupants was lower than what was predicted by the adaptive ASHRAE model. Furthermore, the range of acceptable comfort levels was found to be considerably broader than anticipated. Converging conclusions were obtained in Darwin, where Williamson and Daniel [11] juxtaposed data from two waves of studies in naturally ventilated homes (1988/89 and 2013/14), thereby substantiating the variability of comfort criteria over time.

Two models of thermal comfort are dominant in the extant literature. The first of these is the PMV steady-state model, which was developed by Fanger [9] and forms the basis of both ASHRAE Standard 55 [12] and ISO 7730 [8]. In conjunction with the PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) index, this model is extensively utilised in the evaluation of the thermal environment [9]. However, field studies, such as those conducted by Indraganti [13] in India, demonstrate that PMV overestimates subjective thermal sensations, and the comfortable temperature range is wider than indicated by standards. The second approach is the adaptive model of thermal comfort, proposed by Humphreys [14] and developed by de Dear and Brager [15]. It is important to note that the model under discussion takes into account behavioural adaptations and the need to allow occupants control over indoor conditions. Research has demonstrated that physiological acclimatisation exerts a substantial influence on thermal perception [16], and the predictions made by the PMV model frequently diverge

NatHERS są adekwatne dla regionów o ekstremalnych warunkach pogodowych, takich jak Żelazny Trójkąt (Port Augusta, Whyalla, Port Pirie).

Główne pytanie prezentowanych badań brzmi: Jakie są zależności między warunkami wewnętrznymi w budynkach mieszkalnych a subiektywnym komfortem cieplnym mieszkańców Australii Południowej oraz w jakim stopniu standardowe modele PMV (Predicted Mean Vote) różnią się od rzeczywistych ocen użytkowników MTSV (Mean Thermal Sensation Votes)? Uzyskane odpowiedzi pozwolą lepiej zrozumieć komfort cieplny w gorącym i suchym klimacie, a jednocześnie mogą stanowić podstawę do modyfikacji systemu NatHERS w taki sposób, aby uwzględnić lokalne preferencje mieszkańców i sprzyjał zwiększeniu efektywności energetycznej budynków.

Przegląd literatury

Znaczenie komfortu cieplnego zostało szeroko udokumentowane w literaturze [6]. Badania Frontczaka i Wargockiego [7] pogłębiły wiedzę na temat czynników wpływających na jakość środowiska wewnętrznego i komfort cieplny. Utrzymanie optymalnych warunków ma kluczowe znaczenie dla samopoczucia i wydajności, co potwierdzają liczne badania [8, 9]. W Australii de Dear, Kim i Parkinson [10] prowadzili badania w domach mieszkalnych w Sydney, które wykazały, że neutralna temperatura domowników była niższa niż przewiduje adaptacyjny model ASHRAE, a zakres akceptowalnego komfortu był znacznie szerszy. Podobne wnioski przyniosły obserwacje z Darwin, gdzie Williamson i Daniel [11] porównali dane z dwóch fal badań w naturalnie wentylowanych domach (1988/89 i 2013/14), potwierdzając zmienność kryteriów komfortu w długiej perspektywie czasowej.

W literaturze dominują dwa modele komfortu cieplnego. Jeden to model stanu ustalonego PMV, opracowany przez Fangera [9], stanowiący podstawę norm ASHRAE Standard 55 [12] oraz ISO 7730 [8]. Wraz ze wskaźnikiem PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) model ten jest szeroko stosowany w ocenie środowiska termicznego [9]. Jednak badania terenowe, jak te prowadzone przez Indraganti [13] w Indiach, wykazują, że PMV zawyża subiektywne odczucia ciepłe, a zakres komfortowej temperatury jest szerszy, niż wskazują normy. Drugim podejściem jest adaptacyjny model komfortu cieplnego, zaproponowany przez Humphreysa [14], a rozwijany przez de Deara i Bragera [15]. Uwzględnia on adaptacje behawioralne oraz konieczność umożliwienia użytkownikom kontroli nad warunkami wewnętrznymi. Badania wykazały, że aklimatyzacja fizjologiczna odgrywa istotną rolę w percepcji cieplnej [16], a przewidywania modelu PMV często odbiegają od rzeczywistych ocen MTSV [13, 17, 18]. Na przykład Becker i in. [17] wykazali, że MTSV w izraelskich domach bez klimatyzacji były wyższe niż wartości PMV, a Al-Ajmi i in. [18] stwierdzili systematyczne zaniżanie neutralnej temperatury w kuwejskich domach. Ioannou i in. [19] również zauważyli, że PMV nie przewiduje dokładnie odczuć gorąca i zimna. Podobne wnioski przyniosło badanie Jeonga i in. [20] w Australii, gdzie adaptacyjny model ASHRAE nie odzwierciedlał

from the observed MTSV estimates [13, 17, 18]. For instance, Becker et al. [17] demonstrated that the mean temperature of the indoor environment (MTSV) in Israeli homes lacking air conditioning exceeded the PMV values. Furthermore, Al-Ajmi et al. [18] identified a systematic underestimation of the neutral temperature in Kuwaiti homes. Ioannou et al. [19] also noted that PMV does not accurately predict the sensation of hot and cold. Converging conclusions were obtained in a study by Jeong et al. [20] in Australia, wherein the adaptive ASHRAE model did not reflect the broad spectrum of locally acceptable temperatures. These findings indicate the necessity for local adaptation of thermal comfort assessment methods.

It is evident from the Australian studies that consideration must be given to local conditions. De Dear et al. [21] demonstrated that students' thermal preferences in New South Wales schools differed from the predictions of normative models, and a review by Vaughan et al. [22] highlighted the importance of specific school conditions. Furthermore, in public spaces, Shooshtarian et al. [23] emphasised the necessity for a more comprehensive consideration of psychological and qualitative factors in the evaluation of thermal comfort. These findings indicate the necessity for local adaptation of thermal comfort assessment methods, as universal models such as PMV or adaptive ASHRAE do not fully reflect Australian climatic and operating conditions.

Objective and framework

The present study investigates the perception of indoor environmental parameters by residents in three South Australian cities, constituting the so-called Iron Triangle. This investigation was conducted from June 2023 to February 2024. The region is distinguished by its propensity for extreme temperatures, marked by elevated summer temperatures, and substantial annual variability, which has a detrimental effect on the well-being and health of the population (e.g., increased fatigue, respiratory distress) [24]. The study period was meticulously designed to encompass the most significant seasonal variations, namely summer (December-February) and winter (June-August).

The objective of the present study was to ascertain the correlation between indoor environmental factors and the subjective perceptions of thermal comfort among residents. The study incorporated the following elements:

- the objective of this study is to characterise the thermal environment of buildings in the Iron Triangle region;
- the determination of thermal comfort temperatures and acceptable temperature ranges is of paramount importance.

The results provide further insight into the issue of thermal comfort in residential buildings in hot climates. The relationships that have been identified between indoor conditions and occupant perceptions have the potential to inform the design and management of buildings, with the aim of enhancing comfort and energy efficiency in the analysed climate zone. The approach adopted, which entailed the integration of quantitative and qualitative data, facilitated the development of a multidimensional depiction of thermal comfort.

szerokiego zakresu lokalnie akceptowalnej temperatury. Odkrycia te wskazują na konieczność lokalnego dostosowania metod oceny komfortu cieplnego.

Badania australijskie potwierdzają konieczność uwzględnienia lokalnych uwarunkowań. De Dear i in. [21] wykazali, że preferencje cieplne uczniów w szkołach w Nowej Południowej Walii różniły się od prognoz modeli normatywnych, a przegląd Vaughan i in. [22] podkreślił znaczenie specyfiki warunków szkolnych. Dodatkowo w przestrzeniach publicznych Shooshtarian i in. [23] zwrócili uwagę na potrzebę szerszego uwzględnienia czynników psychologicznych i jakościowych w ocenie komfortu cieplnego. Odkrycia te wskazują na konieczność lokalnego dostosowania metod oceny komfortu cieplnego, gdyż uniwersalne modele, takie jak PMV czy adaptacyjny ASHRAE, nie w pełni odzwierciedlają australijskie warunki klimatyczne i użytkowe.

