

prof. dr hab. inż. arch. Justyna Kobylarczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-3358-3762

dr hab. inż. Marta Cebulska, prof. PK²⁾

ORCID: 0000-0002-6255-2295

dr inż. Beata Baziak^{2)*}

ORCID: 0000-0002-6118-5470

dr inż. Marek Bodziony²⁾

ORCID: 0000-0002-7535-4685

Assessment of thermal conditions in urban interiors on the example of the Cracow University of Technology campus

Ocena warunków termicznych we wnętrzu urbanistycznym na przykładzie kampusu Politechniki Krakowskiej

DOI: 10.15199/33.2024.12.25

Abstract. This paper presents the results of an assessment of thermal conditions on the main campus of the Krakow University of Technology. Measurements of temperature were made in the period 21.03.2023 – 31.03.2024 using mobile measurement sensors located in a urban interior, enclosed on all sides by university buildings with a different number of floors and different purposes. The surroundings of the facilities, vary due to the degree of greening and exposure of the area to solar radiation. The measurements made it possible to determine the influence of the existing conditions, including the distance between the buildings, the type of surface (paved/grassy), and the proximity of high greenery on the temperature values. In addition to their scientific value, the conclusions formulated have a practical dimension. They can be used in design work for shaping urban areas with a favourable microclimate.

Keywords: microclimate; architectural features; maximum/minimum air temperature; insolation.

In a period of climate change, searching for solutions that allow us to make informed decisions about shaping built-up areas with a specific microclimate is a priority for planners, architects and engineers. Climate change that has been occurring in Europe since 1985 has been the subject of analysis by many researchers, including those described in [1]. The results of these analyses indicate that it is necessary to seek remedies to minimise the negative effects of climate change on the living conditions of contemporary humans. However, to date, too little attention has been paid in research to analysing the impact of spatial conditions on the climatic conditions of the surroundings. The rising interest in negative climate phenomena that appear globally is an optimistic tendency. One important theme of the observations is the warming of the climate, which has multiple environmental implications. Its consequences can be irreversible. It is therefore necessary to adopt a broad perspective of this subject matter and account for various scales at which climate affects living conditions. The scale of the West

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki oceny warunków termicznych na terenie głównego kampusu Politechniki Krakowskiej. Pomiary temperatury wykonano w okresie 21.03.2023 – 31.03.2024 przy użyciu mobilnych czujników pomiarowych zlokalizowanych we wnętrzu urbanistycznym, domkniętym ze wszystkich stron obiektami uczelni o różnej liczbie kondygnacji i różnym przeznaczeniu. Otoczenie obiektów jest zróżnicowane ze względu na stopień zazielenienia i ekspozycji obszaru na promieniowanie słoneczne. Pomiary pozwoliły na określenie wpływu warunków zastanych, w tym m.in.: odległości między budynkami, rodzaju nawierzchni (utwardzona/trawiasta), bliskości zieleni wysokiej na wartość temperatury. Sformułowane wnioski, poza wartością naukową, mają wymiar praktyczny, mogą bowiem być wykorzystane w pracy projektowej dotyczącej kształtowania obszarów miejskich o sprzyjającym mikroklimacie.

Słowa kluczowe: mikroklimat; obiekty architektoniczne; maksymalna/minimalna wartość temperatury powietrza; nasłonecznienie.

W dobie zmian klimatycznych poszukiwanie rozwiązań umożliwiających świadome kształtowanie obszarów zabudowanych o określonym mikroklimacie stanowi jedno z priorytetowych działań planistów, architektów i inżynierów. Zmiany klimatu występujące w Europie od 1985 r. stały się tematem analiz wielu badaczy m.in. w [1]. Wyniki tych analiz wskazują, że konieczne jest poszukiwanie środków zaradczych w celu minimalizowania negatywnych skutków zmian klimatycznych na warunki życia współczesnego człowieka. Dotychczas zbyt mało uwagi poświęca się jednak analizie wpływu warunków przestrzennych na warunki klimatyczne otoczenia. Optymistyczną tendencją jest wzrastające zainteresowanie badaczy negatywnymi zjawiskami klimatycznymi zachodzącymi w skali globalnej. Ważnym tematem prowadzonych obserwacji jest m.in. ocieplenie klimatu, które ma wielorakie znaczenie środowiskowe. Jego konsekwencje mogą być nieodwracalne. Konieczne jest więc szerokie spojrzenie na omawianą problematykę z uwzględnieniem różnej skali oddziaływania klimatu na warunki życia. Do skali mezoregionu zachodniopomorskiego Polski odniesiono się m.in. w [2], a rejonu polskie-

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Architektury

²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

* Correspondence address: beata.baziak@pk.edu.pl

Pomeranian meso-region of Poland was referred to, e.g., in [2], and the Polish Baltic Sea coast in [3], with a presentation of, primarily, the variability in temperature values and precipitation intensity. Urban-scale climate change was discussed in [4], among others. Research on the consequences of climate change, including the occurrence of extreme climatic events, is discussed, among others, in [5]. The fluctuating temperature values within the city of Krakow are analysed in [6], and interesting insights into eco-city assumptions in the context of climatic conditions are presented in [7].

Increasingly, studies of changes in temperature are being carried out with reference to the local scale, including a full diagnosis of existing conditions. These became one of the aims of the research discussed in this article. It was analysed to what extent the way in which an area is developed, including the location of structures with a specific form and construction materials, the proximity of greenery and the type of paving, influences the microclimate of an urban interior (understood as a fragment of space delimited by specific wall-forming elements, including structures, natural elements and greenery). The next stage of the study was to determine the influence of existing conditions on a building interior's temperature value. The temperature inside a building is one of the factors that determine its comfort of use [8]. One of the aims of research in heritage areas is to adapt them rationally to modern requirements [9]. Temperature value determines thermal comfort, which, among other things, has been the subject of much research as described in [10]. When analysing the thermal comfort of urban interiors, the development density is important, which is directly related to the distance between buildings, as reported, e.g. in [11]. Ensuring thermal comfort and creating conditions in which optimal temperature values can be noted often requires lowering it, which is mentioned, among others, in [12]. It was observed that the temperature parameters are directly dependent on the proximity of the vegetation and the water bodies, as well as the surface of the interior's paving. In [13] it was demonstrated that the type of surface has a significant effect on the ambient temperature value, and in [14] it was reported that surfaces made of materials with low solar reflectance store a significant amount of heat, which directly affects the thermal comfort of the urban interior.

In the studies described in [13, 14], more than one element was used that can influence the temperature value of an urban interior. Determining the influence of these elements on the thermal conditions of the urban interior located on the main campus of the Cracow University of Technology became the subject of the research discussed in this article.

The results of personal observations and their analysis enabled the formulation of conclusions concerning the thermal conditions in the urban interior and the identification of elements that are important in the case of modernising this historical developed area.

Research

On a macro scale, it should be noted that the study was carried out in the city of Krakow, which covers an area of approx. 327 km² [15] – Figure 1 – located in southern Poland,

go wybrzeża Morza Bałtyckiego w [3], opisując przede wszystkim zmienność wartości temperatury oraz intensywność opadów. O zmianach klimatu w skali miasta wypowiedziano się m.in. w [4]. Badania dotyczące konsekwencji zmian klimatycznych, w tym występowania ekstremalnych zjawisk klimatycznych, omówiono m.in. w [5]. Zmieniające się wartości temperatury na obszarze miasta Krakowa przeanalizowano w [6], a ciekawe spostrzeżenia dotyczące założeń ekomiasta w kontekście warunków klimatycznych przedstawiono w [7].

