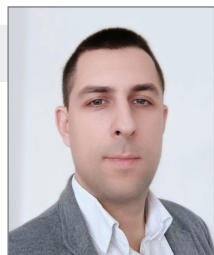




Zmiany stężenia zanieczyszczeń pyłowych w budynku użyteczności publicznej z wentylacją mechaniczną

Changes in the concentration of particulate matter pollution in a public building with mechanical ventilation



Dr inż. Maciej Dobrzański

ORCID ID: [0000-0002-7112-0857](https://orcid.org/0000-0002-7112-0857)

Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Łódzka
maciej.dobrzański@p.lodz.pl

Słowa kluczowe: jakość powietrza wewnętrznego, wentylacja mechaniczna, pyły zawieszone, placówka wychowania przedszkolnego

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań jakości powietrza zewnętrznego i wewnętrznego w dwóch salach placówki wychowania przedszkolnego wyposażonego w wentylację mechaniczną nawiewno-wywiewną. Pomiary realizowano w 2023 roku, wykorzystując mobilne czujniki pyłów zawieszonych PM10 i PM2.5 oraz wilgotności i temperatury powietrza, które rozmieszczono wewnątrz oraz na zewnątrz pomieszczeń. Analiza zebranych danych pozwoliła na ocenę stanu powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu wykorzystywanym w celach edukacyjnych w odniesieniu do pomieszczenia nieużytkowanego o zbliżonych parametrach budowlanych. Ponadto określono efektywność ograniczania przedostawania się zewnętrznych zanieczyszczeń pyłowych do wnętrza budynku przez wentylację mechaniczną. Wykazano, że stężenie pyłów w pomieszczeniu użytkowanym było średnio o 49% wyższe niż w pomieszczeniu nieużytkowanym. Średnia efektywność zatrzymywania zanieczyszczeń pyłowych PM10 i PM2.5 przez wentylację mechaniczną wynosiła odpowiednio 52 i 37% względem stężenia na zewnątrz. Stwierdzono nieliczne momenty, w których stężenie wewnątrz pomieszczeń byłoby wyższe niż na zewnątrz co świadczy o sprawnej wymianie powietrza zużytego. Ocena wykazała, że jakość powietrza w pomieszczeniach była dobra lub bardzo dobra, a użytkownicy mogą z nich korzystać bezpiecznie. Jednakże wprowadzenie czujników stężenia pyłów zawieszonych sterujących pracą centrali wentylacyjnej mogłoby zniwelować pojawiające się chwilowe zwiększone stężenia pyłów.

Keywords: indoor air quality, mechanical ventilation, particulate matter, preschool education facility

Abstract

This article presents the results of outdoor and indoor air quality tests in two classrooms of a preschool facility equipped with mechanical supply and exhaust ventilation. Measurements were taken in 2023 using mobile PM10 and PM2.5 particulate matter sensors, as well as air humidity and temperature sensors placed indoors and outdoors. Analysis of the collected data allowed for an assessment of indoor air quality in the room used for educational purposes compared to an unused room with similar building parameters. Furthermore, the effectiveness of mechanical ventilation in limiting the ingress of outdoor particulate matter into the building was determined. It was demonstrated that particulate matter concentration in the occupied room was on average 49% higher than in the unoccupied room. The average efficiency of mechanical ventilation in containing PM10 and PM2.5 particulate matter was 52% and 37%, respectively, compared to outdoor concentrations. There were few instances where indoor concentrations were higher than outdoor levels, indicating efficient air exchange. The assessment showed that indoor air quality was good or very good, and users could safely use the rooms. However, the introduction of PM concentration sensors to control the operation of the ventilation unit could mitigate these temporary increases in PM concentrations.