Cel i zakres badania

Parametry środowiska wewnętrznego oraz ich percepcję przez mieszkańców badano od czerwca 2023 do lutego 2024 r. w trzech miastach Australii Południowej, tworzących tzw. Żelazny Trójkąt. Region ten cechuje się częstym występowaniem ekstremalnej temperatury, w szczególności wysokiej temperatury latem oraz dużą zmiennością roczną, co negatywnie wpływa na komfort i zdrowie mieszkańców (np. nasilone zmęczenie, trudności w oddychaniu) [24]. Okres badawczy został wyznaczony w taki sposób, aby obejmował analizę najważniejszych pór roku, tj. lata (grudzień – luty) oraz zimy (czerwiec – sierpień).

Celem badania było określenie zależności między warunkami panującymi wewnątrz budynków a subiektywnym odczuciem komfortu cieplnego mieszkańców. Obejmowały one:

- charakterystykę środowiska termicznego budynków w regionie Żelaznego Trójkąta;
- wyznaczenie temperatury komfortu cieplnego oraz akceptowalnego zakresu temperatury.

Uzyskane wyniki pogłębiają wiedzę dotyczącą komfortu cieplnego w budownictwie mieszkaniowym w gorącym klimacie. Zidentyfikowane zależności pomiędzy warunkami wewnętrznymi a odczuciami użytkowników mogą wspierać projektowanie oraz zarządzanie budynkami w sposób sprzyjający poprawie komfortu i efektywności energetycznej w analizowanej strefie klimatycznej. Zastosowane podejście, łączące dane ilościowe i jakościowe, umożliwiło uzyskanie wielowymiarowego obrazu komfortu cieplnego. Wyniki te pozostają spójne z wcześniejszymi badaniami podkreślającymi potrzebę uwzględniania preferencji użytkowników w praktykach projektowych i eksploatacyjnych.

Metoda badania

Pomiary. W prezentowanym badaniu komfort cieplny oceniano na podstawie temperatury operatywnej oraz wskaźnika PMV, które integrują takie parametry, jak temperatura powietrza, temperatura promieniowania, wilgotność względna oraz prędkość przepływu powietrza (z uwzględnieniem izolacyjności odzieży i metabolizmu), umożliwiając kompleksową

These results are consistent with previous studies emphasising the need to incorporate occupant preferences into design and operational practices.

Research method

Measurements. In the present study, thermal comfort was appraised on the basis of the operative temperature and the PMV index. The PMV index integrates parameters such as air temperature, radiant temperature, relative humidity, and airflow velocity (taking into account clothing insulation and metabolism), thus enabling a comprehensive analysis of the conditions experienced by occupants [25]. The measurements were obtained through the utilisation of a high-accuracy HOBO MX1104 data logger. The parameters of the sensors are enumerated in Table 1. The data were systematically collected at 15-minute intervals from June 2023 to February 2024.

Climate Characteristics. The Iron Triangle region is distinguished by hot, dry summers and mild winters. The mean annual temperature is 20–25°C. It is evident that during the summer months (December–February), the maximum temperature frequently surpasses 40°C, accompanied by minimal precipitation. During the winter months (June–August), the average temperature is 10–15°C, and at night, temperatures can drop below 5°C. Precipitation levels are low, with the majority occurring during the winter months, and the annual total rarely exceeding 250 mm/m² [27–29].

Building Characteristics. In the Iron Triangle region, detached single-family homes are the most prevalent form of housing, typically comprising one or two storeys and exhibiting a simple, functional design. The architectural features of these dwellings include complex shapes, extensive glazing, the incorporation of verandas, and the presence of terraces, which serve to provide shade and mitigate the effects of overheating. Roofs are generally pitched (Photo). The majority of residential properties are equipped with mechanical ventilation, air conditioning, and heating systems.

A total of thirty buildings were selected for the purposes of analysis, with eleven located in Port Pirie, ten in Port Augusta, and nine in Whyalla. Brick or timber-framed walls predominate. The presence of thermal insulation was documented in 47% of the buildings under study, while 40% lacked this feature, and data pertaining to 13% were not available. A total of 47% of the buildings were found to have wooden floors, while 40% had ceramic tiles on concrete (Figure 1). Roof construction was predominantly of timber, with 87% of roofs being insulated, 7% uninsulated, and 6% lacking pertinent data. The data were collected during the initial visit to the study participants, with the collection process informed by building documentation and surveys completed during interviews with residents.

Survey questionnaire. Research indicates that the average resident allocates 40–45% of their daily activities to the living room and 30–35% to the bedroom, utilising this time for sleep, reading and other passive activities [30]. Consequently, the study concentrated on the living room and bedroom as the key functional spaces. During the course of the study, participants were required to respond to survey questions after spend-

analizę warunków odczuwalnych przez użytkowników [25]. Pomiarów dokonano za pomocą rejestratora danych HOBO MX1104 o wysokiej dokładności. Parametry czujników podano w tabeli 1. Dane były rejestrowane automatycznie co 15 min w okresie od czerwca 2023 do lutego 2024 r.

Charakterystyka klimatu. Region Żelaznego Trójkąta charakteryzuje się gorącym, suchym latem oraz łagodną zimą. Średnia roczna temperatura wynosi 20–25°C. W okresie letnim (grudzień – luty) maksymalna temperatura często przekracza 40°C przy minimalnych opadach. W miesiącach zimowych (czerwiec – sierpień) średnia temperatura wynosi 10–15°C, a nocami może spadać poniżej 5°C. Opady są małe, skoncentrowane głównie w zimie, a ich roczna suma rzadko przekracza 250 mm/m² [27÷29].

Table 1. Specification of the HOBO MX1104 device [26]

Tabela 1. Specyfikacja urządzenia HOBO MX1104 [26]

Measurement/ Rodzaj pomiaru (czujnik)	Range/ Zakres pomiarowy	Accuracy/ Dokładność
Air Temperature Probe/ Temperatura promieniowania	-40° to 100°C/ -40° do 100°C	±0,15°C from 0° to 50°C/ ±0,15°C w zakresie od 0 do 50°C
Temperature Sensor/ Temperatura powietrza	-20° to 70°C/ -20° do 70°C	±0,20°C from 0° to 50°C/ ±0,20°C w zakresie od 0 do 50°C
RH Sensor/ Wilgotność względna	0% to 100% at -20° to 70°C/ 0% do 100% w zakresie od -20° do 70°C	±2,5% from 10% to 90% (typical) to a maximum of ±3,5% (including hysteresis) at 25°C: below 10% and above 90% ±5% (typical)/ ±2,5% w zakresie od 10 do 90% (typowo) maksymalnie ±3,5% (z uwzględnieniem histerezy) przy 25°C: poniżej 10%, powyżej 90% ±5% (typowo)
Air Velocity Sensor/ Prędkość przepływu powietrza	0,15 to 1,0 m/s/ 0,15 do 1,0 m/s	± 1% of reading + 0,05 m/s/ ±1% odczytu + 0,05 m/s

Charakterystyka budynków. W regionie Żelaznego Trójkąta dominującą formą zabudowy mieszkaniowej są wolnostojące domy jednorodzinne, najczęściej jedno- lub dwukondygnacyjne, o prostej, funkcjonalnej formie. Cechują je rozbudowane bryły, duże przeszklenia, werandy i tarasy zapewniające zacienienie oraz ograniczające przegrzewanie. Dachy są zazwyczaj spadziste (fotografia). Większość domów ma systemy wentylacji mechanicznej, klimatyzację i ogrzewanie.

Do analizy wybrano trzydzieści budynków: jedenaście w Port Pirie, dziesięć w Port Augusta oraz dziewięć w Whyalla. Przeważają konstrukcje ścian murowane z cegły lub o szkieletce drewnianym. Izolację termiczną ścian ma 47% z badanych budynków, 40% jej nie ma, a w 13% przypadków brak danych. W 47% budynków podłogi wykonano z drewna, a w 40% zastosowano płytki ceramiczne na betonie (rysunek 1). Dachy mają konstrukcję drewnianą i w 87% są zaizolowane, 7% są niezaizolowane, a w 6% brak informacji. Dane zebrano podczas pierwszej wizyty



An example of a typical single-family building participating in the research

Przykład typowego badanego budynku jednorodzinnego

ing a sufficient amount of time in the analysed room (see Table 2). The residents primarily assessed their comfort in the living room during the day, while in the bedroom they did so in the evening, at night, or in the morning.

