



Wentylacja miast: od makro- do mikroskali

Urban ventilation: from macro- to microscale

Zuzanna Prokopowicz^{1*} , Maria Kostka¹ 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska

* Kontakt / Correspondence: zuzanna.prokopowicz@pwr.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono analizę zjawisk zachodzących w środowisku miejskim, które w istotny sposób wpływają na warunki naturalnego wentylowania miast i jego zabudowy. Omówiono oddziaływanie zjawisk zachodzących w terenach silnie zurbanizowanych na kształtowanie warunków środowiska wewnętrznego budynków, ze szczególnym uwzględnieniem strumieni powietrza wentylującego w mieszkaniach, jakości powietrza wewnętrznego oraz warunków termicznych. Dyskusja obejmuje także wpływ przewidywanych zmian klimatu na przyszłe warunki klimatyczne w obszarach miejskich.

Słowa kluczowe: wentylacja, wentylacja naturalna, miasto, miejska wyspa ciepła, zmiany klimatu

Abstract:

The article presents an analysis of phenomena occurring in the urban environment that significantly affect the conditions for natural ventilation of cities and their buildings. The impact of phenomena taking place in highly urbanized areas on the formation of indoor environmental conditions in buildings is discussed, with particular emphasis on airflow streams ventilating apartments, indoor air quality, and thermal conditions. The discussion also includes the influence of projected climate change on future climatic conditions in urban areas.

Keywords: ventilation, natural ventilation, city, Urban Heat Island, Climate Change

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach ponad 75% populacji Unii Europejskiej zamieszkuje na terenach miejskich [34]. Przewiduje się, że do roku 2050 wskaźnik zamieszkania ludności w miastach wzrośnie i wyniesie 78% [34]. Od lat kojarzone z synonimami postępu i rozwoju, miasta stały się miejscami koncentracji ludności, intensywnej aktywności i konsumpcji [17]. W konsekwencji, obszary miejskie znacznie powiększyły swój ślad ekologiczny i są coraz częściej kojarzone z degradacją środowiska, dużym ruchem ulicznym i zanieczyszczeniem powietrza. Zjawiska takie jak eksurbanizacja (ang. urban sprawl), czyli niekontrolowany rozrost, a wręcz dosłowne „rozlewanie się” obszarów miejskich na tereny przedmieścia i obszarów wiejskich doprowadziły do sytuacji, w której to miasta są bardziej wrażliwe na rosnące zagrożenia wynikające ze zmian klimatu i wielopłaszczyznowych obciążeń.

Jednym z wyzwań współczesnych miast jest szeroko rozumiana naturalna wentylacja przestrzeni miejskich, obejmująca zarówno przewietrzanie całych obszarów, jak i wszystkich znajdujących się w nich jednostek mieszkaniowych. Najczęstszym czynnikiem

determinującym system wentylacji miasta jest jego naturalna topografia [8]. Rzeki, tereny podmokłe i niskie tereny zielonych tworzą naturalne strefy przewietrzania o niskim oporze aerodynamicznym, tzw. korytarze powietrzne. Za korytarz powietrzny może również służyć rozległa, prosta ulica czy chociażby teren kolejowy [8]. Problem pojawia się, kiedy na skutek rozrostu miasta tereny te zostają zabudowane lub też otoczone przez wysoką, zwartą zabudowę miejską.

Zanikanie korytarzy powietrznych skutkuje ograniczeniem strumieni powietrza przepływające przez miasto, przez co traci ono swój naturalny środek do usuwania i rozpraszania wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń. Niskie wartości strumieni wentylujących miasto prowadzą z kolei do powstawania niekorzystnych zjawisk, z którymi przyszło nam się mierzyć na terenach o wysokim stopniu zabudowy. Mowa między innymi o akumulacji ciepła w tkance miejskiej, którego to nadmiar jest przyczyną wysokich wartości temperatury otoczenia, odnotowywanych zwłaszcza w okresie letnim. Problemem staje się także obniżona jakość powietrza zewnętrznego, które kolejno wykorzystywane jest do wentylacji wnętrza budynków, niezależnie od rodzaju zastosowanego rozwiązania instalacyjnego. W przestrzeni miasta

obserwuje się również zmiany innych parametrów i właściwości powietrza, wzajemne oddziaływanie oraz przenikanie się tych zmian poddano opisowi oraz dyskusji w poniższych częściach artykułu.

