

„Opracowanie metodyki wyznaczania średniej temperatury promieniowania (Mrt) za pomocą pomiarów instrumentalnych w środowisku miejskim.”

*Raport z realizacji działania naukowego o nr 2021/05/X/ST10/00738
finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.*

dr Katarzyna Lindner-Cendrowska – ORCID: 0000-0002-8322-4653

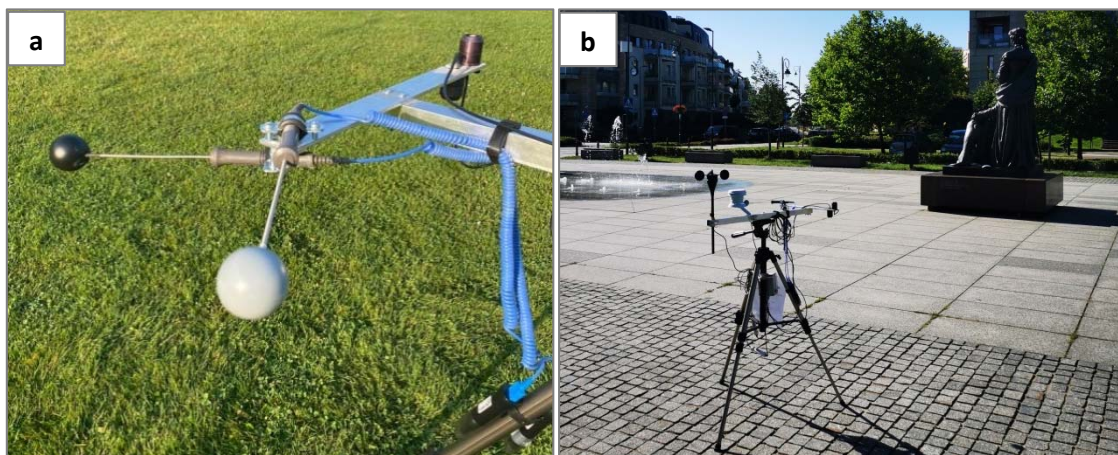
Institut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN

1. Wprowadzenie i opis celu projektu

W badaniach komfortu cieplnego jako miarę termicznego wymiaru pola promieniowania wokół człowieka najczęściej wykorzystuje się koncepcję średniej temperatury promieniowania (Mrt – Mean radiant temperature), która traktuje łącznie wszystkie strumienie promieniowania długo- i krótkofalowego, na które narażone jest ludzkie ciało, a efekt ich oddziaływania wyraża w stopniach Celsjusza (Fanger, 1970). Normy ISO7726 (1998) i VDI3787 (2008) określają w jaki sposób wartość tę można wyznaczyć instrumentalnie. Za najdokładniejszą i najbardziej wiarygodną metodę uznaje się zaproponowany przez Höppego (1992) zintegrowany sposób pomiaru Mrt za pomocą trzech bilansomierzy promieniowania skierowanych w 6 kierunkach. Jednakże metoda ta wymaga zastosowania bardzo kosztownego, mało poręcznego i trudnego w transporcie sprzętu pomiarowego, co ogranicza jej praktyczne wykorzystanie w trakcie wielopunktowych pomiarów terenowych (Du et al., 2021; Liu et al., 2022; Tang & Li, 2022). Mrt można również wyznaczyć na podstawie temperatury termometru kulistego, który odzwierciedla konwekcyjną i radiacyjną wymianę ciepła wokół ciała człowieka. Jednakże standardowy, miedziany termometr kulisty o średnicy 15 cm, zaprojektowany pierwotnie do badań w pomieszczeniach, w środowisku zewnętrznym generuje błędy, wynikające ze zbyt wolnego czasu reakcji na dynamicznie zmieniające się warunki pogodowe (Johansson et al., 2014). Stąd też coraz powszechniejsze na świecie jest wykorzystywanie aparatury niestandardowej – niskokosztowych, akrylowych termometrów kulistych (AGT) (d’Ambrosio Alfano et al., 2021; Liu et al., 2022). Celem projektu było wytworzenie akrylowych termometrów kulistych oraz dopracowanie metodyki wyznaczania Mrt z ich wykorzystaniem w środowisku miejskim, jak również zweryfikowanie ich aplikacyjności w badaniach komfortu termicznego w warunkach typowych dla klimatu Polski.