Coraz częściej badania zmian temperatury prowadzone są w odniesieniu do skali lokalnej, z uwzględnieniem pełnej diagnozy zastanych warunków. Stały się one jednym z celów badań omawianych w artykule. Przeanalizowano, w jakim stopniu sposób zagospodarowania terenu, w tym usytuowanie obiektów o określonej formie i zastosowanych materiałach budowlanych, bliskość zieleni i rodzaj nawierzchni ma wpływ na mikroklimat wnętrza urbanistycznego (rozumianego jako fragment przestrzeni ograniczony przez określone elementy tworzące ściany, w tym np. obiekty, elementy przyrodnicze – zieleni). Kolejnym etapem badań będzie określenie wpływu warunków zastanych na wartość temperatury wnętrza budynku. Wartość temperatury wewnątrz budynku jest jednym z czynników, które decydują o komforcie jego użytkowania [8]. Prowadzone badania w obszarach zabytkowych mają na celu m.in. ich racjonalne przystosowywanie do współczesnych wymagań [9]. Wartość temperatury warunkuje komfort cieplny, który stał się tematem wielu badań, m.in. opisanych w [10]. W przypadku analizy komfortu cieplnego wewnątrz urbanistycznych istotne znaczenie ma m.in. intensywność zabudowań, co bezpośrednio wiąże się z odległością między obiektami [11]. Zapewnienie komfortu cieplnego i stworzenie warunków, w których odnotować można optymalną wartość temperatury, wymaga niekiedy jej obniżenia, o czym wspomina się m.in. w [12]. Zauważono, że parametry temperatury są zależne wprost od bliskości roślinności i założeń wodnych, a także nawierzchni. W [13] wykazano, że rodzaj nawierzchni ma znaczny wpływ na wartość temperatury otoczenia, a w [14] podano, że nawierzchnie z materiałów o małym współczynniku odbicia promieniowania słonecznego gromadzą znaczną ilość ciepła, co bezpośrednio wpływa na komfort cieplny wnętrza urbanistycznego.

W badaniach opisanych w [13, 14] wykorzystano więcej niż jeden element, który może mieć wpływ na wartość temperatury wnętrza urbanistycznego. Określenie wpływu tych elementów na warunki termiczne wnętrza urbanistycznego zlokalizowanego na terenie głównego kampusu Politechniki Krakowskiej stało się przedmiotem badań, które omówiono w artykule.

Wyniki obserwacji własnych i ich analiz pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących warunków technicznych we wnętrzu urbanistycznym, a także na wyszczególnienie elementów ważnych w przypadku modernizacji zabytkowego obszaru zabudowanego.

Badania

Rozpatrując skalę makro, należy nadmienić, że badania przeprowadono na terenie miasta Krakowa, którego powierzchnia wynosi ok. 327 km² [15] – rysunek 1, położonego na południu

in the valley of the country's largest river, the Vistula. The research area was the campus of the Cracow University of Technology, located in the centre of Krakow at 24 Warszawska Street. The research utilised an analysis of temperature values in the urban interior's different areas (points). The temperature was measured using mobile measuring sensors (Benetech GM1365 data logger), which were placed on the window sills and facades of the university's buildings, covering the four cardinal directions. A total of 11 measurement points (Figure 1) located at heights of 2.2–2.5 m above ground level (m a.g.l.) and 1 at 3.5 m a.g.l. were taken into account. Data from a stationary measurement point (reference point no. 17) equipped with devices for measuring climate elements, located approx. 67 m from the analysed urban area (it is situated on the premises of the Cracow University of Technology – 216.6 m above sea level) were also used. Continuous measurements at this point served as reference data for the measurements of air temperature in the urban interior, for which portable sensors were used. As the reference point data is available online, the maximum temperature value at the specified measuring points can be determined at any time. It is a simple method that can be used to assess thermal comfort in different urban areas [16].

This study was based on a series of homogeneous 24-hour air temperature values measured every 10 minutes in the period 21.03.2023 – 31.03.2024 at 11 measurement points (Figure 1).

GIS (Geographic Information System) tools available in the free QGIS software were used for processing and analysis. QGIS is an open-source geographic information system (GIS) licensed under the GNU General Public License. It supports multiple vector, raster and database formats and functions [17]. Thanks to additional functionalities (plug-ins), data processing can be automated. In this article, GIS was used to create a database to determine variability over time and space. Based on this, distributions of the following data were created: temperature, surface and development of the study area and the associated albedo, as well as terrain elevation based on the Numerical Land Cover Model (NMPT). MS Excel software

Polksi, w dolinie największej w kraju rzeki – Wisły. Obszarem badań był kampus Politechniki Krakowskiej zlokalizowany w centrum Krakowa, przy ulicy Warszawskiej 24. W pracy wykorzystano analizę wartości temperatury wnętrza urbanistycznego w różnych jego obszarach (punktach). Temperaturę mierzono za pomocą mobilnych czujników pomiarowych (typ Benetech GM1365 – data logger), które zostały usytuowane na parapetach okien i elewacjach budynków uczelni, obejmując cztery strony świata. Uwzględniono 11 punktów pomiarowych (rysunek 1) zlokalizowanych na wysokości 2,2 – 2,5 m nad poziomem gruntu (m n.p.g.) oraz 1 na wysokości 3,5 m n.p.g. Posłużono się również danymi ze stacjonarnego punktu pomiarowego (punkt referencyjny nr 17) wyposażonego w urządzenia do pomiarów elementów klimatu, oddalonego ok. 67 m od analizowanego wnętrza urbanistycznego (zlokalizowany jest na terenie Politechniki Krakowskiej – 216,6 m n.p.m.). Prowadzone w sposób ciągły pomiary w tym punkcie posłużyły jako dane referencyjne w odniesieniu do pomiarów temperatury powietrza we wnętrzu urbanistycznym, w przypadku których wykorzystano mobilne czujniki. W związku z tym, że dane z punktu referencyjnego są dostępne on-line, to maksymalną wartość temperatury w określonych punktach pomiarowych można wyznaczyć w dowolnej chwili. Jest to prosta metoda, która może posłużyć do oceny komfortu termicznego w różnych obszarach miejskich [16].

Podstawę opracowania stanowił ciąg jednorodnych wartości temperatury powietrza w ciągu doby, mierzonych co 10 min w okresie 21.03.2023 – 31.03.2024 w 11 punktach pomiarowych (rysunek 1).

Do przetwarzania i analiz wykorzystano narzędzia GIS (Geographic Information System) dostępne w wolnym oprogramowaniu QGIS. QGIS to system informacji geograficznej (GIS) o otwartym kodzie źródłowym, objęty licencją na podstawie Powszechnej Licencji Publicznej GNU. Obsługuje on wiele formatów i funkcji wektorowych, rastrowych oraz baz danych [17]. Dzięki dodatkowym funkcjonalnościom (wtyczkom) możliwa jest automatyzacja przetwarzania danych. W ar-



Fig. 1. Location of the study area (Cracow University of Technology campus at Warszawska Street in Krakow) with measurement points

Own elaboration based on Open Street Map

Rys. 1. Lokalizacja obszaru badawczego (kampus Politechniki Krakowskiej przy ul. Warszawskiej w Krakowie) wraz z punktami pomiarowymi

Opracowanie własne na podstawie Open Street Map

was used to prepare statistical summaries and box-and-whisker diagrams. The box-and-whisker diagram shows the distribution of the data in quartiles, with a distinction made between the average and outliers. The vertical lines, known as ‘whiskers’, indicate variation outside the upper and lower quartiles, and any point that lies outside the lines, or whiskers, is considered an outlier (outlier points).