© Polish Association of Sanitary Engineers and Technicians

Wstęp

Problematyka dotycząca wentylacji budynków jest zagadnieniem ciągle rozwijanym i poszerzanym. Dzieje się tak między innymi z powodu dążenia do ograniczenia strat energetycznych wywołanych utratą energii cieplnej wraz z powietrzem usuwanym z budynków [1, 10], ogra-

niczeniem przedostawania się do wnętrza pomieszczeń zanieczyszczeń z powietrza zewnętrznego [2, 4] oraz usprawniania usuwania wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń powstających wewnątrz budynków [6]. Przekłada się to na coraz częstsze stosowanie wentylacji mechanicznej w budynkach niezależnie od ich wielkości i przeznaczenia [13, 14]. Zastosowanie wentylacji mechanicznej pozwala na kontrolowaną wymianę powietrza wewnętrznego

(m.in. zapewnienie odpowiedniej krotności wymiany powietrza), odzysk ciepła (m.in. ograniczenie strat energii cieplnej) oraz zmianę parametrów powietrza nawiewanego (m.in. nawilżanie lub osuszanie, schładzanie lub ogrzewanie, czy redukcja zanieczyszczeń powietrza). Poprawne działanie systemu wentylacji mechanicznej wymaga odpowiedniej eksploatacji. Jednym z podstawowych zadań dla eksploatatora/użytkownika jest wymiana filtrów zgodnie z zalecanym przez ich producenta harmonogramem oraz stosowanie filtrów odpowiedniej klasy, odpowiadającej zdolności zatrzymywania zanieczyszczeń, względem wymaganej czystości powietrza dostarczanego do pomieszczeń [3, 11]. Ponadto zachowania użytkownika nie powinny prowadzić

do zakłócania pracy systemu, na przykład poprzez zasłanianie lub zamykanie anemostatów nawiewnych i wywiewnych lub poprzez otwieranie okien, co prowadzi do zaburzenia bilansu wymiany powietrza, a także przedstawianiu się powietrza zewnętrznego z pominięciem centrali wentylacyjnej [7, 15]. Wszelkie zakłócenia pracy systemu powodujące spadek jego efektywności działania, występują szczególnie często w obiektach publicznych, gdzie trudne jest utrzymanie odpowiedzialnego reżimu eksploatacji.

W niniejszym artykule podjęto analizę wpływu użytkownika na skuteczność redukcji stężenia zanieczyszczeń pyłowych w obiekcie użyteczności publicznej stanowiącego oddział przedszkolny wyposażonego w system wentylacji mechanicznej. Pyły zawieszone stanowią jeden z podstawowych parametrów analizowanych w ramach oceny klasy filtracyjnej filtrów stosowanych w centralach wentylacyjnych [8] oraz w ocenie jakości powietrza zewnętrznego [5]. Zgodnie z dyrektywą Unii Europejskiej 2008/50/EC [5] określone są przede wszystkim pyły PM10 oraz PM2,5, a dokładnie ich stężenie średniodobowe i średnioroczne. Według raportu EEA generowane są przede wszystkim przez czynniki antropogeniczne [9]. W Polsce w 68,73% za źródło PM10 i w 84,85% dla PM2,5 odpowiada sektor mieszkalnictwa, instytucji publicznych i przemysł usługowy [9]. To sprawia że w największym stopniu jesteśmy narażeni na negatywne działanie zanieczyszczeń pyłowych w dużych aglomeracjach miejskich. Dlatego powinno się stosować wszelkie środki i systemy ograniczające przedstawianie się zanieczyszczeń z powietrza zewnętrznego do wewnątrz budynków.

Metody

W ramach wykonanych badań dokonano oceny zmian stężenia pyłów zawieszonych PM10 i PM2,5 wewnątrz budynku użyteczności publicznej (Rys. 1) wyposażonego w system wentylacji mechanicznej. Pomiary jakości powietrza przeprowadzono w sposób ciągły w 2023 roku



Rys. 1. Lokalizacja analizowanego budynku na terenie miasta Łódź (źródło mapy: [17])

Fig. 1. Location of the analyzed building in the city of Lodz (map source: [17])

w dwóch salach łódzkiego oddziału przedszkolnego, z których jedna była wykorzystana przez użytkowników (S1), a druga nie (S2) – stanowiła punkt odniesienia. Obie sale miały zbliżone do siebie wymiary i kubaturę wynoszące odpowiednio dla S1 58,54 m² i 182,64 m³ oraz dla S2 66,64 m² i 207,93 m³. Znajdowały się na 1 kondygnacji, budynku 3 kondygnacyjnego i posiadały wspólny system wentylacji nawiewno-wywiewnej z centralą wentylacyjną na najwyższej kondygnacji. Wydajność nawiewu wynosiła 3x172 m³/h, a wywiewu 3x155m³/h. Pomieszczenia wyposażone były w instalację centralnego ogrzewania podłogowego, w którym źródłem ciepła był węzeł ciepłowniczy.