The following values were utilised in the calculation of clothing insulation: very light – 0.4 clo, light – 0.6 clo, moderate – 1.0 clo, warm – 1.5 clo, very warm – 2.0 clo (where 1.0 clo = 0.155 [(m²·°C)/W]). The respondents' responses to the survey questions were recorded, along with the exact time at which they were provided. The utilisation of online surveys facilitated the automated allocation of a specific date and time to each response. A total of 3,540 responses were received, of which 2,488 related to the living room and 1,052 to the bedroom. The study comprised a total of 38 participants. The mean number of household members per participant was greater than two, and it should be noted that not all permanent residents expressed an interest in participating. The study group was predominantly female, constituting 67% of the total sample, and the majority of respondents were over the age of 50. The mean age of the subjects was 56.

The study's limitations stemmed primarily from inconsistent environmental conditions, resulting from the sensor being located at a single, fixed point in the room. The absence of spatial coverage hindered the capture of dynamic changes, including those associated with airflow velocity, which could have resulted in measurement inaccuracies. In order to enhance the precision of the measurement, it is recommended that a mapping device be employed, such that spatial recording of environmental parameters is facilitated. Mapping the air velocity distribution facilitates the identification of local variations, thereby enhancing data reliability and facilitating a more precise characterisation of the actual conditions in the analysed spaces.

The Thermal Sensation Vote (TSV) was determined using a seven-point thermal sensation scale (–3 – cold, –2 – cool, –1 – slightly cool, 0 – neutral, +1 – slightly warm, +2 – warm, +3 – hot) based on questionnaires completed by participants. The utilisation of these data was instrumental in determining the acceptable operative temperature through the implementation of linear regression analysis. The classification of thermal comfort was conducted in accordance with the European Standard EN 16798–1:2019 [31].

The relationship between the indoor environment category, the PMV index, and the predicted percentage of dissatisfied people

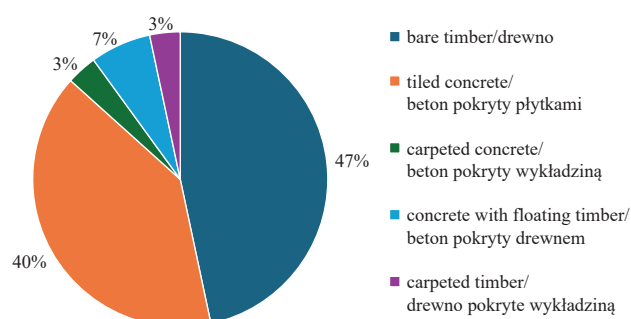


Fig. 1. The external floor material

Rys. 1. Konstrukcja podłogi na gruncie

u uczestników badań, na podstawie dokumentacji budynków oraz ankiet wypełnianych w trakcie rozmów z mieszkańcami.

Kwestionariusz ankiety. Przeciętny mieszkaniec spędza średnio 40–45% dziennej aktywności w salonie, natomiast 30–35% w sypialni, przeznaczając ten czas na sen, czytanie i inne bierne zajęcia [30]. Z tego względu badanie skoncentrowano na salonie i sypialni jako kluczowych przestrzeniach użytkowych. W trakcie badań uczestnicy po spędzeniu odpowiednio długiego czasu w analizowanym pomieszczeniu odpowiadali na pytania ankietowe (tabela 2). Oceny komfortu w salonie mieszkańcy udzielali głównie w ciągu dnia, natomiast w sypialni – wieczorem, w nocy lub rano.

Do obliczeń izolacyjności odzieży przyjęto wartości: bardzo lekka – 0,4 clo, lekka – 0,6 clo, umiarkowana – 1,0 clo, ciepła – 1,5 clo, bardzo ciepła – 2,0 clo (gdzie 1,0 clo = 0,155 [(m²·°C)/W]). Odpowiedzi respondentów na pytania ankietowe rejestrowano wraz z dokładnym czasem ich udzielenia. Udostępnienie ankiet w internecie umożliwiło automatyczne przypisywanie daty i godziny do każdej odpowiedzi. Uzyskano łącznie 3 540 odpowiedzi, z czego 2 488 odnosiło

Table 2. Key survey questions completed by study participants

Tabela 2. Najważniejsze pytania ankiety wypełnianej przez uczestników badań

Question/Pytanie	Possible answers/ Możliwe odpowiedzi
Room/Pokój	- living room/salon; - bedroom/ sypialnia
What are you currently wearing?/ Jak jesteś obecnie ubrany/-a?	- very light/bardzo lekko; - light/ lekko; - moderate/umiarkowanie; - heavy/ciepło; - very heavy/ bardzo ciepło
Your activity in this room over the last 15 minutes has been:/ Twoja aktywność w tym pomieszczeniu w ciągu ostatnich 15 min to:	- very relaxed/ bardzo spokojna; - relaxed/ spokojna; - moderate/umiarkowana; - active/aktywna; - very active/bardzo aktywna
What do you think about the current room temperature (TSV)?/ Co sądzisz o obecnej temperaturze w pomieszczeniu (TSV)?	- cold/zimno; - cool/chłodno; - slightly cool/lekko chłodno; - neutral/neutralnie; - slightly warm/lekko ciepło; - warm/ciepło; - hot/gorąco
Would you prefer it to be:/ Czy wolał(a)byś, aby było:	- warmer/ciepłej; - no change/bez zmian; - cooler/chłodniej

(PPD) was determined based on the PMV-PPD relationship proposed by Fanger [32] and the normative values (Table 3). Assuming equivalence of TSV and PMV values, it was possible to determine operative temperature ranges for each comfort category.

The thermal comfort categories are associated with varying degrees of expectations: The Indoor Environmental Quality (IEQ) is categorised as follows: IEQ I is designated as high standard and is intended for the elderly, children and the infirm. IEQ II is designated as medium standard and is intended for new and renovated buildings. IEQ III is designated as moderate standard and is intended for existing buildings. Finally, IEQ IV is designated as low standard and is intended for seasonally acceptable buildings. The analysis employed field assessments of thermal sensations as the dependent variable and indoor temperatures as the independent variable. According to Fanger's PMV-PPD equation [32], TSV values within ± 0.5 correspond to a thermal satisfaction level of $\geq 90\%$. The term, 'neutral temperature' is defined as the operative temperature (T_o) at which TSV = 0.

MTSV, or the mean thermal sensation vote, is defined as the average TSV value within a given temperature range. This allows for a more precise analysis of the relationship between TSV and T_o . The data were grouped into 0.5°C intervals, with the mean temperature of the soil in each interval (MTSV) defined as the average MTSV within each interval.

Operative Temperature. In order to identify user preferences for indoor conditions, the operative temperature (T_o [$^\circ\text{C}$]) was calculated for each response. This parameter incorporates the dry bulb temperature, the mean radiant temperature (MRT),

Table 3. Requirements for indoor environmental quality (IEQ) thermal comfort categories in accordance with EN 16798-1:2019 [23]

Tabela 3. Wymagania dotyczące kategorii komfortu cieplnego (IEQ) zgodnie z normą EN 16798-1:2019 [31]

Thermal comfort category (IEQ)/ Kategoria komfortu cieplnego (IEQ)	The thermal sensation of a human/ Odczucie ciepłe człowieka	
	PPD [%]	PMV [–]
I	< 6	$-0.2 < PMV < +0.2$
II	< 10	$-0.5 < PMV < +0.5$
III	< 15	$-0.7 < PMV < +0.7$
IV	< 25	$-1.0 < PMV < +1.0$

and the airflow velocity, thus providing a more comprehensive indicator of the thermal conditions experienced by humans than air temperature alone [8, 9]. The operative temperature can be estimated by the following formula:

$$T_o = \frac{T_a + T_r}{2} \quad (1)$$

where:

T_a – dry-bulb temperature [$^\circ\text{C}$].

T_r – Mean Radiant Temperature (MRT) [$^\circ\text{C}$].

The initial equation (1) is predicated on the assumption of minimal air velocity, defined as a value less than 0.2 metres per second. This condition was met throughout the entire study period.

się do salonu, a 1 052 do sypialni. W badaniu uczestniczyło 38 osób. Średnia liczba mieszkańców w gospodarstwie domowym przekraczała dwie osoby (nie wszyscy stali mieszkańcy wyrazili chęć brania udziału w badaniach). Kobiety stanowiły 67% grupy badawczej, a większość respondentów miała ponad 50 lat. Średni wiek ankietowanych wynosił 56 lat.