2. Miejska wyspa ciepła

Miejską wyspą ciepła (ang. Urban Heat Island – UHI) określa się zjawisko polegające na występowaniu w obszarach zurbanizowanych istotnie wyższych wartości temperatury powietrza w porównaniu z terenami pozamiejskimi i zielonymi. Podwyższone wartości temperatury powietrza obserwuje się zarówno w ciągu dnia, jak i w nocy, kiedy to ciepło zakumulowane w masie budynków i nawierzchni jest stopniowo oddawane do otoczenia [2]. W konsekwencji średnia temperatura powietrza w mieście może utrzymywać się przez cały okres letni na poziomie wyższym o kilka stopni względem obszarów podmiejskich. W upalne dni różnica ta może wzrastać od kilku do maksymalnie nawet 20°C [14]. Efektem jest zwiększona liczba godzin występowania intensywnego dyskomfortu cieplnego, sięgająca w sezonie letnim kilkudziesięciu godzin [14] i mająca tendencję wzrostową [24,29]. Powstawanie miejskich wysp ciepła nie jest jednak ograniczone wyłącznie dla sezonu letniego i obserwowane jest także w zimie. Tutaj jednak jej obecność ma potencjalnie ochronny charakter, łagodząc warunki zewnętrzne w okresach występowania najniższych wartości temperatury zewnętrznej [13].

Charakterystyka lokalna naziemnej wyspy ciepła uzależniona jest od warunków termicznych, uwzględniając specyficzne warunki miejskie: ułożenie budynków, ich orientację, dystrybucję przestrzenną, profil wysokości, ekspozycję na wiatr czy chociażby właściwości samych elementów konstrukcyjnych budynków, w tym ich chropowatość czy przenikalność powietrzną (infiltrację) [25]. To również te czynniki mają wpływ na rozkład prędkości wiatru w przestrzeni zurbanizowanej, modyfikując tym samym potencjał wentylacji naturalnej tych budynków [20]. W obszarze wysokiej zabudowy wahania prędkości wiatru powodują znaczne pionowe różnice wartości temperatury, wpływając na obciążenie cieplne budynku i znajdujących się w nim mieszkań [5].

Coraz częściej zwraca się również uwagę na występowanie podziemnej miejskiej wyspy ciepła (ang. Subsurface Urban Heat Island – SUHI). Jest to zjawisko, podczas którego obserwuje się podwyższoną temperaturę gruntu w mieście, względem terenów niezabudowanych. Potencjalnym mechanizmem, który ma dominujący wpływ na temperaturę gruntu oraz jej zmienność, jest strumień ciepła o kierunku atmosfera → budynki → grunt [32]. Czynniki mającymi bezpośredni wpływ na podziemną wyspę ciepła są czynniki radiacyjne (natężenie promieniowania słonecznego, antropogeniczne zyski ciepła), czynniki konwekcyjne (wentylacja budynków, wody opadowe, ścieki) oraz czynniki wpływające na drodze przewodzenia (podziemne części budynków i infrastruktury, tunele) [16]. Podziemna wyspa ciepła dodatkowo wpływa na nierówny bilans energii w mieście, w szczególności ograniczając nocne schładzanie [3]. Przykładem może być Londyńskie Metro, gdzie temperatura w lecie przekracza w środku 37°C, przewyższając tym samym temperatury występujące na zewnątrz [1]. Zmiany lokalnych wartości temperatury

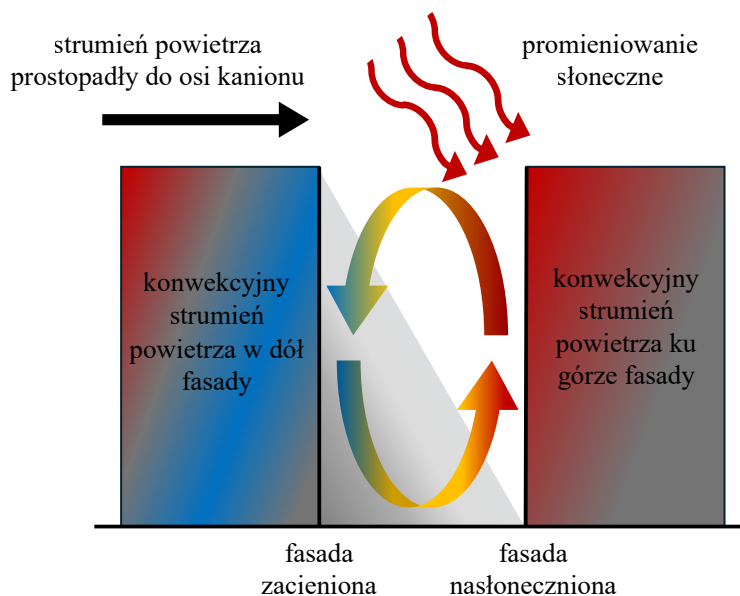
powietrza i gruntu w zabudowie miejskiej są na tyle istotne, że odnotowuje się również podwyższoną temperaturę wód gruntowych. We Wrocławiu jest to wzrost o około 2–4°C w porównaniu do początku pomiarów tych wartości w mieście [6].