Discussion on the results

Overview of days with maximum air temperature. As numerous studies [2 ÷ 4] have shown, the variation in air temperature is influenced not only by the amount of solar radiation, but also by local conditions such as the degree of development, the urban heat island effect and regional conditions. The occurrence of hot and very hot days, i.e., days with maximum temperatures above 25 and 30°C [7, 15], is not insignificant for humans. In Krakow, hot days can occur from April to October and very hot days – from April to September. According to the research presented in [15], in the years 1901–2000 the average number of days with $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ for the year was 40.9 (approx. 11% of the time for the whole year), and with $t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ – 5.6 days (approx. 2% of the entire year). The study period considered (21.03.2023 – 31.03.2024) is characterised by a high variability of 24-hour temperature values. The average monthly values in the winter season are positive despite the occurrence of a minimal temperature value significantly below zero (-16°C in January 2024). The maximum temperature values are surprising, as even in the coldest months they were over 10°C . High maximum temperature values, defined as the highest temperature value in a given point and period, were also noted during the summer. These exceeded 30°C and even 34°C (table). In Europe, including Poland, the daily maximum air temperature is determined for the period from 18:00 UTC the day before to 18:00 UTC on the current day [18]. The number of days with $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ during the study period at the reference point was 80 and with $t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ was 24. A maximum temperature value was determined for each day at the measurement sites. The frequency of occurrence of the maximum daily air temperature in each month was determined. The thermal conditions were also assessed taking into account the development of the area, and the spatial distribution of the maximum air temperature was presented.

As demonstrated by the results, the temperature values at the locations where the mobile temperature measuring sensors were distributed were higher than those recorded at the reference point (no. 17). These differences may stem from, among others, the different exposures of measurement points to solar radiation and the placement of buildings in the urban interior. The measurements have shown that maximum air temperatures are two to almost three times higher than at the reference point (e.g., January 2024 – 290%, November 2023 – 212%).

For the period and study area considered, the most common (62%) – Figure 2 – the maximum temperature that occurred at measuring station 2 (Figure 1), where the sensor faced east. Only at this site, the maximum temperature during the study period reached 65°C , while at the other measuring stations

tykule wykorzystano GIS do utworzenia bazy danych pozwalających na określenie zmienności w czasie i przestrzeni. Na jej podstawie utworzono rozkłady danych: temperatury, pokrycia i zagospodarowania obszaru badań i związanego z tym parametru albedo oraz wysokości terenu na podstawie Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT). Do opracowania zestawień statystycznych, wykresów typu „skrzynka-wąsy” zastosowano oprogramowanie MS Excel. Wykres typu „skrzynka-wąsy” przedstawia rozkład danych w kwartylach z wyróżnieniem średniej i wartości odstających. Pionowe linie, zwane „wąsami” wskazują na zmienność poza kwartylem górnym i dolnym, a każdy punkt, który leży poza liniami, czyli wąsami, jest uznawany za wartość odstającą (punkty odstające).

Dyskusja wyników

Charakterystyka dni z maksymalną wartością temperatury powietrza. Jak wykazały liczne badania [2 ÷ 4], na zmienność temperatury powietrza oprócz ilości energii promieniowania słonecznego wpływ mają również warunki lokalne, w tym m.in. stopień zabudowy, miejska wyspa ciepła, a także warunki regionalne. Nie bez znaczenia dla człowieka jest występowanie dni gorących i upalnych, czyli dni z maksymalną wartością temperatury powyżej 25° i 30°C [7, 15]. W Krakowie dni gorące mogą pojawiać się od kwietnia do października, a upalne – od kwietnia do września. Jak wynika z badań [15], w latach 1901 – 2000 średnia liczba dni z $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ w roku wyniosła 40,9 (co stanowi ok. 11% czasu dla całego roku), a z $t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ – 5,6 dni (ok. 2% czasu dla całego roku). Rozpatrywany okres badań (21.03.2023 – 31.03.2024) charakteryzuje się dużą zmiennością wartości dobowej temperatury. Średnie wartości miesięczne temperatury w okresie zimowym są dodatnie mimo występowania minimalnej wartości temperatury znacznie poniżej zera (-16°C w styczniu 2024 r.). Zaskakująco wysokie są maksymalne wartości temperatury, które nawet w najchłodniejszych miesiącach wyniosły ponad 10°C . W miesiącach letnich również odnotowano wysokie maksymalne wartości temperatury, definiowane jako najwyższa wartość temperatury w danym punkcie i okresie. Przekraczały one 30°C , a nawet 34°C (tabela). W Europie, w tym w Polsce, maksimum dobowe temperatury powietrza określa się za okres od godziny 18 UTC dnia poprzedniego do godziny 18 UTC dnia bieżącego [18]. Liczba dni z $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ w okresie badań w punkcie referencyjnym wyniosła 80, a z $t_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ – 24. W miejscach stanowisk pomiarowych w przypadku każdej doby wyznaczono maksymalną wartość temperatury. Określono częstość wystąpienia maksymalnej dobowej temperatury powietrza w poszczególnych miesiącach. Dokonano również oceny warunków termicznych z uwzględnieniem zagospodarowania obszaru, a także przedstawiono przestrzenny rozkład maksymalnej wartości temperatury powietrza.

Jak wykazały wyniki badań, wartości temperatury w miejscach, gdzie rozmieszczone zostały mobilne czujniki pomiaru temperatury, były wyższe niż odnotowane w punkcie referencyjnym (nr 17). Różnice mogą wynikać m.in. z różnej ekspozycji punktów pomiarowych na promieniowanie słoneczne oraz usytuowania budynków we wnętrzu urbanistycznym. Po-

Characteristics of temperature values (t_{sr} , t_{max} in °C) recorded in the study area during the measurement period *Charakterystyka wartości temperatury (t_{sr} , t_{max} w °C) zanotowanych na obszarze badań w okresie pomiarowym*

Year/Rok	Month/Miesiąc	Reference point (no. 17)/Punkt referencyjny (nr 17)				Study area/Obszar badań			
		t_{sr} [°C]	t_{max} [°C]	frequency/częstość $t_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ [%]	frequency/częstość $t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ [%]	t_{sr} [°C]	t_{max} [°C]	frequency/częstość $t_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ [%]	frequency/częstość $t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ [%]
2023	3	9,4	22,4	0,0	0,0	10,9	46,9	1,9	1,9
2023	4	9,0	24,2	0,0	0,0	11,0	57,3	5,6	5,1
2023	5	14,2	27	0,3	0,0	16,3	55,5	5,9	5,9
2023	6	19,3	31,3	3,5	0,8	21,5	58,6	7,7	7,7
2023	7	21,8	34,4	7,2	1,9	24,1	65,2	8,0	8,0
2023	8	21,7	34,2	5,3	3,2	23,2	64,8	7,7	6,9
2023	9	19,1	30,6	4,0	0,5	20,0	59,6	6,4	6,4
2023	10	12,5	27,4	0,5	0,0	13,4	52,0	5,3	4,5
2023	11	5,5	17,2	0,0	0,0	6,6	36,5	1,3	1,1
2023	12	4,3	13,1	0,0	0,0	3,8	22,9	0,0	0,0
2024	1	1,1	11,1	0,0	0,0	1,6	32,2	0,5	0,3
2024	2	7,2	18,3	0,0	0,0	8,3	38,1	2,1	1,3
2024	3	8,1	26,3	0,5	0,0	9,8	49,1	5,3	3,5

during this period the maximum temperature did not exceed 55°C. The maximum number of days with $t_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ at point no. 2 was 207 days, and with $t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ – 188 days.