Ograniczenia badania wynikały głównie z niespójnych warunków środowiskowych, związanych z lokalizacją czujnika pomiarowego w jednym, stałym punkcie pomieszczenia. Brak przestrzennego pokrycia uniemożliwiał uchwycenie dynamicznych zmian, m.in. dotyczących prędkości przepływu powietrza, co mogło prowadzić do niedokładności pomiarowych. W celu zwiększenia precyzji zaleca się zastosowanie urządzenia mapującego, umożliwiającego przestrzenną rejestrację parametrów środowiskowych. Mapowanie rozkładu prędkości powietrza pozwala identyfikować lokalne różnice, co zwiększa wiarygodność danych i umożliwia lepszą charakterystykę rzeczywistych warunków panujących w analizowanych przestrzeniach.

Wskaźnik TSV (Thermal Sensation Vote) określano, wykorzystując siedmiostopniową skalę odczuć cieplnych (–3 – zimno, –2 – chłodno, –1 – lekko chłodno, 0 – neutralnie, +1 – lekko ciepło, +2 – ciepło, +3 – gorąco), na podstawie ankiet wypełnianych przez uczestników. Dane te posłużyły do wyznaczenia akceptowalnej temperatury operatywnej z wykorzystaniem regresji liniowej. Klasy komfortu cieplnego określono zgodnie z normą EN 16798-1:2019 [31].

Na podstawie relacji PMV-PPD zaproponowanej przez Fangera [32] oraz wartości normatywnych (tabela 3), określono zależność między kategorią środowiska wewnętrznego, wskaźnikiem PMV oraz przewidywanym odsetkiem osób niezadowolonych (PPD). Zakładając równoważność wartości TSV i PMV, możliwe było określenie operatywnych zakresów temperatury w przypadku poszczególnych kategorii komfortu.

Kategorie komfortu cieplnego odpowiadają różnym poziomom oczekiwań: IEQ I – wysoki standard (przeznaczony dla osób starszych, dzieci oraz chorych); IEQ II – średni standard (nowe i zmodernizowane budynki); IEQ III – umiarkowany standard (budynki istniejące); IEQ IV – niski standard (akceptowalny sezonowo). W analizie wykorzystano terenowe oceny odczuć cieplnych jako zmienną zależną, a temperatury wewnętrzne jako zmienną niezależną. Zgodnie z równaniem PMV-PPD według Fangera [32], wartości TSV mieszczące się w zakresie ± 0.5 odpowiadają poziomowi zadowolenia cieplnego $\geq 90\%$. Temperatura neutralna została określona jako temperatura operatywna (T_o), przy której TSV = 0.

MTSV (Mean Thermal Sensation Vote), czyli średnia wartość TSV w danym przedziale temperatury, umożliwia precyzyjniejszą analizę relacji TSV a T_o . Dane pogrupowano w przedziały co 0.5°C , przy czym wartość MTSV ustalono jako średnią TSV w przypadku każdego przedziału.

Temperatura operatywna. W celu identyfikacji preferencji użytkowników względem warunków wewnętrznych, w przypadku każdej odpowiedzi obliczono temperaturę operatywną (T_o [$^\circ\text{C}$]). Parametr ten uwzględnia temperaturę suchego termometru, średnią temperaturę promieniowania (MRT) oraz prędkość przepływu powietrza, stanowiąc bardziej adekwatny wskaźnik warunków cieplnych odczuwanych przez człowieka

PMV index. In order to verify the relationship between TSV and T_0 , theoretical PMV index values were calculated. The analysis employed measured environmental parameters (i.e. air temperature, radiation temperature, airflow velocity, and humidity) and data from surveys, including participants' clothing and physical activity. PMV calculations were performed in accordance with the PN-EN ISO 7730:2005 standard [8].

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \\ & \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - \\ & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - \\ & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - \\ & - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{dla } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{dla } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{dla } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{dla } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \end{cases} \quad (5)$$

where:

M – is metabolic rate (W/m^2),
 W – is the effective mechanical power (W/m^2),
 I_{cl} – is the clothing insulation ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$),
 f_{cl} – is the clothing surface area factor (-),
 t_a – is the air temperature ($^{\circ}\text{C}$),
 $\bar{t}_r$ – is the mean radiant temperature ($^{\circ}\text{C}$),
 v_{ar} – is the relative air velocity (m/s),
 p_a – is the partial water vapor pressure (Pa),
 h_c – is the convective heat transfer coefficient ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),
 t_{cl} – is the clothing surface temperature ($^{\circ}\text{C}$).

Results analysis

The air temperature in the living rooms ranged from 9.0 to 42.5 $^{\circ}\text{C}$ (average 21.0 $^{\circ}\text{C}$), while in the bedrooms it ranged from 10.2 to 37.3 $^{\circ}\text{C}$ (average 20.6 $^{\circ}\text{C}$) – Figure 2. The relative humidity (RH) in the living rooms (Figure 3) ranged from 12% to 89% (average 50%), while in the bedrooms the RH ranged from 14 to 93% (average 52%). The maximum temperatures recorded in the living rooms were higher than those recorded in the bedrooms during the day; however, at night, the temperature and relative humidity levels were similar in both rooms.

The observed variations in temperature and relative humidity (RH) are attributable to the orientation and configuration of the buildings' windows. The configuration of living rooms is such that they are dominated by north-facing windows, which generate a significant amount of solar heat gain (especially during summer). Conversely, bedrooms, which are predominantly

niż sama temperatura powietrza [8, 9]. Temperaturę operatywną można aproksymować wzorem:

$$T_o = \frac{T_a + T_r}{2} \quad (1)$$

gdzie:

T_a – temperatura suchego termometru [$^{\circ}\text{C}$];
 T_r – średnia temperatura promieniowania (MRT) [$^{\circ}\text{C}$].

Wzór (1) zakłada małą prędkość powietrza ($< 0,2 \text{ m/s}$). W czasie całego okresu objętego badaniem w pomieszczeniach warunek ten został spełniony.

Wskaźnik PMV. W celu weryfikacji zależności między TSV a T_o obliczono teoretyczne wartości wskaźnika PMV. W analizie wykorzystano zmierzone parametry środowiskowe (temperatura powietrza, promieniowanie, prędkość przepływu powietrza oraz wilgotność) oraz dane z ankiet, obejmujące m.in. ubiór i aktywność fizyczną uczestników. Obliczenia PMV przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 7730:2005 [8]:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \\ & \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - \\ & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - \\ & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - \\ & - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{dla } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{dla } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{dla } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{dla } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

M – tempo metabolizmu [W/m^2],
 W – efektywna moc mechaniczna [W/m^2],
 I_{cl} – izolacyjność cieplna odzieży [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$],
 f_{cl} – współczynnik powierzchni odzieży,
 t_a – temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$],
 $\bar{t}_r$ – średnia temperatura promieniowania [$^{\circ}\text{C}$],
 v_{ar} – prędkość powietrza [m/s],
 p_a – ciśnienie cząstkowe pary wodnej [Pa],
 h_c – współczynnik konwekcji ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$],
 t_{cl} – temperatura powierzchni ubrania [$^{\circ}\text{C}$].

Analiza wyników

Temperatura powietrza w salonach wynosiła 9,0 – 42,5 $^{\circ}\text{C}$ (średnia 21,0 $^{\circ}\text{C}$), natomiast w sypialniach 10,2 ÷ 37,3 $^{\circ}\text{C}$ (średnia 20,6 $^{\circ}\text{C}$) – rysunek 2. Wilgotność względna (RH) w salonach (rysunek 3) wynosiła od 12% do 89% (średnio 50%), natomiast

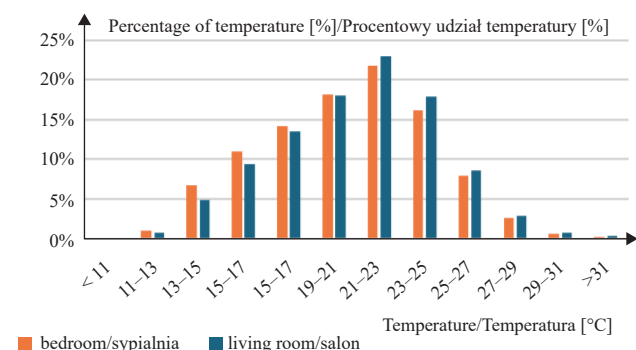


Fig. 2. Percentage distribution of indoor air temperature

Rys. 2. Procentowy udział temperatury powietrza w pomieszczeniach

situated on the west side of the property, have windows that face either east or west, thereby restricting solar energy access.