3. Wpływ zabudowy miejskiej na lokalne prędkości powietrza

Środowiska miejskie mają istotny wpływ na zmiany rozkładu prędkości wiatru. Charakterystyka tych zmian jest jednak zależna od indywidualnej topografii miast, stąd nie wszystkie opisywane zjawiska znajdą swoje odzwierciedlenie w danym mieście. Gęsta zabudowa może mieć wpływ na zwiększenie intensywności turbulencji w przepływie od rejonów pozamiejskich w stronę centrum. Na wysokości ulic i chodników średnia prędkość wiatru może zostać ograniczona o blisko 40% w gęsto zabudowanych przestrzeniach miejskich [18]. Jednocześnie naukowcy wykazują wzrost prędkości wiatru w nowo zurbanizowanych obszarach, będący skutkiem wzrostu wartości temperatury w tych rejonach [29]. Specyficzną charakterystykę przepływu powietrza obserwuje się również w tzw. kanionach miejskich.

W większości przypadków, przy prędkościach wiatru poniżej 4–5 m/s, przepływy powietrza wewnątrz kanionu nie są spowodowane przepływem wiatru ponad kanionem, a zaczynają dominować inne, termiczne warunki lokalne [5, 21]. Zbliżone krytyczne wartości prędkości wiatru opisują również inni naukowcy. Prędkości wiatru przekraczające wartości 4–4,5 m/s są uznawane za wartości minimalne do skutecznego, istotnego obniżenia stężenia zanieczyszczenia w centrum miasta – w tym przypadku dwutlenku węgla [28, 33]. Prędkość wiatru oraz jego kierunek determinują bowiem również zdolność do transportu oraz rozpraszania zanieczyszczeń przez powietrze [27].

Mniejsza prędkość przepływu powietrza w mieście przekłada się w sposób bezpośredni na wentylację wnętrza budynków, powodując nawet kilkukrotne ograniczenie przepływu powietrza w mieszkaniach [21]. Stosuje się tutaj dodatkowo rozróżnienie na mieszkania wentylowane jednostronnie (posiadające otwory okienne na jedną stronę świata) oraz na mieszkania o krzyżowym przepływie powietrza (posiadające otwory okienne skierowane przeciwległe w dwóch kierunkach). Naukowcy z Aten wykazali, że potencjał wentylacji naturalnej, zarówno w mieszkaniach jednostronnych, jak i krzyżowych, jest istotnie ograniczony. Oszacowali oni, że przepływy powietrza w mieszkaniach z wentylacją naturalną zostają ograniczone o odpowiednio 82% i 68%, w porównaniu do mieszkań w lokalizacjach pozamiejskich [5]. Dodatkowo, autorzy zaobserwowali przepływ wirowy wewnątrz kanionu miejskiego, w warunkach kiedy strumień powietrza jest prostopadły do osi kanionu. Wewnątrz kanionu powietrze przepływa w dół jednej strony fasad budynków [5], potencjalnie strony która nie jest nasłoneczniona (Rys. 1). W takiej sytuacji, pomimo obserwowania ruchu powietrza, jego skuteczność w przewietrzaniu jest ograniczona, ponieważ dopływ świeżego powietrza do strumienia cyrkulującego jest niewystarczający.



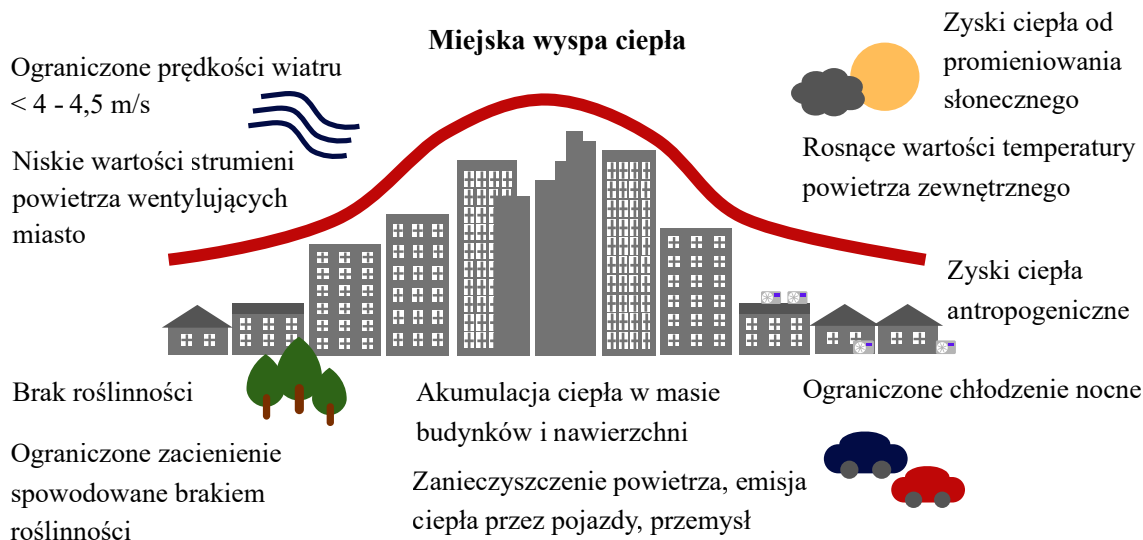
Rys. 1. Potencjalny mechanizm tworzenia się wirówkonwekcyjnych w kanionie miejskim
Fig. 1. Potential mechanism of convective vortex formation in an urban canyon