Pomiary realizowano przy użyciu aparatury pomiarowej firmy

Nettigo [12] zamontowanej na zewnątrz i wewnątrz analizowanych pomieszczeń. Aparatura przy użyciu sensorów laserowych mierzyła stężenie pyłów zawieszonych PM10 i PM2,5 (zakres pomiarowy 0-1000 µg/m³, czułość 10000 cząstek na sekundę, rozdzielczość 0,1 µg/m³) oraz czujników wilgotności, temperatury i ciśnienia powietrza. Aparatura dokonywała automatycznych pomiarów co 10 minut, a dane były magazynowane na serwerze. Następnie wykonano analizę numeryczną danych określając średnie stężenie godzinowe i dobowe z podziałem na dni robocze i nierobocze. Wyniki stężeń średniodobowych wewnątrz pomieszczeń porównano do dopuszczalnych poziomów określonych w dyrektywie Unijnej i zaleceniach WHO dla powietrza zewnętrznego.

Zgodnie z dyrektywą UE [5] i wytycznymi WHO [16] (od roku 2021) dopuszczalne stężenie średnie dobowe pyłów PM10 powinno wynosić nie więcej niż odpowiednio 50 i 45 µg/m³, natomiast średnie dobowe stężenie PM2,5 odpowiednio 25 i 15 µg/m³.

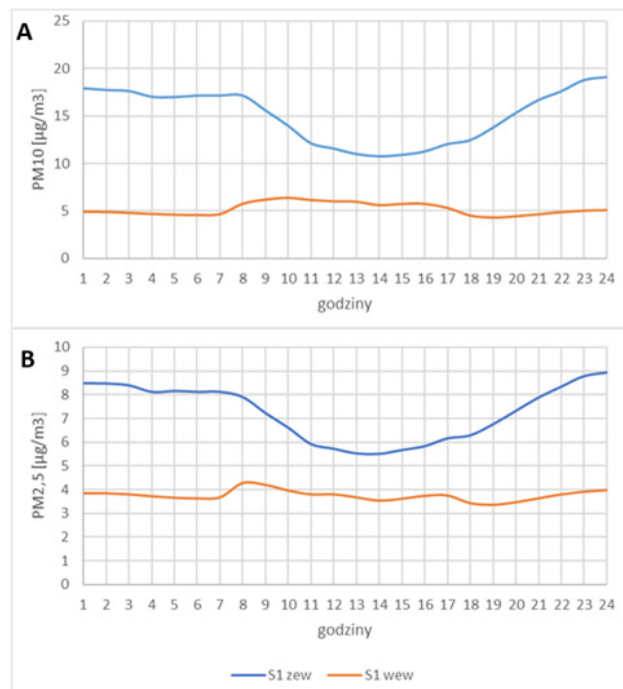
Wyniki

Zebrane dane zostały zagregowane do średnich wartości godzinowych stężenia pyłów zawieszonych PM10 i PM2,5 z podziałem na dni robocze i wolne do pracy z całego okresu badań. Na rys. 2 przedstawiono porównanie zmian stężenia PM10 i PM2,5 na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia użytkowanego S1 w dni robocze.

Rys. 2. Zmiana stężenia średnio godzinowego PM10 (A) i PM2,5 (B) w dni robocze dla użytkowanej sali S1