2. Opis realizacji działania naukowego

Pierwszym etapem projektu było skonstruowanie akrylowych termometrów kulistych, zbudowanych z piłeczek pingpongowych o średnicy 4 cm i grubości ścianki 0,4 mm, pomalowanych na kolor czarny i szary - RAL7001, z umieszczoną wewnątrz stalową sondą termoparową typu-T, podłączoną do rejestratora OM-EL-USB-TC (Ryc. 1a). Wszystkie czujniki AGT poddano kontroli jednorodności wskazań w zakresie temperatury powietrza 10-35°C.



Ryc. 1 a) Akrylowe termometry kuliste (AGT) oraz b) przenośna stacja meteorologiczna wykorzystywane w trakcie badań terenowych

Następnie przeprowadzono 2 kampanie pomiarowe na nieobjętych dotychczas badaniami komfortu termicznego rekreacyjnych przestrzeniach publicznych w obrębie nowej zabudowy mieszkaniowej w Warszawie w dzielnicy Wilanów. Pomiarów prowadzono w okresie od 20 lipca do 5 września 2022 (wybrane 5 dni gorących i bezchmurnych oraz 5 dni ciepłych ze zmiennym, umiarkowanym zachmurzeniem). W sumie badaniami objęto 15 punktów zlokalizowanych na obszarze tzw. Miasteczka Wilanów. Punkty pomiarowe dobrano w taki sposób, aby różniły się między sobą stopniem zasłonięcia horyzontu, charakterem podłoża i sposobem urządzenia przestrzeni oraz udziałem powierzchni biologicznie czynnych. Lokalizację punktów, ich ogólną charakterystykę oraz terminy prowadzenia pomiarów przedstawiono w Tabeli 1. Każdego dnia w 3 lokalizacjach mierzono symultanicznie od rana do popołudnia podstawowe parametry meteorologiczne (temperaturę i wilgotność powietrza, prędkość wiatru oraz natężenie promieniowania całkowitego i odbitego), jak również temperaturę czarnego i szarego AGT. Pomiarów wykonywano na poziomie 1.1 m, który odpowiada wysokości geometrycznego środka ciała człowieka. Pomiarów instrumentalnych uzupełniono badaniem kwestionariuszowym percepcji warunków biotermicznych wśród mieszkańców Warszawy.

Tab. 1 Charakterystyka punktów pomiarowych

akronim	nazwa punktu	data	lokalizacja	wysokość n.p.m.	SVF	podłoże	albedo przy maksymalnym Kglob w ciągu dnia
WIL_1	Branickiego18	2022-07-25	52.156102,	87	0.719	trawa	0.30
		2022-09-05	21.072395				
WIL_2	CafeNeroSquare	2022-07-20	52.165090,	86	0.553	płyty marmurowe ciemne	0.13
		2022-09-02	21.069243				
WIL_3	KlimczakaPlatforms	2022-07-28	52.162849,	86	0.518	deski kompozytowe	0.18
		2022-08-18	21.078224				
WIL_4	KlimczakaPlayground	2022-07-28	52.161354,	85	0.952	trawa, blisko wody	0.30
		2022-08-18	21.074577				
WIL_5	OstojaCanal	2022-07-21	52.161423,	86	0.716	trawa, blisko wody	0.31
		2022-08-29	21.066662				
WIL_6	OstojaPark	2022-07-25	52.162886,	85	0.356	trawa	0.32
		2022-09-05	21.067808				

Tab. 1 Charakterystyka punktów pomiarowych (c.d.)

akronim	nazwa punktu	data	lokalizacja	wysokość n.p.m.	SVF	podłoże	albedo przy maksymalnym Kglob w ciągu dnia
WIL_7	PatioRP27	2022-07-20	52.165983, 21.067723	86	0.787	trawa	0.29
		2022-09-02					
WIL_8	PlazaWilanow	2022-07-20	52.165772, 21.082176	85	0.712	piasek	0.27
		2022-09-02					
WIL_9	PokolenPark	2022-07-25	52.163053, 21.063673	86	0.87	piasek	0.24
		2022-09-05					
WIL_10	Royalpatio	2022-07-22	52.163715, 21.083115	86	0.445	deski kompozytowe	0.09
		2022-08-31					
WIL_11	Royalspringboards	2022-07-22	52.162773, 21.083567	85	0.956	trawa	0.37
		2022-08-31					
WIL_12	SOBFountain	2022-07-21	52.160282, 21.071261	86	0.924	płyty marmurowe jasne	0.27
		2022-08-29					
WIL_13	SobieskiFountain	2022-07-28	52.164881, 21.074014	86	0.863	płyty marmurowe jasne	0.23
		2022-08-18					
WIL_14	SP400back	2022-07-21	52.163158, 21.065163	86	0.759	trawa	0.26
		2022-08-29					
WIL_15	SP400front	2022-07-22	52.164279, 21.066725	86	0.902	zrębki drzewne	0.25
		2022-08-31					

Zebrane dane pomiarowe posłużyły następnie do wyznaczenia średniej temperatury promieniowania. Mrt obliczono zgodnie z normą ISO 7726, jak również stosując dostępne wzory korekcyjne dla termometrów kulistych (opracowane przez Thorsson i in. (2007) oraz Vanos i in. (2021).