The initial phase of the analysis entailed ascertaining the preferred operative temperature of the study participants, with a particular focus on living rooms and bedrooms. In order to achieve this objective, the TSV index was then compared with its corresponding values. Thermal comfort is subjective and can be evaluated on a scale from -3 (cold) to $+3$ (hot), with 0 indicating neutral. The analysis (Figure 4) demonstrated that an increase in TSV was associated with an increase in TSV, with the substantial scatter indicating individual thermal sensations. The relationship between these variables is described using a linear regression model:

$$TSV = 0,144 \cdot T_o - 3,525 \quad (6)$$

The coefficient of determination R^2 (Figure 4) is a measure of the model's goodness of fit to the data. The low value of the resultant p-value indicates a weak correlation and confirms the individual nature of thermal sensations. The neutral temperature ($TSV = 0$) was determined based on the linear regression equation, and for the analysed area of South Australia, this was found to be 24.4°C . The mean value was then calculated for each T_o interval. The relationship between these parameters is presented in Figure 5. The temperature range of the study was $10\text{--}35^\circ\text{C}$, and MTSV values ranged from -2.5 to $+3.0$. At temperatures lower than 17°C , the prevalence of coolness or coldness ratings was notable, while at temperatures ranging from 30 to 35°C , warmth and hotness ratings were predominant. The relationship between these variables was modelled using a linear regression equation:

$$MTSV = 0.173 \cdot T_o - 4.134 \quad (7)$$

The relationship between T_o and MTSV displays a clear linear upward trend, indicating that an increase in T_o results in an increase in MTSV. The data demonstrated a strong correlation with the regression model, as indicated by an R^2 value of 0.905 , suggesting a high degree of fit and a moderate residual variability.

The model was used to determine the neutral temperature (for $MTSV = 0$) and the boundaries corresponding to individual thermal comfort categories (assuming equivalence of MTSV and PMV). The results of the study are summarised in Table 4.

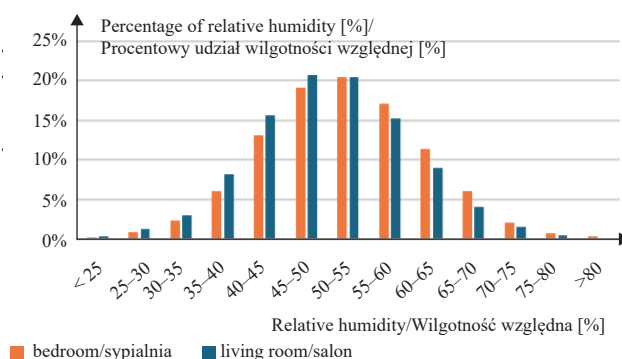


Fig. 3. Percentage distribution of indoor relative humidity

Rys. 3. Procentowy udział wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach

w sypialniach RH mieściła się w przedziale od 14 do 93% (średnio 52%). Maksymalne wartości temperatury w salonach były wyższe niż w sypialniach w ciągu dnia, natomiast w nocy poziom temperatury i wilgotności względnej były zbliżone.

Zaobserwowane różnice w wartościach temperatury oraz RH wynikają z orientacji budynków względem stron świata oraz rozmieszczenia okien. W salonach dominują przeszklenia skierowane na północ, co generuje znaczne zyski ciepła od promieniowania słonecznego (w szczególności w okresie lata). Natomiast sypialnie, usytuowane głównie po stronie zachodniej, mają okna wychodzące na wschód lub zachód, co ogranicza dostęp energii słonecznej.

Pierwszym etapem analizy było określenie preferowanej temperatury operatywnej przez uczestników badania, ze szczególnym uwzględnieniem salonów i sypialni. W tym celu zestawiono wskaźnik TSV z odpowiadającymi mu wartościami. TSV wyraża subiektywną ocenę komfortu cieplnego w skali od -3 (zimno) do $+3$ (gorąco), gdzie 0 oznacza stan neutralny. Analiza (rysunek 4) wykazała, że wzrost wiąże się ze wzrostem TSV, przy czym duży rozrzut wskazuje na indywidualny charakter odczuć cieplnych. Zależność tę opisano modelem regresji liniowej:

$$TSV = 0,144 \cdot T_o - 3,525 \quad (6)$$

Współczynnik determinacji R^2 (rysunek 4) określa stopień dopasowania modelu do danych. Jego mała wartość wskazuje na słabą korelację i potwierdza indywidualny charakter od-

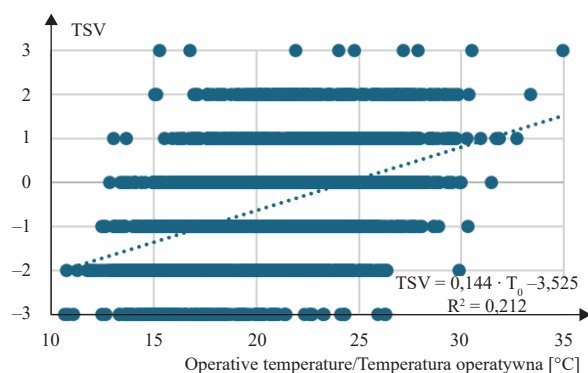


Fig. 4. The relationship between TSV and operative temperature

Rys. 4. Zależność pomiędzy TSV a temperaturą operatywną

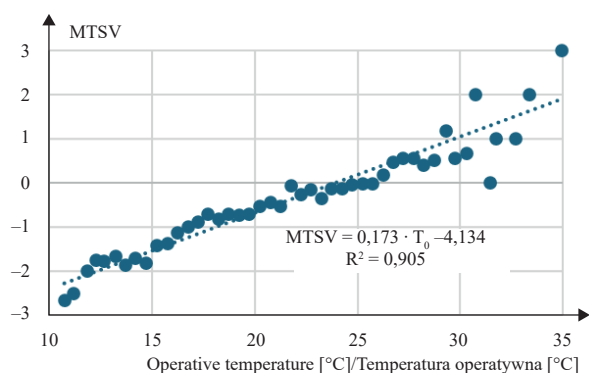


Fig. 5. The relationship between MTSV and operative temperature
Rys. 5. Zależność pomiędzy MTSV a temperaturą operatywną

Table 4. Ranges of operative temperatures corresponding to thermal comfort categories

Tabela 4. Zakres temperatury operatywnej odpowiadającej kategoriom komfortu cieplnego

MTSV	Operative temperature (T_o), [°C]/ Temperatura operatywna (T_o), [°C]
$MTSV = 0$	23.9
$-0.2 < MTSV < +0.2$	$22.8 \div 25.1$
$-0.5 < MTSV < +0.5$	$21.1 \div 26.8$
$-0.7 < MTSV < +0.7$	$19.9 \div 28.0$
$-1.0 < MTSV < +1.0$	$18.2 \div 29.7$

The range that has been determined to be acceptable to 90% of users falls within the range of 21.1–26.8°C, thus meeting the requirements of IEQ category II (medium-demand rooms). This stipulates that should be $\geq 20.0^\circ\text{C}$ during the heating season and $\leq 26.0^\circ\text{C}$ during the cooling season.

A comparison of the MTSV and PMV indices. The calculation of PMV values was based on measured internal parameters and survey data on physical activity and clothing thermal insulation. The resulting linear regression equation, as illustrated in Figure 6, was derived as follows:

$$PMV = 0,209 \cdot T_o - 5,159 \quad (8)$$

For low values, significant differences in PMV were observed, indicating a significant influence of clothing and activity on the perception of thermal comfort. The adaptation of these factors facilitates enhanced acclimatisation to indoor environments.