Assessment of the urban interior's development and its impact on the thermal conditions of the area. In cities with a high degree of surface impermeability, temperature increases are clearly perceptible. The presence of large areas covered with asphalt, concrete, and façade cladding, which heat up during the day and release heat to the atmosphere during the night, results in an increase in temperature values in the city centre relative to peripheral areas. The average annual amplitude in Krakow exceeds 22°C [15]. Research [1] on the analysis of temperature values over the last 70 years shows that in Europe it has increased linearly since 1985. The largest increase in the years 1985 – 2020 was noted for spring – 0.061°C/year. However, the rate of increase in temperature values does not differ too much between winter, spring and summer. The development of the study area consists mainly of impermeable surfaces (Figure 3a), dominated by asphalt roads, pavements and buildings. They account for 93% of the interior's area, while green areas make up about 17% of the total area. The type of surface is directly related to the albedo value [19, 20], which determines the light reflectivity of a gi-

miary wykazały, że maksymalne temperatury powietrza są dwu-, a nawet prawie trzykrotnie wyższe niż w punkcie referencyjnym (np. styczeń 2024 r. – 290%, listopad 2023 r. – 212%).

W przypadku rozpatrywanego okresu i obszaru badań najczęściej (w 62%) – rysunek 2 – temperatura maksymalna wystąpiła na stanowisku pomiarowym 2 (rysunek 1), w którym czujnik skierowany był na wschód. Tylko w tym miejscu maksymalna temperatura w okresie badań osiągnęła 65°C, podczas gdy na pozostałych stanowiskach pomiarowych w tym okresie nie przekroczyła 55°C. Maksymalna liczba dni z $t_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ w punkcie 2 wyniosła 207 dni, a z $t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ – 188 dni.

Ocena zagospodarowania wnętrza urbanistycznego i jego wpływ na warunki termiczne obszaru.

W miastach o dużym stopniu uszczelnienia powierzchni wzrost wartości temperatury jest bardzo odczuwalny. Występujące duże powierzchnie pokryte asfaltem, betonem, okładziną elewacyjną, które w czasie dnia nagrzewają się, a w czasie nocy oddają ciepło do atmosfery, powodują wzrost wartości temperatury w centrum miasta w stosunku do obszarów peryferyjnych. Średnia wartość roczna amplitudy w Krakowie przekracza 22°C [15]. Badania [1] dotyczące analizy wartości temperatury w ostatnich 70 latach pokazują, że w Europie rośnie ona liniowo od 1985 r. Największy wzrost w latach 1985 – 2020 odno-

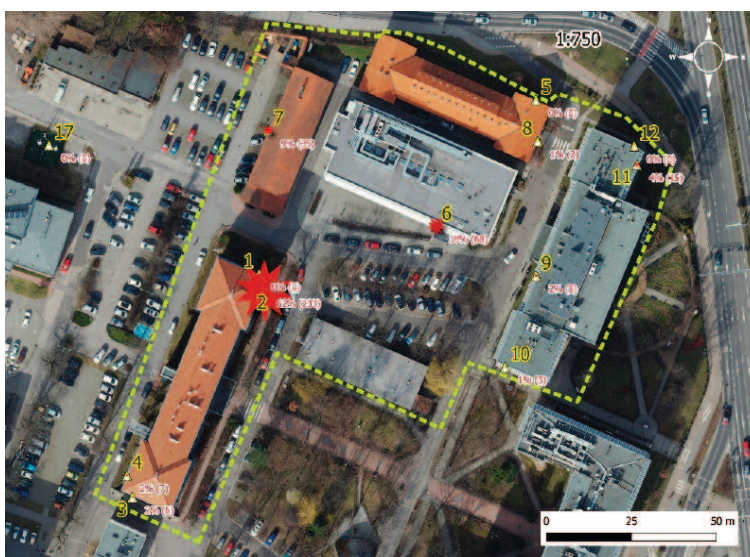


Fig. 2. Frequency of occurrence of maximum temperature values [%] and number of days (cases) in bracket for measuring points

Own elaboration based on data from the geoportal (geoportal.gov.pl)

Rys. 2. Częstość występowania maksymalnej wartości temperatury [%] oraz liczba dni (w nawiasie) w przypadku punktów pomiarowych

Opracowanie własne na podstawie danych pochodzących z geoportalu (geoportal.gov.pl)

ven surface. A light surface reflects more rays than a dark surface (Figure 3b), while a darker surface absorbs more sunlight and also heats up more easily.

This research showed that the analysed urban interior of the main campus of the Cracow University of Technology is characterised by a high variability in temperature values. This is primarily influenced by the type of surfaces and development, including building placement [21]. On surfaces that are exposed to the sun, temperature values are up to 35°C higher and the time periods with temperature values above 30°C are several times longer than in shaded areas. As the results of this study have shown, in this case, the distance between buildings and their scale (number of storeys) has the greatest effect on the temperature value. The location of the buildings, considered in relation to the cardinal directions, is also important. The sites included in the study are located at similar distances from grassed areas, but they are at different distances from tall greenery, which especially in summer is important in the case of shading the area and lowering high temperature values.

Distribution of maximum temperature values in the urban interior. Based on the analysis of maximum temperature at each measurement point, distributions of maximum temperature values in the urban interior were plotted. The distributions included the values of the albedo. Using the distributions of temperature and albedo and NMPT values, the relationships between the parameters (Figure 4) were determined along the adopted cross-sectional axis shown in Figure 5. Figure 4 shows that surfaces made of materials with low solar reflectance accumulate considerable amounts of heat, as stated, among others, in [14]. This is another conclusion that can be referred to the impact of an urban interior's development and its microclimate.

The analysis of the distribution of temperature values in the study area shows that the highest temperature values occur along an east–west line, namely in line with the apparent movement of the sun. Distinctive places were observed during the period under analysis:

towano wiosną – 0,061°C/rok. Jednak tempo wzrostu wartości temperatury zbytnio nie różni się między zimą, wiosną i latem. Zagospodarowanie terenu badań obejmuje głównie powierzchnie uszczelnione (rysunek 3a), w którym dominują drogi asfaltowe, chodniki oraz budynki. Stanowią one 93% obszaru wnętrza, natomiast tereny zielone ok. 17% całkowitej powierzchni. Rodzaj nawierzchni terenu jest bezpośrednio powiązany z wartością współczynnika albedo [19, 20], który określa zdolność odbijania światła przez daną powierzchnię. Jasna powierzchnia odbija więcej promieni niż ciemna (rysunek 3b), natomiast ciemniejsze podłoże pochłania więcej promieni słonecznych, łatwiej się również nagrzewa.