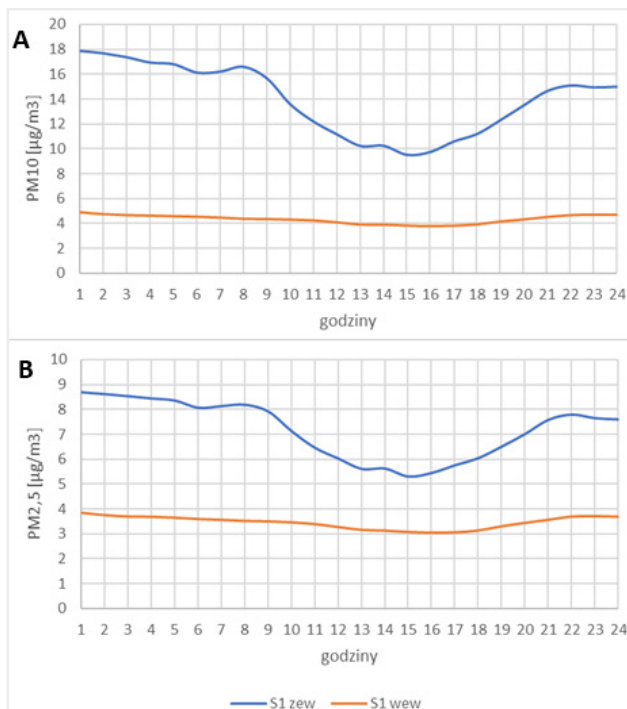
Fig. 2. Change in the average hourly concentration of PM10 (A) and PM2,5 (B) on weekdays for the classroom S1 in use

Zaobserwowano, że od około godziny 8 na zewnątrz stężenie pyłów malało średnio o 35% do godziny 14, a następnie zwiększało się sukcesywnie do godziny 24. Odzwierciedlana to prawdopodobnie cykl przeważającego źródła pyłów zawieszonych jakim są indywidualne źródła ciepła, które użytkowane są szczególnie intensywnie



Rys. 2. Zmiana stężenia średnio godzinowego PM10 (A) i PM2.5 (B) w dni robocze dla użytkowanej sali S1

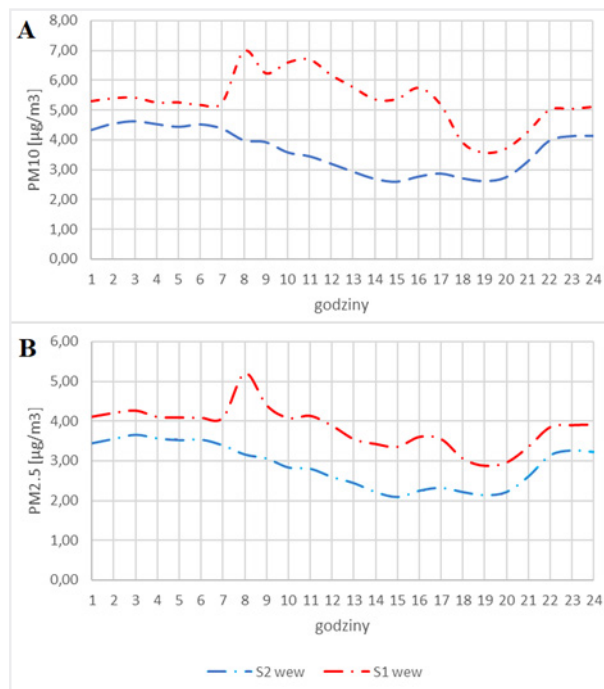
Fig. 2. Change in the average hourly concentration of PM10 (A) and PM2.5 (B) on weekdays for the classroom S1 in use



Rys. 3. Zmiana stężenia średnio godzinowego PM10 (A) i PM2.5 (B) w dni wolne dla użytkowanej sali S1

Fig. 3. Change in average hourly concentrations of PM10 (A) and PM2.5 (B) on days off for classroom S1 in use

w okresie nocnego obniżenia temperatury powietrza zewnętrznego. Ponadto w ciągu dnia występują statystycznie wyższe prędkości wiatru, usprawniające rozpraszanie zanieczyszczeń pyłowych. Natomiast wewnątrz sali S1 zauważalny jest wzrost stężenia zanieczyszczeń pyłowych na przełomie godziny 7 i 8, co koreluje z rozpoczęciem pracy przedszkola dotyczącej opieki nad dziećmi. Szczególnie widoczne było to w odniesieniu do pyłów PM2.5 (Rys. 2B), których stężenie zwiększało się średnio o 18% względem godzin porannych. Następnie na przełomie godziny 17 i 18



Rys. 4. Porównanie zmian stężenia średnio godzinowego PM10 i PM2.5 wewnątrz sali S1 i S2 w dni robocze

Fig. 4. Comparison of changes in the average hourly concentration of PM10 and PM2.5 inside classrooms S1 and S2 on weekdays

następował spadek stężenia PM10 i PM2.5, co wiązało się z opuszczaniem sali przez ostatnich użytkowników.