In order to illustrate the overall trend, mean MPMV values were calculated for T_o intervals. The result of this analysis was a linear relationship, which was as follows:

$$MPMV = 0,282 \cdot T_o - 6,842 \quad (9)$$

As demonstrated in Figure 7, there is a strong positive correlation between and MPMV, with an adequate model fit ($R^2 \approx 0.909$), thereby confirming the linear nature of the relationship. Figure 8 provides a comparison of MPMV and MTSV as a function of. It is evident that there are substantial discrepancies between these metrics for equivalent T_o values,

czuć cieplnych. Na podstawie równania regresji liniowej wyznaczono temperaturę neutralną ($TSV = 0$), która w przypadku analizowanego obszaru Australii Południowej wyniosła $24,4^\circ\text{C}$. W celu uśrednienia wyników obliczono MTSV w przypadku poszczególnych przedziałów T_o . Relację pomiędzy tymi parametrami przedstawiono na rysunku 5. Zakres temperatury wynosił $10 - 35^\circ\text{C}$, a wartości MTSV wahały się od $-2,5$ do $+3,0$. W przypadku niższej temperatury ($10 - 17^\circ\text{C}$) dominowały oceny chłodu lub zimna, natomiast przy $30 - 35^\circ\text{C}$ – uczucia ciepła i gorąca. Zależność ta została opisana za pomocą równania regresji liniowej:

$$MTSV = 0.173 \cdot T_o - 4.134 \quad (7)$$

Zależność między T_o a MTSV wykazuje wyraźną liniową tendencję wzrostową – wzrost T_o powoduje wzrost MTSV. Dane dobrze dopasowują się do modelu regresji, a współczynnik $R^2 = 0,905$ wskazuje na silną korelację przy umiarkowanej zmienności resztowej.

Na podstawie modelu wyznaczono temperaturę neutralną (dla $MTSV = 0$) oraz granice odpowiadające poszczególnym kategoriom komfortu cieplnego (przy założeniu równoważności MTSV i PMV). Wyniki zestawiono w tabeli 4. Zakres T_o akceptowanych przez 90% użytkowników mieści się w przedziale $21,1 \div 26,8^\circ\text{C}$ i odpowiada wymaganiom kategorii IEQ II (pomieszczenia o średnich wymaganiach), zgodnie z którymi w sezonie grzewczym T_o powinna wynosić $\geq 20,0^\circ\text{C}$, a w sezonie chłodzenia $\leq 26,0^\circ\text{C}$.

Porównanie wskaźników MTSV i PMV. Na podstawie zmierzonych parametrów wewnętrznych oraz danych ankietowych dotyczących aktywności fizycznej i izolacyjności cieplnej odzieży obliczono wartości wskaźnika PMV względem T_o (rysunek 6), uzyskując równanie regresji liniowej:

$$PMV = 0,209 \cdot T_o - 5,159 \quad (8)$$

W przypadku małej wartości T_o zaobserwowano znaczne rozbieżności PMV, co wskazuje na istotny wpływ odzieży i aktywności na percepcję komfortu cieplnego. Adaptacja tych czynników umożliwia lepsze dostosowanie do warunków wewnętrznych.

W celu zobrazowania ogólnej tendencji obliczono średnie wartości MPMV dla przedziałów T_o . Uzyskano zależność liniową:

$$MPMV = 0,282 \cdot T_o - 6,842 \quad (9)$$

Zgodnie z rysunkiem 7, istnieje silna dodatnia korelacja między T_o a MPMV, z dużym dopasowaniem modelu ($R^2 \approx 0,909$), co potwierdza liniowy charakter zależności. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wartości MPMV i MTSV w funkcji T_o . Widoczne są istotne różnice między tymi wskaźnikami w przypadku tych samych wartości T_o – szczególnie powyżej 25°C , gdzie wartości MPMV przeważnie przekraczają MTSV. Oznacza to, że teoretyczne wartości komfortu cieplnego (MPMV) nie zawsze pokrywają się z subiektywnymi ocenami uczestników (MTSV). Analiza krzywych regresji wykazuje większe nachylenie w przypadku MPMV

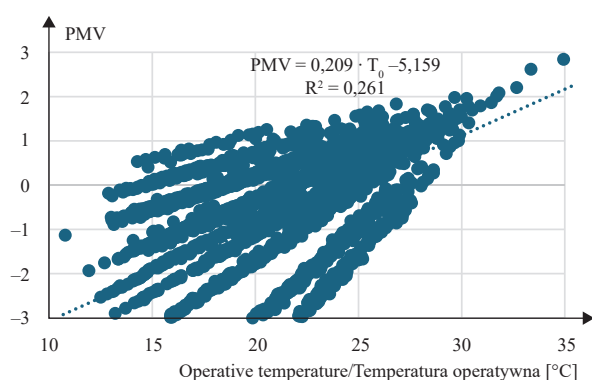


Fig. 6. The relationship between calculated PMV and operative temperature

Rys. 6. Zależność pomiędzy obliczoną wartością PMV a temperaturą operacyjną

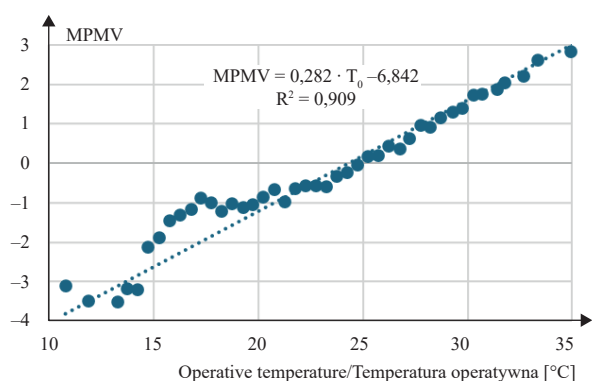


Fig. 7. The relationship between theoretical MPMV and operative temperature

Rys. 7. Zależność pomiędzy teoretyczną wartością MPMV a temperaturą operacyjną

particularly at temperatures above 25°C, where MPMV values frequently exceed MTSV. This finding suggests that theoretical thermal comfort values (MPMV) do not always align with participants' subjective assessments (MTSV). A regression analysis of the data reveals a steeper slope for MPMV (0.282) than for MTSV (0.173), with a similar fit to the data. However, the neutral temperature remains comparable, with a reading of 24.3°C for MPMV and 23.9°C for MTSV. It is evident from the data presented in Table 5 that a higher slope of the MPMV curve results in a narrower range of operative temperature assigned to individual thermal comfort categories (Table 5 compared to Table 4).

The impact of room type on thermal comfort. An analysis was conducted to determine the effect that room type has on the temperature range that is considered comfortable. A clear linear relationship was observed between and the MTSV value (see Figures 9 and 10), as confirmed by the high R^2 values. This suggests that has a significant influence on occupants' thermal sensations.

Based on the identified correlations, the T_0 ranges corresponding to the various thermal comfort categories were determined (see Table 6). The results suggest that residents prefer lower temperatures in the living room than in the bedroom. This may be due to greater physical activity in the living room

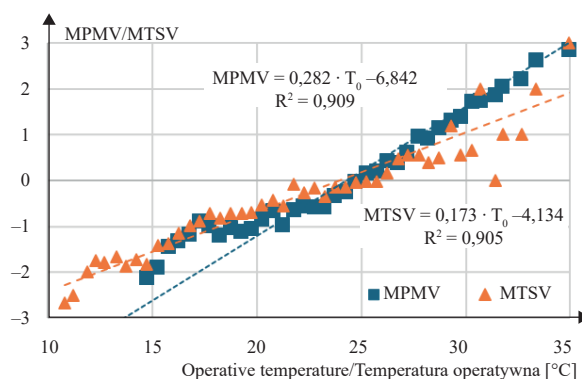


Fig. 8. Comparison of MTSV values with theoretical MPMV values

Rys. 8. Porównanie wartości MTSV z wartościami teoretycznymi MPMV

(0,282) niż MTSV (0,173), przy podobnym dopasowaniu do danych. Mimo to, temperatura neutralna jest zbliżona: 24,3°C dla MPMV oraz 23,9°C dla MTSV. Większe nachylenie krzywej MPMV skutkuje węższym zakresem temperatury operacyjnej przypisanej poszczególnym kategoriom komfortu cieplnego (tabela 5 w porównaniu z tabelą 4).

Wpływ rodzaju pomieszczenia na komfort cieplny. Przeprowadzono analizę wpływu typu pomieszczenia na zakres temperatury uznawanej za komfortową. Zaobserwowano wyraźną liniową zależność pomiędzy T_0 a wartością MTSV (rysunki 9 i 10), potwierdzoną dużymi wartościami współczynnika R^2 . Wskazuje to, że T_0 istotnie wpływa na odczucia cieplne użytkowników.