Przeprowadzone badania wykazały, że analizowane wnętrza urbanistyczne głównego kampusu Politechniki Krakowskiej charakteryzuje się dużą zmiennością wartości temperatury. Wpływ na to ma przede wszystkim rodzaj nawierzchni i zagospodarowania terenu, w tym usytuowanie budynków [21]. Na powierzchniach, które są wyeksponowane na działanie słońca, wartości temperatury są wyższe nawet o 35°C, a czas występowania wartości temperatury powyżej 30°C jest kilkakrotnie dłuższy niż w przypadku obszarów zacienionych. Jak wykazały wyniki badań, największy wpływ na wartość temperatury ma w tym przypadku odległość między budynkami i ich skala (liczba kondygnacji). Nie bez znaczenia pozostaje lokalizacja budynków, rozpatrywana w stosunku do stron świata. Uwzględnione w badaniu obiekty są usytuowane w zbliżonej odległości od powierzchni trawiastych, ale pozostają w różnej odległości od zieleni wysokiej, co szczególnie w okresie letnim ma znaczenie w przypadku zacienienia obszaru i obniżenia wysokiej wartości temperatury.

Rozkład wartości temperatury maksymalnej we wnętrzu urbanistycznym. Na podstawie analizy wartości maksymalnej temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych wyznaczono rozkłady wartości temperatury maksymalnej we wnętrzu urbanistycznym. W rozkładach zostały uwzględnione wartości parametru albedo. Wykorzystując opracowane rozkłady wartości temperatury i parametru albedo oraz NMPT,

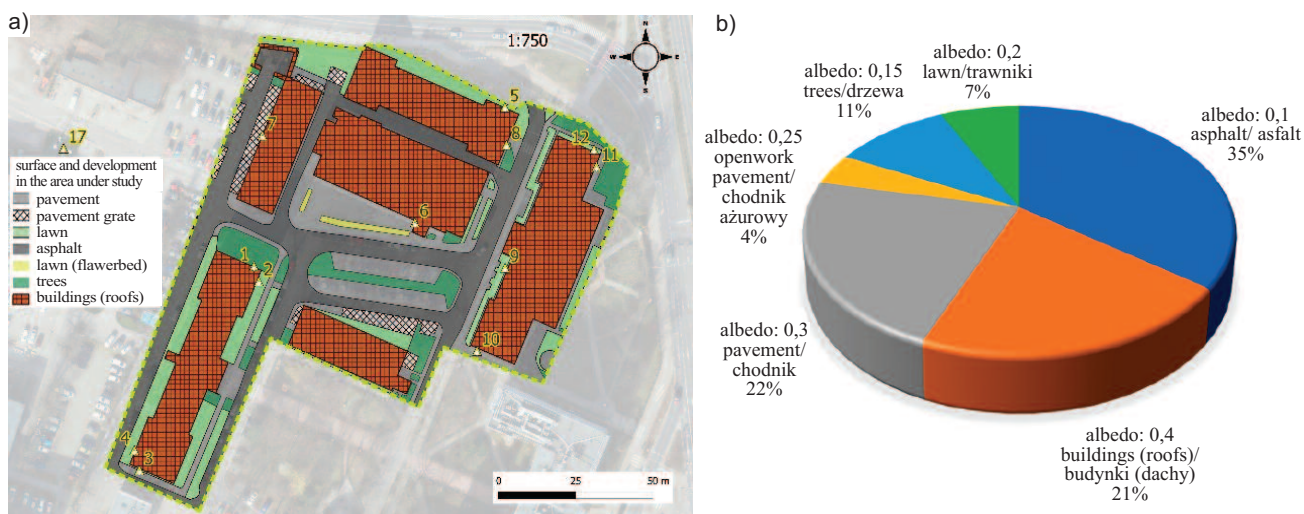


Fig. 3. Surface cover and land use of the study area (a) and albedo (b)

Rys. 3. Nawierzchnia terenu i zagospodarowanie obszaru badań (a) oraz współczynnik albedo (b)

Own elaboration based on Open Street Map

Opracowanie własne na podstawie Open Street Map

- measurement point 2 is the warmest point in the study area. This point is exposed to continuous sunlight (the sensor faces east and is virtually unshaded), which means that the maximum temperature of the year occurs most frequently (233 times – Figure 2);

- measurement point 1 (located just around the corner of the same building as measurement point 2) is a location with a much lower air temperature. The maximum temperature at this point is on average 27°C lower than the maximum temperature at point 2 (the distance between the points is ca. 6 m along the building's wall). The mobile measurement sensor at this point is practically always shaded due to the building's location and the tall trees that grow near this measurement point (Figure 1).

As the results of the study show, a very high level of insolation occurs in the summer period, namely June, July and August, which is related not only to the length of the day, insolation and exposure, but also to the intensity with which the building walls and facades heat up. The summer period of 2023 was characterised by exceptionally high temperatures in these months (Figure 6), with maximum temperature values exceeding 50°C at several points, while at measurement point 2, the temperature value exceeded 60°C.

At measuring point 2, the temperature value of 25°C was exceeded for at least 90% of the days in each of the summer months. The situation was similar for several other measurement points. At measurement point 2, the temperature value of 30°C was exceeded during at least 80% of the days in each of the summer months. The situation was similar for several other measure-

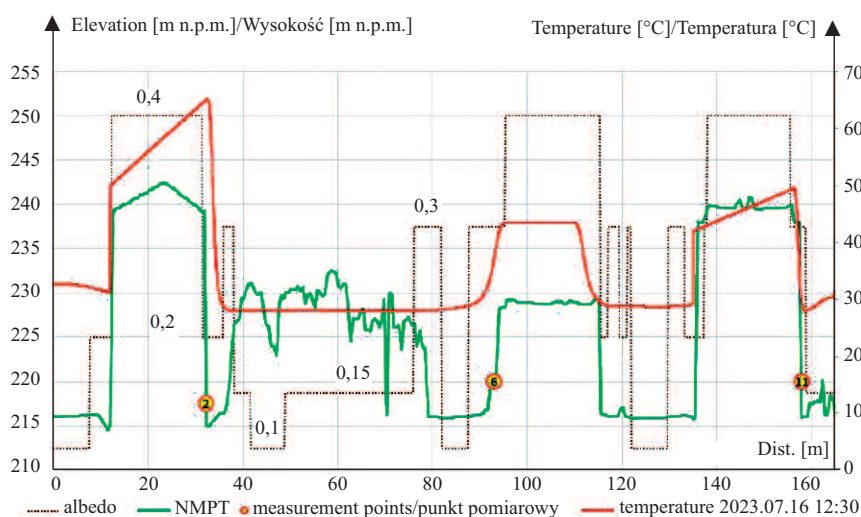


Fig. 4. Variation of the maximum temperature values recorded on 2023-07-16 at 12:30 along the section line (Figure 5) depending on the type of land cover and land use determined from the NMPT and the albedo factor

Rys. 4. Zmienność wartości maksymalnej temperatury odnotowanej 16.07.2023 o godz. 12:30 wzdłuż linii przekroju (rysunek 5) w zależności od rodzaju nawierzchni i zagospodarowania terenu określonego na podstawie NMPT i współczynnika albedo

wętrza urbanistycznego na jego mikroklimat.