Pierwszym punktem odniesienia dla opisanych obserwacji (rys. 2) są uśrednione godzinowe wyniki pomiarów w sali S1, w czasie dni wolnych (sobota-niedziela) (rys. 3).

Na rys. 3 widoczne są wyraźne zmiany stężenia pyłów zawieszonych na zewnątrz budynku i były one zbliżone do cyklu zmian obserwowanych na zewnątrz w dni robocze. Oznacza to, że podział na dni robocze i nie robocze nie wpływał na dzienny cykl zmiany stężenia zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu zewnętrznym. Najistotniejszym aspektem z rys. 3 są przedstawione stężenia pyłów zawieszonych wewnątrz sali S2. Dla pyłów PM10 i PM2.5 nie zaobserwowano, żadnych istotnych zmian stężenia w ciągu soboty i niedzieli, odmiennie względem sali S2 w dni robocze. Potwierdza to hipotezę wpływu użytkownika na zmianę stężenia zanieczyszczeń pyłowych.

W celu dokładnego potwierdzenia hipotezy przeprowadzono pomiary w sali S2, która przez okres badań była wyłączona z użytkowania. Na rys. 4 porównano ze sobą wyniki średnio godzinowe stężenia pyłów zawieszonych w dni robocze zmierzone w sali S1 i S2.

W sali S1 występują znaczące zmiany stężenia zanieczyszczeń od godziny 7 do godziny 17, kiedy w tym samym czasie w sali S2 nie występują żadne gwałtowne zmiany (jedyne obserwowane wahania odnoszą się do korelacji z cyklem zmian stężeń na zewnątrz budynku).

W sali użytkowanej S1 stężenie PM10 i PM2.5 było średnio wyższe niż w sali S2 odpowiednio o 76% i 42% między godzinami 7–17. Dowodzi to, że użytkowanie sali powoduje powstawanie pyłów zawieszonych lub ich wtórne unoszenie z posadzki wewnątrz pomieszczenia, które następnie usuwane są poprzez wentylację mechaniczną. Ponadto należy pokreślić zaobserwowane chwilowe zwiększenia stężenia pyłów PM10 i PM2.5 w godzinach

8, 11 i 16 w sali S1. Wiązały się one z zaobserwowanym otwieraniem oknie w celu tak zwanego „wietrzenia sali” przez pracowników placówki, przekładającym się na zakłócenie pracy wentylacji mechanicznej i dostaniem się do środka pomieszczenia zanieczyszczeń pyłowych z zewnątrz. Powoduje to brak możliwości ich zatrzymania na filtrach centrali wentylacyjnej, co jest szczególnie widoczne na rysunku 4B w przypadku nagłego zwiększenia stężenia PM_{2.5} z godziny 7 do 8, a następnie jego obniżenie z godziny 8 do 10. W sali S2 wyłączone z użytkowania nie zaobserwowano takich sytuacji.

Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że użytkownik ma znaczący wpływ na wysokość i zmianę stężeń zanieczyszczeń pyłowych wewnątrz budynku użyteczności publicznej wyposażonego w wentylację mechaniczną. Zwiększenie stężenia pyłów PM₁₀ średnio o 40% i PM_{2.5} o 20% (względem pozostałych godzin), występowało w dni robocze od godziny 7 do godziny 17 i było spowodowane obecnością użytkownika. Jednakże dzięki zastosowaniu wentylacji mechanicznej wewnątrz pomieszczenia S1 stężenie PM₁₀ utrzymywało się na poziomie o 63% oraz dla PM_{2.5} o 47% niższym niż na zewnątrz w dni robocze (średnia z 24 godzin). Proporcje te pogarszały się w czasie użytkowania sali S1, wówczas stężenie PM₁₀ było o 53%, a dla PM_{2.5} o 38% niższe niż na zewnątrz. Odnosząc wyniki do dopuszczalnych poziomów stężenia średniodobowego pyłów zawieszonych (wg. dyrektywy UE i zaleceń WHO) można stwierdzić, że wewnątrz pomieszczenia S1 i S2 nie zostały one przekroczone. Pomijając 1% wyników najwyższych i najniższych, stężenie średniodobowe wewnątrz PM₁₀ mieściło się w zakresie 1,70–18,75 µg/m³, a w przypadku PM_{2.5} w zakresie 1,11–13,36 µg/m³.