Na podstawie wyznaczonych zależności określono zakresy T_0 odpowiadające różnym kategoriom komfortu cieplnego (tabela 6). Wyniki sugerują, że mieszkańcy preferują niższą temperaturę w salonie niż w sypialni. Może to wynikać z większej aktywności fizycznej w salonie, skutkującej większą produkcją ciepła, przez co niższa temperatura jest odbierana jako bardziej komfortowa.

Wcześniejsze badania sugerują optymalny zakres temperatur do snu 15–19°C [33], ale w analizowanym przypadku wartości te są większe. Może to wynikać z indywidualnych preferencji użytkowników, uwarunkowań nawykowych oraz ograniczeń ekonomicznych.

Table 5. Operative temperature ranges for individual thermal comfort categories based on MPMV

Tabela 5. Zakresy temperatury operacyjnej w przypadku poszczególnych kategorii komfortu cieplnego MPMV

MPMV	Operative Temperature (T_0), [°C]/ Temperatura operacyjna (T_0), [°C]
$MPMV = 0$	24.3
$-0,2 < MPMV < +0,2$	23.6 ÷ 25.0
$-0,5 < MPMV < +0,5$	22.5 ÷ 26.0
$-0,7 < MPMV < +0,7$	21.8 ÷ 26.7
$-1,0 < MPMV < +1,0$	20.7 ÷ 27.8

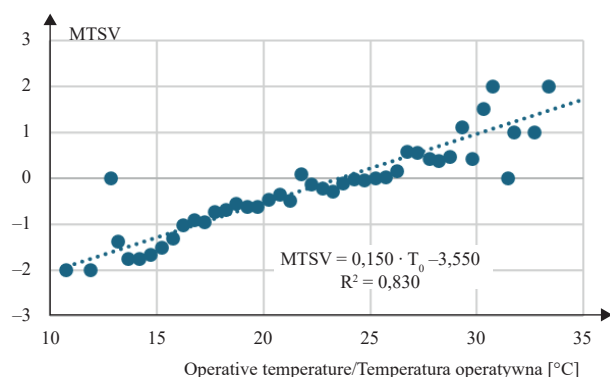


Fig. 9. The relationship between MTSV and operative temperature in the living room

Rys. 9. Zależność między MTSV a temperaturą operatywną w salonie

resulting in greater heat production and making lower temperatures more comfortable.

While previous studies suggest an optimal sleep temperature range of 15–19°C [33], the values obtained in this study are higher. This may be due to individual user preferences, habitual factors and economic constraints.

Discussion and Conclusions

The results suggest that the neutral operative temperature in residential buildings in the Iron Triangle is around 23.9°C, with slight variations between living rooms (23.7°C) and bedrooms (24.4°C). This wide range of acceptable temperatures suggests that occupants can tolerate greater thermal fluctuations than the PMV model predicts. Consequently, there is potential to reduce energy consumption for cooling and heating. These results are consistent with the observations of de Dear, Kim and Parkinson [10], who demonstrated that Sydney residents' actual neutral temperature was lower than predicted by the ASHRAE adaptive model and that their comfort range was wider. Similarly, Williamson and Daniel [11] indicated that, in Darwin, changing comfort criteria confirm the dynamic nature of thermal perception. Studies by Indraganti in India [13] and Becker et al. in Israel [17] also demonstrate that the PMV model underestimates occupant tolerance of high temperatures. The research results presented in this article confirm this trend: the differences between MTSV and MPMV are particularly evident at higher temperatures, where MPMV systematically overestimates discomfort.

It is also important to consider the functional differences between rooms. Occupants' thermal preferences in bedrooms suggest an acceptance of higher temperatures, possibly due to lower metabolic activity levels. However, these results differ from those of some previous studies, such as those by Harding et al. [33], who suggested a lower optimal sleep temperature. This highlights the influence of cultural and adaptive factors on thermal preferences.

From a practical perspective, the research results have significant implications for the Australian Building Energy Rating System (NatHERS). Current assumptions treat thermal comfort uniformly across the country. However, as the results presented demonstrate, this does not reflect the specific characteristics of

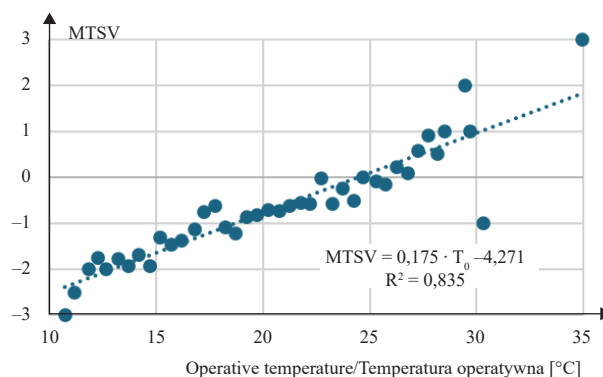


Fig. 10. The relationship between MTSV and operative temperature in the bedroom

Rys. 10. Zależność między MTSV a temperaturą operatywną w sypialni

Table 6. Operative temperature ranges for individual thermal comfort categories based on MTSV, disaggregated by room type
Tabela 6. Zakres temperatury operatywnej w przypadku poszczególnych kategorii komfortu cieplnego MTSV z podziałem na rodzaj pomieszczenia

MTSV	Operative Temperature (To) – living room [°C]/ Temperatura operatywna (T ₀) – salon, [°C]	Operative Temperature (To) – bedroom [°C]/ Temperatura operatywna (T ₀) – sypialnia, [°C]
MTSV = 0	23,7	24,4
-0,2 < MTSV < +0,2	22,3 ÷ 25,0	23,3 ÷ 25,5
-0,5 < MTSV < +0,5	20,3 ÷ 27,0	21,5 ÷ 27,3
-0,7 < MTSV < +0,7	19,0 ÷ 28,3	20,4 ÷ 28,4
-1,0 < MTSV < +1,0	17,0 ÷ 30,3	18,7 ÷ 30,1

Dyskusja i wnioski

Uzyskane wyniki wskazują, że neutralna temperatura operatywna w budynkach mieszkalnych Żelaznego Trójkąta wynosi ok. 23,9°C, z niewielkimi różnicami pomiędzy salonami (23,7°C) a sypialniami (24,4°C). Szeroki zakres akceptowanej temperatury sugeruje, że mieszkańcy są w stanie tolerować większe wahania warunków cieplnych, niż przewiduje model PMV. W konsekwencji oznacza to możliwości ograniczenia zużycia energii na chłodzenie i ogrzewanie. Wyniki te są zgodne z obserwacjami de Deara, Kima i Parkinsona [10], którzy wykazali, że rzeczywista neutralna temperatura mieszkańców Sydney była niższa od prognoz modelu adaptacyjnego ASHRAE, a zakres komfortu szerszy. Podobnie Williamson i Daniel [11] wskazali, że w Darwin zmieniające się w czasie kryteria komfortu potwierdzają dynamiczny charakter percepcji cieplnej. Także badania Indragantiego [13] w Indiach czy Becker i in. [17] w Izraelu dowodzą, że model PMV nie dostrzega tolerancji użytkowników na wysoką temperaturę. Zaprezentowane w artykule wyniki badań potwierdzają tę tendencję – różnice między MTSV a MPMV są szczególnie widoczne w przypadku wyższej temperatury, gdzie MPMV systematycznie zawyża dyskomfort. Istotne jest również potwierdzenie różnic funkcjonalnych pomiędzy pomieszczeniami: preferencje cieplne mieszkańców w sypialniach wskazują na

South Australia's hot and dry climate. Adapting thermal comfort criteria locally could enable more precise building design while reducing energy demand.

Key findings:

- The range of thermal comfort in the studied buildings (21.1–26.8°C) is wider than predicted by the PMV model, confirming the need for adaptive approaches.

- The neutral operative temperature averaged 23.9°C, which is similar to values obtained in studies from other regions of Australia [10, 20].

- Functional differences between rooms indicate that thermal preferences depend on metabolic activity and space use.

- Practical implications of the results include modifying the NatHERS system to incorporate local thermal preferences and increase energy efficiency.