Zgodnie z ISO7726 Mrt oblicza się na podstawie jednoczesnych pomiarów temperatury powietrza (t), prędkości wiatru (v) i temperatury termometru kulistego (tg) oraz znając współczynnik zdolności emisyjnej ($\varepsilon = 0,95$ dla czarnej kuli, $\varepsilon = 0,97$ dla szarej kuli) i średnicę kuli (D) według wzoru:

$$Mrt = \sqrt[4]{(tg + 273,15)^4 + \frac{hc}{\varepsilon \cdot \sigma} \cdot (tg - t) - 273,15} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

gdzie:

tg – temperatura termometru kulistego [$^{\circ}\text{C}$]

t – temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$]

hc – konwekcyjny współczynnik przenikania ciepła [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

ε – zdolność emisyjna termometru kulistego

σ – stała Stefana-Boltzmana [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]

Głównym problemem generującym rozbieżności wyników obliczeń Mrt w różnych badaniach jest sposób parametryzacji konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła (hc). Zgodnie z normą ISO 7726 (1998) w warunkach klimatu umiarkowanego sugeruje się stosowanie wyznaczonych empirycznie współczynników hc dla swobodnej i wymuszonej konwekcji, przyjmując do obliczeń większą wartość jednego spośród nich. Stosowanie tych wzorów jest uprawnione jedynie w zakresie temperatury powietrza 0-40 $^{\circ}\text{C}$ oraz przy liczbie Reynoldsa 10²-10⁵ (Wang & Li, 2015):

- dla wymuszonej konwekcji: $h_c = 6,3 \cdot \left(\frac{v^{0,6}}{D^{0,4}}\right)$
- dla swobodnej konwekcji: $h_c = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta t}{D}\right)^{0,25}$.

Modyfikacja Thorsson uwzględnia zmianę wartości konwekcyjnego współczynnika przenikania ciepła (h_c), na wyznaczoną eksperymentalnie korelację dla warunków klimatycznych strefy umiarkowanej, gdzie skorygowany wzór na Mrt przyjmuje postać:

$$Mrt_{thorsson} = \sqrt[4]{(tg + 273,15)^4 + \frac{1,335 \cdot 10^8 \cdot v^{0,71}}{\varepsilon \cdot D^{0,4}} \cdot (tg - t) - 273,15} \quad [^{\circ}C]$$

Metoda Vanos wykorzystuje odmienne konwekcyjne współczynniki przenikania ciepła, jak również neguje równość temperatury wnętrza termometru kulistego (tg) i średniej temperatury powierzchni przyrządu (ts), proponując jednocześnie odpowiednie wzory korekcyjne. W przypadku konwekcji wymuszonej zastosowano współczynnik h_c autorstwa Whitakera (Bergman et al., 2006), definiując wartości cech fizycznych powietrza (liczbę Reynolds'a, liczbę Prandtl'a, rozszerzalność cieplną i dyfuzyjność termiczną powietrza) dla średniej t i tg :

$$h_c = \frac{k_{air}}{D} \cdot \left(2 + \left(0,4 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re^{\frac{2}{3}}\right) \cdot Pr^{0,4}\right)$$

gdzie:

k_{air} – przewodność cieplna powietrza [średnia $k_{air} = 0,02632 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}C$]

D – średnica kuli [$D = 0,04 \text{ m}$]

Re – liczba Reynolds'a [$Re = \frac{v \cdot D}{\nu_{air}}$; średnia lepkość kinetyczna $\nu_{air} = 1,561 \cdot 10^{-5}$]

Pr – liczba Prandtl'a [równa dla analizowanych danych 0,7]

W warunkach konwekcji swobodnej, na potrzeby zastosowania poprawki Vanos, Mrt obliczono wykorzystując współczynnik h_c Churchilla dla sfer (Teitelbaum et al., 2020):

$$h_c = \frac{k_{air}}{D} \cdot \left(2 + \frac{0,589 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + (0,469/Pr)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}\right)$$

gdzie:

Ra – liczba Rayleigh'a [$Ra = \frac{g \cdot \beta}{\nu_{air} \cdot \alpha} \cdot (t - tg) \cdot D^3$;

g – przyspieszenie ziemskie $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