Analiza rozkładów wartości temperatury na obszarze badań wykazuje, że najwyższe wartości temperatury występują na linii wschód-zachód, czyli zgodnie z pozornym ruchem słońca. W analizowanym okresie zaobserwowano miejsca charakterystyczne:

- punkt pomiarowy 2 jest najcieplejszym miejscem na obszarze badań. Punkt ten wystawiony jest na nieustanne działanie promieni słonecznych (czujnik jest skierowany na wschód i praktycznie jest niezacieniony), co powoduje, że temperatura maksymalna w roku występuje najczęściej (233 razy – rysunek 2);

- punkt pomiarowy 1 (położony tuż za rogiem tego samego budynku, na którym znajduje się punkt pomiarowy 2), to miejsce o znacznie niższej wartości temperatury powietrza. Maksymalna wartość temperatury w tym punkcie jest niższa średnio o ok. 27°C od maksymalnej wartości temperatury w punkcie 2 (odległość pomiędzy punktami wynosi ok. 6 m wzdłuż ściany budynku). Mobilny czujnik pomiaru w tym punkcie praktycznie cały czas znajduje się w cieniu związanym z usytuowaniem budynku i wysokich drzew rosnących w pobliżu tego punktu pomiarowego (rysunek 1).

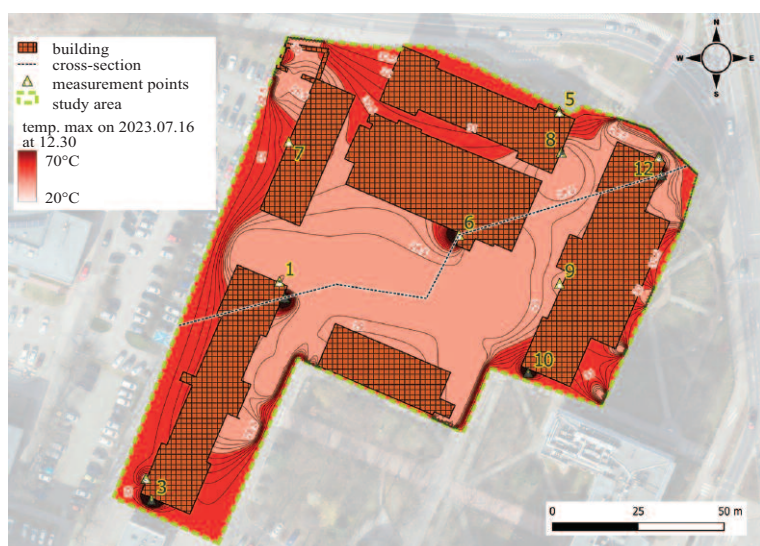


Fig. 5. Distribution of maximum temperature values in the study area recorded on 2023-07-16 at 12:30 p.m. Figure 4 shows the temperature variation along the designated section line (dashed line)

Rys. 5. Rozkład wartości temperatury maksymalnej na obszarze badań odnotowanej 16.07.2023 o godz. 12:30. Na rysunku 4 przedstawiono zmienność temperatury wzdłuż wyznaczonej linii przekroju (linia przerywana)

ment points. In contrast, days with temperature values of 50°C and above accounted for 27% of the days in June, 58% in July and 48% in August (measurement point 2). At measurement point 2, days with a temperature value of 60°C and above accounted for 10% of the days in July and 19% in August. It is practically the only place where such high temperatures occurred so often.

For the study area, a spatial distribution of air temperature values was made for the highest measured temperature value, which occurred on 16.07.2023 at 12:30. This distribution was

Jak wykazały wyniki badań, bardzo wysoki stopień nasłonecznienia występuje w okresie letnim, tj. w czerwcu, lipcu i sierpniu, co jest związane nie tylko z długością dnia, usłonecznieniem, ekspozycją na słońce, ale również z intensywnością nagrzewania murów i elewacji budynków. Okres letni 2023 r. charakteryzował się wyjątkowo wysoką temperaturą w tych miesiącach (rysunek 6), w których maksymalne wartości temperatury w kilku punktach przekroczyły 50°C, natomiast w punkcie pomiarowym 2 wartość temperatury przekracza 60°C.

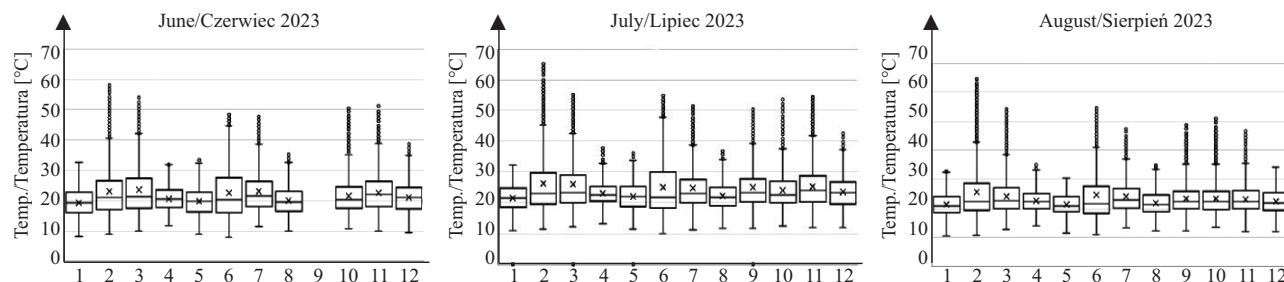


Fig. 6. Statistical characteristics of maximum daily temperature values at individual measurement points during the summer period in 2023 (the x-axis represents the measurement point number as shown in Figure 1)

Rys. 6. Charakterystyki statystyczne maksymalnych wartości dobowej temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych w okresie letnim 2023 r. (oś x przedstawia nr punktu pomiarowego zgodnie z rysunkiem 1)

made in QGIS, based on the temperature values recorded at the 12 measurement points. Three zones of temperature values were delimited in the study area: up to 30°C (area in pink), between 30 and 35°C (area in red) and above 35°C (area in black). The highest temperature values are in areas most exposed to solar radiation and without cover.

On the basis of analyses of the distribution of maximum temperature values, a correlation was observed between high temperature values at the individual measuring points and the reference point. This correlation was used to determine the relationship between the maximum temperature at the individual measuring points and the temperature recorded at the reference point (no. 17). Based on differences in averages concerning maximum temperature values, a dependence model was determined (Figure 7), which can use temperature values measured at the reference point to determine temperature values at the mobile measurement point locations. This is made possible by the fact that the measurement and recording of meteorological parameters at the reference point (no. 17) takes place continuously.

Summary and conclusions

This research made it possible to test research methods that utilise mobile was exceeded during at least 80% of the days in each of the summer months. The situation was similar for several other measurement points. In contrast, days with temperature values of 50°C and above accounted for 27% of the days in June, 58% in July and 48% in August (measurement point 2). At measurement point 2, days with a temperature value of 60°C and above accounted for 10% of the days in July and 19% in August. It is practically the only place where such high temperatures occurred so often.