Bibliografia

- [1] Amanowicz, Ł., Ratajczak, K., & Dudkiewicz, E. (2023). Recent advancements in ventilation systems used to decrease energy consumption in buildings—literature review. *Energies*, 16(4), 1853. <https://doi.org/10.3390/en16041853>
- [2] Cichowicz, R., & Dobrzański, M. (2021). Indoor and outdoor concentrations of particulate matter and gaseous pollutants on different floors of a university building: a case study. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1). <https://doi.org/10.12911/22998993/128859>
- [3] Dobrzański, M., & Cichowicz, R. (2024). Wpływ rodzaju wentylacji na stężenie pyłów zawieszonych wewnątrz budynków mieszkalnych. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 55. <https://doi.org/10.15199/9.2024.1.3>
- [4] Dobrzański, M., & Szymczakowski, O. (2024). Analiza stężenia pyłów zawieszonych w powietrzu wewnętrznym na podstawie jakości powietrza zewnętrznego w szkolnych obiektach sportowych z wentylacją grawitacyjną. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 55. <https://doi.org/10.15199/9.2024.12.3>
- [5] European Parliament and Council of the European Union. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe (OJ L 152, 11.6.2008, pp. 1–44). Pobrano 2 listopada 2025 z <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>
- [6] Jung, C., & Abdelaziz Mahmoud, N. S. (2023). Ventilation strategies for mitigating indoor air pollutants in high-rise residential buildings: a case study in Dubai. *Atmosphere*, 14(11), 1600. <https://doi.org/10.3390/atmos14111600>
- [7] Mysen, M., Berntsen, S., Nafstad, P., & Schild, P. G. (2005). Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools. *Energy and Buildings*, 37(12), 1234–1240. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.01.003>
- [8] Polski Komitet Normalizacyjny. (2017). PN-EN ISO 16890: Przeciwpółowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej.
- [9] European Environment Agency. (2025). Air quality in Europe: Status report 2025. European Environment Agency. Pobrano 2 listopada 2025 z <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025>
- [10] Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Al Maimuri, N. M., Ameen, A., Agyekum, E. B., Chibani, A., & Kezzar, M. (2025). Mechanical ventilation strategies in buildings: a comprehensive review of climate management, indoor air quality, and energy efficiency. *Buildings*, 15(14), 2579. <https://doi.org/10.3390/buildings15142579>
- [11] Ratajczak, K. (2022). Ventilation strategy for proper IAQ in existing nurseries buildings—lesson learned from the research during COVID-19 pandemic. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(3), 210337. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210337>
- [12] Nettigo. (b.d.). Nettigo Air Monitor 0.3 – sensory pomiarowe. Pobrano 2 listopada 2025 z <https://nettigo.pl/products/nettigo-air-monitor-0-3-zlutowany-kompletny-zlutowany-zestaw-wersja-pro-z-zewnetrzna-antena>
- [13] Shi, Y., & Li, X. (2020). Effect of mechanical ventilation on infiltration rate under stack effect in buildings with multi-layer windows. *Building and Environment*, 170, 106594. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106594>
- [14] Tognon, G., Marigo, M., De Carli, M., & Zarrella, A. (2023). Mechanical, natural and hybrid ventilation systems in different building types: Energy and indoor air quality analysis. *Journal of Building Engineering*, 76, 107060. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107060>
- [15] Torresin, S., Aletta, F., Oberman, T., Albatici, R., & Kang, J. (2024). Factors influencing window opening behavior and mechanical ventilation usage during summertime: A case study in UK dwellings. *Building and Environment*, 263, 111880. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111880>
- [16] World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. Pobrano 2 listopada 2025 z <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [17] Google. (b.d.). Google Maps. Pobrano 2 listopada 2025 z <https://www.google.pl/maps>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.