β – rozszerzalność cieplna powietrza $\beta = 0,003332 \text{ 1/}^{\circ}C$

α – dyfuzyjność termiczna powietrza $\alpha = 2,217 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$]

Do oceny charakteru konwekcyjnej wymiany ciepła zastosowano kryterium liczby Richardsona Ri , przyjmując, że dla $Ri < 0,1$ dominuje konwekcja wymuszona (Teitelbaum et al., 2022). Następnie dla szarego termometru kulistego zmodyfikowaną wartość Mrt obliczono według poprawki Vanos zgodnie ze wzorem:

$$Mrt_{vanos} = \sqrt[4]{(1,6 \cdot tg - 0,339 \cdot t + 264,46)^4 + \frac{h_c}{0,97 \cdot \sigma} \cdot (1,6 \cdot tg - 1,339 \cdot t - 8,69) - 273,15} \quad [^{\circ}C]$$

3. Zbiór danych - Mrt wyznaczone za pomocą termometrów kulistych

Załącznik do niniejszego raportu stanowi zbiór danych pomiarowych oraz obliczonych na ich podstawie wartości Mrt, pozyskanych w trakcie realizacji projektu. Charakterystykę uwzględnionych w nim parametrów zawarto w Tabeli 2. Dane zapisano jako arkusz kalkulacyjny w formacie xlsx. Niniejsza baza danych objęta jest embargiem do 30.06.2024 roku – do tego czasu udostępniono pierwsze 50 z 2543 rekordów.

Tab. 2 Zmierzone i obliczone parametry

Parametr	Skrót	Jednostka	Metoda	Uwagi
Punkt pomiarowy	punkt		akronim	Charakterystyka punktów w Tab. 1
Data/Godzina	Date/Time		yyyy-MM-dd HH:mm	
Całkowite promieniowanie słoneczne, 5-min średnia	Kglob	W/m ²	pyranometr S-LIB-M003	1.1 m n.p.g.
Albedo	albedo			Stosunek odbitego promieniowania słonecznego od podłoża do całkowitego promieniowania słonecznego
Temperatura powietrza, 5-min średnia	t	°C	Sensor temperatury/wilgotności względnej S-THC-M002	1.1 m n.p.g.
Wilgotność względna powietrza, 5-min średnia	RH	%		
Prędkość wiatru, 5-min średnia	v	m/s	anemometr S-WSB-M003	
Temperatura czarnego termometru kulistego, 5-min średnia	tg black	°C	termometr kulisty akrylowy, średnica 40 mm, konstrukcja własna, czarny	
Temperatura szarego termometru kulistego, 5-min średnia	tg grey	°C	termometr kulisty akrylowy, średnica 40 mm, konstrukcja własna, szary RAL7001	
Średnia temperatura promieniowania, wg ISO, czarna kula, 5-min średnia	Mrt ISO black	°C	ISO 7726	
Średnia temperatura promieniowania, wg ISO, szara kula, 5-min średnia	Mrt ISO grey	°C		
Średnia temperatura promieniowania, wg Whitaker&Churchill, szara kula, 5-min średnia	MRT W&C grey	°C	dla konwekcji wymuszonej: korelacja Whitakera dla konwekcji swobodnej: korelacja Churchilla (Bergman et al. 2006)	
Średnia temperatura promieniowania, wg Thorsson, szara kula, 5-min średnia	MRT T grey	°C	Thorsson et al. 2007	
Średnia temperatura promieniowania, wg Vanos, szara kula, 5-min średnia	MRT V grey	°C	Vanos et al. 2021	

4. Wstępne wyniki i wnioski

Akrylowe termometry kuliste, choć stanowią relatywnie tanią i nieskomplikowaną metodę służącą wyznaczaniu średniej temperatury promieniowania, są przyrządami mało precyzyjnymi, charakteryzującymi się dużą chwiejnością wyników. Na ich wskazania silny wpływ ma dopływ promieniowania krótkofalowego oraz prędkość wiatru. W warunkach silnego usłonecznienia w skrajnych przypadkach wartości Mrt oszacowanej za pomocą standardowego 15-centymetrowego termometru kulistego (SGT) są wyższe o ponad 20°C od Mrt zmierzonej szarym 4-centymetrowym termometrem kulistym (AGT). Jednocześnie przy niskiej prędkości wiatru (w zakresie od 0 do 2,5 m/s) wraz ze wzrostem intensywności przepływu powietrza, rośnie też wartość Mrt. Co więcej, przy słabym wietrze zastosowanie anemometru czasowego może prowadzić do niedoszacowania wartości Mrt oraz obliczanych na tej podstawie wskaźników biometeorologicznych, z uwagi na wysoki minimalny próg rejestracji tego przyrządu.