W punkcie pomiarowym 2 wartość temperatury 25°C została przekroczona co najmniej w 90% dni w każdym z miesięcy letnich. Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku kilku innych punktów pomiarowych. W punkcie pomiarowym 2 wartość temperatury 30°C została przekroczona co najmniej w 80% dni w każdym z miesięcy letnich. Podobna sytuacja miała miejsce również w przypadku kilku innych punktów pomiarowych. Natomiast dni z wartością temperatury 50°C i wyższą stanowiły 27% w czerwcu, 58% w lipcu i 48% w sierpniu (punkt pomiarowy 2). W punkcie pomiarowym 2, dni z wartością temperatury 60°C i wyższą stanowiły 10% w lipcu i 19% w sierpniu. Jest to praktycznie jedyne miejsce, gdzie tak często występowała tak wysoka wartość temperatury.

Dla obszaru badań wykonano przestrzenny rozkład wartości temperatury powietrza w przypadku najwyższej wartości zmierzonej temperatury, która miała miejsce 16.07.2023 r. o godz. 12:30. Rozkład ten został wykonany w programie QGIS, na podstawie wartości temperatury zanotowanych w 12 punktach pomiarowych. Na badanym obszarze wyznaczono trzy strefy wartości temperatury: do 30°C (obszar w kolorze różowym), pomiędzy 30 – 35°C (obszar w kolorze czerwonym) i powyżej 35°C (obszar w kolorze czarnym). Najwyższe wartości temperatury znajdują się na obszarach najbardziej narażonych na działanie promieni słonecznych i nieosłoniętych.

Na podstawie analiz rozkładu maksymalnej wartości temperatury zaobserwowano zależność pomiędzy dużymi wartościami temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych a punktem referencyjnym. Zależność ta posłużyła do określenia relacji pomiędzy maksymalną wartością temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych a wartością temperatury odnotowanej w punkcie referencyjnym (nr 17). Na podsta-

For the study area, a spatial distribution of air temperature values was made for the highest measured temperature value, which occurred on 16.07.2023 at 12:30. This distribution was made in QGIS, based on the temperature values recorded at the 12 measurement points. Three zones of temperature values were delimited in the study area: up to 30°C (area in pink), between 30 and 35°C (area in red) and above 35°C (area in black). The highest temperature values are in areas most exposed to solar radiation and without cover.

On the basis of analyses of the distribution of maximum temperature values, a correlation was observed between high in the urban interior. They made it possible to plot a distribution of temperature values in the study area located on the main campus of the Cracow University of Technology. This research demonstrated that:

- the highest temperature values in the period of conducting the analyses and personal observations occurred on the east–west line. Measurement point 2 (east-facing sensor) usually recorded the highest temperature (Figure 6). These results were influenced both by the location of the building that encloses the interior under study and the existing architectural and urban conditions, including the scale of the building (five storeys), a lack of tall greenery elements, an open space of an access road to the building and the proximity of a pavement's paved surface;

- a mobile sensor measuring the temperature on the north side on the same building registered much lower temperature values, which may have been affected by the proximity of tall trees and shade resulting from the positioning of buildings. The maximum difference in temperature values in these locations was as much as 40°C, and the average difference in temperature values over the entire study period was approximately 28°C;

- there is a wide variability in the distribution of temperature values in the area under analysis, which may be due to the way the area is developed – the type of surface, the type of construction materials used, the proximity of neighbouring buildings and greenery, especially tall greenery. It should be noted that tall greenery located in the immediate vicinity of buildings that enclose the urban interior under study have a considerable influence on lowering the temperature values in buildings.

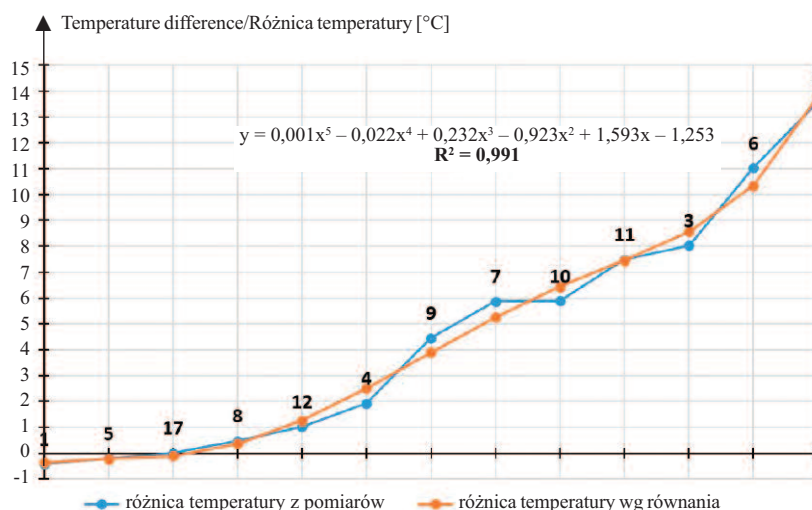


Fig. 7. Distribution of maximum temperature values to determine average maximum temperatures for specific locations (figure 1) based on temperature measurements at a meteorological station

Rys. 7. Rozkład maksymalnej wartości temperatury służącej do określenia średniej temperatury maksymalnej w celu określonych lokalizacji (rysunek 1) na podstawie pomiaru temperatury w punkcie referencyjnym (nr 17)

wie różnic średnich dotyczących maksymalnej wartości temperatury wyznaczono model zależności (rysunek 7), w którym dla zmierzonych w punkcie referencyjnym wartości temperatury można wyznaczyć wartość temperatury w punktach, gdzie usytuowane były mobilne czujniki pomiaru. Jest to możliwe dzięki temu, że pomiary i rejestracja parametrów meteorologicznych w punkcie referencyjnym (nr 17) odbywa się w sposób ciągły.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na sprawdzenie metod badawczych wykorzystujących mobilne urządzenia pomiarowe we wnętrzu urbanistycznym. Umożliwiły one sporządzenie rozkładu wartości temperatury na obszarze badań zlokalizowanym na terenie głównego kampusu Politechniki Krakowskiej. Badania wykazały, że:

- najwyższe wartości temperatury w okresie prowadzonych analiz i obserwacji własnych występują na linii wschód–zachód. W punkcie pomiarowym nr 2 (czujnik skierowany na wschód) najczęściej odnotowano najwyższą temperaturę (rysunek 6). Na wyniki te wpływ miała zarówno sama lokalizacja obiektu zamykającego rozpatrywane wnętrze, jak i zastane warunki architektoniczno-urbanistyczne, w tym skala obiektu (5 kondygnacji), brak wysokich elementów zieleni, otwarta przestrzeń stanowiąca drogę dojazdową do budynku oraz bliskość utwardzonej powierzchni w formie chodnika;

- mobilny czujnik pomiaru wartości temperatury umieszczony od strony północnej, na tym samym obiekcie wskazywał dużo niższe wartości temperatury, na co wpływ mogło mieć sąsiedztwo wysokich drzew oraz cień wynikający z usytuowania budynków. Maksymalna różnica wartości temperatury w tych lokalizacjach wyniosła aż 40°C, a średnia różnica wartości temperatury w ciągu całego okresu badań – ok. 28°C;

- na terenie objętym analizami występuje duża zmienność rozkładu wartości temperatury, co może wynikać ze sposobu zagospodarowania terenu – rodzaju podłoża, rodzaju użytych materiałów budowlanych, bliskości obiektów sąsiadujących oraz zieleni, zwłaszcza wysokiej. Należy zaznaczyć, że znaczny wpływ na obniżenie wartości temperatury w budynkach miała wysoka zieleń znajdująca się w najbliższym otoczeniu obiektów stanowiących zamknięcie badanego wnętrza urbanistycznego.