In summary, this study confirms the importance of considering local and cultural conditions when conducting thermal comfort analyses. While universal models such as PMV are useful, they should be verified and adapted to specific climates and user groups.

akceptację wyższej temperatury, co może być związane z niższym poziomem aktywności metabolicznej. Wyniki te różnią się jednak od części wcześniejszych badań, np. Harding i in. [33], którzy sugerowali niższą optymalną temperaturę snu. Wskazuje to na rolę czynników kulturowych i adaptacyjnych w kształtowaniu preferencji cieplnych.

Z perspektywy praktycznej, rezultaty badań mają istotne znaczenie dla australijskiego systemu oceny energetycznej budynków (NatHERS). Obecnie obowiązujące założenia traktują komfort cieplny w sposób jednolity dla całego kraju, co, jak pokazują prezentowane wyniki, nie oddaje specyfiki gorącego i suchego klimatu Australii Południowej. Lokalna adaptacja kryteriów komfortu cieplnego mogłaby wspierać bardziej precyzyjne projektowanie budynków, pozwalając jednocześnie na ograniczenie zapotrzebowania energetycznego.

Najważniejsze wnioski:

- zakres komfortu cieplnego w badanych budynkach (21,1–26,8°C) jest szerszy, niż wynika to z modelu PMV, co potwierdza potrzebę stosowania podejść adaptacyjnych;

- neutralna temperatura operatywna wyniosła średnio 23,9°C i jest zbliżona do wartości uzyskiwanych w badaniach w innych regionach Australii [10, 20];

- różnice funkcjonalne pomieszczeń wskazują, że preferencje cieplne zależą od aktywności metabolicznej i przeznaczenia przestrzeni;

- praktyczne implikacje wyników obejmują możliwość modyfikacji systemu NatHERS w kierunku uwzględnienia lokalnych preferencji cieplnych i zwiększenia efektywności energetycznej.

Podsumowując, badania potwierdzają konieczność uwzględniania lokalnych i kulturowych uwarunkowań w analizach komfortu cieplnego. Uniwersalne modele, takie jak PMV, choć użyteczne, powinny być weryfikowane i dostosowywane do specyfiki danego klimatu i grup użytkowników.

The publication was financed by a subsidy from the dean of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology

Publikacja została sfinansowana z subwencji dziekana Wydziału Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej

Received: 11.08.2025

Revised: 23.09.2025

Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 11.08.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 23.09.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

[1] Miszczuk A, Żmijewski KH. „Analiza budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię”, *Materiały Budowlane*, t. 1, nr 1, s. 24–27, sty. 2015, DOI: 10.15199/33.2015.01.06.

[2] Babiarz B i in., „Energy Efficiency in Buildings: Toward Climate Neutrality”, 1 wrzesień 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. DOI: 10.3390/en17184680.

[3] Firląg S, Kaliszuk-Wietecha AE, Sławińska M. „Potencjał dekarbonizacji zabytkowej kamienicy w Warszawie”, *Materiały Budowlane*, t. 1, nr 2, s. 53–57, luty 2024, DOI: 10.15199/33.2024.02.10.

[4] Miszczuk A, Heim D. „Parametric study of air infiltration in residential buildings—the effect of local conditions on energy demand”, *Energies (Basel)*, t. 14, nr 1, sty. 2021, DOI: 10.3390/en14010127.

[5] Adekunle TO, Nikolopoulou M. „Thermal comfort, summertime temperatures and overheating in prefabricated timber housing”, *Build Environ*, t. 103, s. 21–35, lip. 2016, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2016.04.001.

[6] Teli D, Patrick J AB, Jentsch MF. „Thermal comfort in naturally ventilated primary school classrooms”, *Building Research & Information*, t. 41, nr 3, s. 301–316, cze. 2013, DOI: 10.1080/09613218.2013.773493.

[7] Frontczak M, Wargocki P. „Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments”, *Build Environ*, t. 46, nr 4, s. 922–937, kwi. 2011, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2010.10.021.

[8] „ISO 7730:2005 – Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria”.

- [9] Fanger PO. „Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.”, 1970.
- [10] De Dear R, Kim J, Candido C, Deuble M. „Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms”, *Building Research & Information*, t. 43, nr 3, s. 383–398, maj 2015, DOI: 10.1080/09613218.2015.991627.
- [11] Brotas L, Roaf S, Nicol F, Prof R, Humphreys M. *WINDSOR Rethinking Comfort Proceedings*. 2018. [Online]. Dostępne na: www.windsorconference.com
- [12] „Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”. Dostęp: 14 maj 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.ashrae.org/>
- [13] Indraganti M. „Thermal comfort in naturally ventilated apartments in summer: Findings from a field study in Hyderabad, India”, *Appl Energy*, t. 87, nr 3, s. 866–883, mar. 2010, DOI: 10.1016/J.APENERGY.2009.08.042.
- [14] Humphreys MA, Nicol JF. „Understanding the adaptive approach to thermal comfort”, *ASHRAE Trans*, t. 104, s. 991, 1998.
- [15] De Dear R, Brager GS. „Developing an adaptive model of thermal comfort and preference”, 1998.
- [16] Humphreys M. „Field studies of thermal comfort compared and applied”, *Building services engineer*, t. 44, s. 5–27, 1976.
- [17] Becker R, Paciuk M. „Thermal comfort in residential buildings – Failure to predict by Standard model”, *Build Environ*, t. 44, nr 5, s. 948–960, maj 2009, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2008.06.011.
- [18] Al-ajmi FF, Loveday DL. „Indoor thermal conditions and thermal comfort in air-conditioned domestic buildings in the dry-desert climate of Kuwait”, *Build Environ*, t. 45, nr 3, s. 704–710, mar. 2010, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2009.08.018.
- [19] Ioannou A, Itard L. „In-situ and real time measurements of thermal comfort and its determinants in thirty residential dwellings in the Netherlands”, *Energy Build*, t. 139, s. 487–505, mar. 2017, DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2017.01.050.
- [20] Jeong B, Kim J, Chen D, de Dear R. „Comparison of residential thermal comfort in two different climates in Australia”, *Build Environ*, t. 211, s. 108706, mar. 2022, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108706.
- [21] de Dear R, Kim J, Parkinson T. „Residential adaptive comfort in a humid subtropical climate–Sydney Australia”, *Energy Build*, t. 158, lis. 2017, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.028.
- [22] Vaughan J, Alghamdi S, Tang W. „Thermal Comfort in Classrooms in NSW Australia: Learning from International Practice: A Systematised Review”, *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 5879, t. 17, nr 13, s. 5879, cze. 2025, DOI: 10.3390/SU17135879.
- [23] Shooshtarian S, Lam CKC, Kenawy I. „Outdoor thermal comfort assessment: A review on thermal comfort research in Australia”, *Build Environ*, t. 177, nr 0, s. 106917–106917, cze. 2020, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2020.106917.
- [24] Hendon HH, Thompson DWJ, Wheeler MC. „Australian rainfall and surface temperature variations associated with the Southern Hemisphere annular mode”, *J Clim*, t. 20, nr 11, s. 2452–2467, cze. 2007, DOI: 10.1175/JCLI4134.1.
- [25] Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. „Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts”, *Build Environ*, t. 45, nr 2, s. 380–388, luty 2010, DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2009.06.018.
- [26] „HOB0 MX1104”. Dostęp: 14 maj 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104#specifications>
- [27] Hansen A i in., „The Thermal Environment of Housing and Its Implications for the Health of Older People in South Australia: A Mixed-Methods Study”, *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 96, t. 13, nr 1, s. 96, sty. 2022, DOI: 10.3390/ATMOS13010096.
- [28] „South Australia – Arid, Semi-arid, Mediterranean [Britannica]”. Dostęp: 2 wrzesień 2025. [Online]. Dostępne na: https://www.britannica.com/place/South-Australia/Climate?utm_source=chatgpt.com
- [29] „Australia’s official weather forecasts & weather radar – Bureau of Meteorology”. Dostęp: 2 wrzesień 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.bom.gov.au/>
- [30] Ortiz-Ospina E, Roser M. „How do people across the world spend their time and what does this tell us about living conditions?”, *Our World in Data*, 2024.
- [31] „EN 16798–1:2019 – Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1–6”.
- [32] Fanger PO. „Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation”, *ASHRAE Trans, Part II*, t. 73, s. III4–1, 1967.
- [33] Harding EC, Franks NP, Wisden W. „Sleep and thermoregulation”, *Curr Opin Physiol*, t. 15, s. 7–13, cze. 2020, DOI: 10.1016/J.COPHYS.2019.11.008.