Przetestowano w praktyce, iż termometry kuliste są zadowalającym przyrządem do wyznaczania średniej temperatury promieniowania przy ocenie ogólnych trendów czy przebiegów dobowych wskaźników biometeorologicznych. Błąd oszacowania UTCI w efekcie niepewności wyznaczonych wartości Mrt za pomocą różnych termometrów kulistych, w warunkach radiacyjnych odpowiada jednej kategorii stresu termicznego, natomiast w cieniu jest zaniedbywalny. Jednak na potrzeby działań operacyjnych lub precyzyjnego określenia zakresu stresu cieplnego dokładność czujników AGT jest niedostateczna, a ich wykorzystanie może prowadzić do błędnych wniosków. Zastosowanie różnych poprawek (Thorsson et al., 2007; Vanos et al., 2021) do wskazań termometru kulistego, wyprowadzonych empirycznie na podstawie porównań z metodą referencyjną, nie prowadzi do uzyskania zbliżonych wartości Mrt. Im niższa jest temperatura termometru kulistego, tym większe są rozbieżności Mrt w zależności od przyjętej poprawki. Co więcej, zastosowanie wspomnianych poprawek, mających w założeniu zbliżyć zmierzone wartości Mrt do wartości referencyjnych, nie niweluje różnic wynikających z zastosowania termometrów kulistych o różnych wielkościach czasz i w różnych kolorach. Wyniki przeprowadzonych analiz dowodzą, że istniejące w literaturze poprawki nie są uniwersalne i w przypadku pomiarów termometrami kulistymi konieczne jest każdorazowe skalibrowanie przyrządów do danych warunków środowiskowych w odniesieniu do 6-kierunkowego pomiaru bilansomierzami promieniowania.

5. Spis literatury

- Bergman, T. L., DeWitt, D. P., Incropera, F. P., & Lavine, A. S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- d'Ambrosio Alfano, F. R., Dell'isola, M., Ficco, G., Palella, B. I., & Riccio, G. (2021). On the measurement of the mean radiant temperature by means of globes: An experimental investigation under black enclosure conditions. *Building and Environment*, 193(February), 107655. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107655>
- Du, J., Sun, C., Liu, L., Chen, X., & Liu, J. (2021). Comparison and modification of measurement and simulation techniques for estimating Tmrt in summer and winter in a severely cold region. *Building and Environment*, 199, 107918. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107918>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.
- Höppe, P. (1992). A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors. *Wetter Und Leben*, 44(1-3), 147 – 151. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0242446530&partnerID=40&md5=b55012ab6e9e3785a0fc2b00fef38a4>
- International Organization for Standardization. (1998). *ISO 7726: Ergonomics of the Thermal Environment - Instruments for Measuring Physical Quantities*.
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., & Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor

thermal comfort studies - The need for standardization. *Urban Climate*, 10, 346–366.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>

- Liu, K., You, W., Chen, X., & Liu, W. (2022). Study on the Influence of Globe Thermometer Method on the Accuracy of Calculating Outdoor Mean Radiant Temperature and Thermal Comfort. *Atmosphere*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/atmos13050809>
- Tang, P., & Li, Q. (2022). Evaluation of the observation methods of outdoor mean radiant temperature in a subtropical city. *Building and Environment*, 207(PB), 108462.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108462>
- Teitelbaum, E., Alsaad, H., Aviv, D., Kim, A., Voelker, C., Meggers, F., & Pantelic, J. (2022). Addressing a systematic error correcting for free and mixed convection when measuring mean radiant temperature with globe thermometers. *Scientific Reports*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10172-5>
- Teitelbaum, E., Chen, K. W., Meggers, F., Guo, H., Houchois, N., Pantelic, J., & Rysanek, A. (2020). Globe thermometer free convection error potentials. *Scientific Reports*, 10(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59441-1>
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, 1983–1993.
<https://doi.org/10.1002/joc.1537>
- Vanos, J. K., Rykaczewski, K., Middel, A., Vecellio, D. J., Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (2021). Improved methods for estimating mean radiant temperature in hot and sunny outdoor settings. *International Journal of Biometeorology*, 65(6), 967–983. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02131-y>
- Verein Deutscher Ingenieure. (2008). *VDI 3787 - Part 2: Environmental meteorology Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level Part I: Climate*.
- Wang, S., & Li, Y. (2015). Suitability of acrylic and copper globe thermometers for diurnal outdoor settings. *Building and Environment*, 89, 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.002>