The influence of green areas on the distribution of temperature values will be analysed in detail in the next stage of research work. In addition to the influence of greenery on the change in temperature values in the urban interior, the influence of tree stand type on the height of temperature values will also be analysed.

It is worth noting that there are buildings on the campus of the Cracow University of Technology that have a historical character. These are usually buildings with thick walls, made of materials that are resistant to high and low temperatures. Although the walls of the buildings are approx. 1.5 m thick, such a long period of intensive heating means that the temperature values reached in the interiors can be too high and require additional cooling.

In addition to historic buildings, the CUT campus features buildings made of modern materials, including glass, concrete and steel, which are resistant to thermal and meteorological influences.

The presented findings, apart from their scientific value – demonstrating the impact of architectural and urban conditions on the microclimate of the surroundings, also have an applicative character. They can be used in practice when carrying out design and construction work related to the development of urban spaces with specific climatic conditions.

Received: 18.10.2024
Revised: 27.11.2024
Published: 20.12.2024

Wpływ obszarów zielonych na rozkład wartości temperatury będzie dokładnie analizowany w kolejnym etapie prac badawczych. Oprócz wpływu zieleni na zmianę wartości temperatury we wnętrzu urbanistycznym analizie poddany zostanie także wpływ rodzaju drzewostanu na wysokość wartości temperatury.

Warto podkreślić, że na terenie kampusu Politechniki Krakowskiej znajdują się budynki, które mają charakter historyczny. Są to zazwyczaj obiekty o grubych murach, wykonane z materiałów odpornych na działanie wysokiej i niskiej temperatury. Mimo że grubość murów budynków wynosi ok. 1,5 m, to tak długi okres intensywnego nagrzewania powoduje, że osiągnięte wartości temperatury w ich wnętrzach mogą być zbyt wysokie i wymagają dodatkowego chłodzenia.

Poza obiektami zabytkowymi na kampusie PK wyróżnić można budynki wykonane z nowoczesnych materiałów, w tym ze szkła, betonu i stali, odpornych na wpływ czynników termicznych i meteorologicznych.

Przedstawione wyniki badań, poza wartością naukową – wykazanie wpływu warunków architektoniczno-urbanistycznych na mikroklimat otoczenia, mają także charakter aplikacyjny. Mogą być wykorzystane w praktyce, w przypadku prowadzenia prac projektowych i wykonawczych związanych z zagospodarowaniem przestrzeni miejskich o określonych warunkach klimatycznych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.10.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 27.11.2024 r.
Opublikowano: 20.12.2024 r.

Literature

[1] Twardosz R, Walanus A, Guzik I. Warming in Europe: Recent Trends in Annual and Seasonal temperatures. *Pure Appl. Geophys.* 2021; doi.org/10.1007/s00024-021-02860-6.

[2] Koźmiński C, Michalska B, Czarnecka M. Klimat województwa zachodnio-pomorskiego. AR Szczecin, US Szczecin. 2007. ss. 147.

[3] Miętus M. Zmienność temperatury i opadów w rejonie polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego i jej spodziewany przebieg do roku 2030. IMGW, Warszawa. 1996.

[4] Matuszko D, Piotrowicz K. Cechy klimatu miasta a klimat Krakowa, [w:] P. Trzepacz, J. Więclaw-Michniewska, A. Brzosko-Sermak, A. Kołoś (red.), Miasto w badaniach geografów, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Kraków. 2015. 1, 221 – 241.

[5] Matuszko A, Mikołajczyk D, Matuszko D. Zmiany klimatu Krakowa i adaptacja do nich w kontekście uwarunkowań planistycznych. *Prace Geograficzne zeszyt 170.* 2023; doi.org/10.4467/20833113PG.23.005.17493.

[6] Piotrowicz K, Bielec-Bąkowska Z, Krzyworzeka K. Groźne zjawiska meteorologiczne w Krakowie i powiecie krakowskim w świetle interwencji straży pożarnej i policji. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ. Kraków. 2020.

[7] Matuszko A, Matuszko D. EKOMIASTO – przykład Krakowa. *Urban Development Issues.* 2020. DOI: 10.2478/udi-2020-0028.

[8] Vallati A, Fiorini CV, Grignaffini S, Ocloń P, Di Matteo M, Kobylarczyk J. Energy retrofit optimization for social Building in temperate climate zone. *Energy and Buildings.* 2023; doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112771.

[9] Egusquiza A, Lückerrath D, Zorita S, Silvertson S, Garcia G, Servera E, Bonazza A, Garcia I, Kalis A. Paving the way for climate neutral and resilient historic districts. *Open Research Europe.* 2023;doi.org/10.12688/openreseurope.15392.1.

[10] Kowalewski G, Kostecki I, Jezierski W. Ocena komfortu cieplnego w jednorodnym budynku mieszkalnym po jego termomodernizacji. *Civil and Environmental Engineering* 8. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2017.

[11] Galai OM, Mahmoud H, Sailor D. Impact of evolving building morphology on microclimate in a hot arid climate. *Sustainable Cities and Society.* 2020; doi.org/10.1016/j.scs.2019.102011/.

[12] Lai D, Liu W, Gan T, Liu K, Chen Q. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of The Total Environment.* 2019; doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062/.

[13] Kobylarczyk J, Kuśnierz-Krupa D, Nowak-Ocloń M. Impact of paving surface material on thermal conditions within a residential building. *Archives of Thermodynamics.* 2023. Vol. 44, No. 4. 141 – 155. 10.24425/ather.2023.149709.

[14] Carvalho D, Martins H, Marta-Almeida M, Rocha M, Borrego C. Urban resilience to future urban heat waves under a climate change scenario: A case study for Porto urban area (Portugal). *Urban Climate.* 2017; https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.005.

[15] Piotrowicz K. Temperatura powietrza. [w:] Klimat Krakowa w XX wieku. Matuszko D. (red.). Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego. 2007. 99 – 112.

[16] Bajšanski IV, Milošević DD, Savić SM. Evaluation and improvement of outdoor thermal comfort in urban areas on extreme temperature days: Applications of automatic algorithms. *Building and Environment.* 2015. Volume 94, Part 2, doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.019

[17] qgis.org (dostępność 2024-07-30).

[18] Niedźwiedz T (red.). Słownik meteorologiczny. Polskie Towarzystwo Geofizyczne. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. 2003. s. 332.

[19] Kotak, Yash & Gul, Mehreen & Muneer, T. & Ivanova, Stoyanka. Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems. Conference: CIBSE Technical Symposium London. 2015.

[20] Liu Y, Chu C, Zhang R, Chen S, Xu C, Zhao D, Meng C, Ju M, Cao Z. Impacts of high-albedo urban surfaces on outdoor thermal environment across morphological contexts: A case of Tianjin, China, *Sustainable Cities and Society.* 2024. Volume 100. 1.

[21] Rhee J, Park S, & Lu Z. Relationship between land cover patterns and surface temperature in urban areas. *GIScience & Remote Sensing.* 2014; https://doi.org/10.1080/15481603.2014.964455