W konsekwencji występowania miejskiej wyspy ciepła oraz kanionów miejskich, mieszkania znajdujące się w obrębie gęstej zabudowy miejskiej mogą być narażone na ograniczone wentylowanie i zwiększone przegrzewanie w okresie letnim. Podwyższone wartości temperatury powietrza zewnętrznego i zmniejszone strumienie świeżego powietrza ograniczają zdolność mieszkania do rozpraszania nadmiaru ciepła. Ze względu na hałas i zanieczyszczenie powietrza zewnętrznego, środowisko miejskie dodatkowo nie sprzyja otwieraniu okien i wentylowaniu pomieszczeń (Rys. 2). W takich lokalach mieszkalnych w okresie letnim obserwuje się niższą jakość powietrza wewnętrznego, zwiększoną częstotliwość występowania nocy tropikalnych [2], a co za tym idzie zwiększoną liczbę godzin występowania dyskomfortu termicznego [14].

4. Wpływ zmian klimatu na parametry powietrza zewnętrznego

Do przewidywania zmian klimatu w nadchodzących latach stosuje się złożone modele klimatyczne, które w różnych wariantach uwzględniają wartość dodatkowego wymuszenia radiacyjnego, wywołanego gazami cieplarnianymi [9]. Każdy scenariusz (wariant) oparty jest o przewidywaną ścieżkę rozwoju społeczno-ekonomicznego i związane z nią szacowane emisje gazów cieplarnianych. W efekcie zmianie ulega bilans promieniowania w atmosferze i zachodzi intensyfikacja globalnego ocieplenia, co przekłada się na różne ścieżki prognozowanych zmian klimatu.

Zgodnie z prognozami, potencjał chłodniczy wentylacji naturalnej zostaje ograniczony o nawet 40% do roku 2080, przy



Rys. 2. Czynniki kształtujące środowisko miejskie i ich skutki
Fig. 2. Factors shaping the urban environment and their effects

Tabela 1. Badania dotyczące wpływu UHI i zmian klimatu na wartości temperatury zewnętrznej w mieście i zapotrzebowanie na energię chłodniczą**Table 1.** Studies on the impact of the Urban Heat Island (UHI) effect and climate change on outdoor air temperature values in urban areas and cooling energy demand

Cyt.	Zwięzły opis wyników	Scenariusz zmian klimatu	Klimat w skali Köppena	Miasto	Kraj	Rok
[1]	Średnia temperatura zewnętrzna w mieście przy fasadach budynków wyższa o 8°C, w porównaniu do pozamiejskiej stacji meteorologicznej	-	Cfb	Wrocław	Polska	2024
[14]	Maksymalna różnica wartości temperatury pomiędzy centrum miasta a terenami pozamiejskimi równa 19°C	-	Cfb	Bruksela	Belgia	2025
[20]	UHI i zmiany klimatu wpłyną na zwiększone zapotrzebowanie na energię chłodniczą o +76% w Cadiz, +106% w Londynie	AR5, RCP 8.5	Csa; Cfb	Cadiz; Londyn	Hiszpania, Wielka Brytania	2023
[22]	Symulacje dla przyszłych lat wskazują zmiany w zużyciu energii na chłodzenie od -3,26% do 100,24% w zależności od scenariusza	AR5, RCP 2.6 - RCP 8.5	Cfa/Cwa; Cfa; Dwa	Shenzhen, Shanghai, Beijing	Chiny	2025
[5]	Różnica pomiędzy wartością temperatury odnotowaną w kanionie miejskim i poza miastem sięgająca maksymalnie 11°C	-	Csa	Ateny	Grecja	2006
[11]	Stopniodni chłodnicze wzrastają od 20% do 160% w odniesieniu do linii bazowej w 1990 r.	-	Cwa; Cfa; Dfb; Cfb; Cfb	Hong Kong; Sydney; Montreal; Zurich; Londyn	Chiny, Australia, Kanada, Szwajcaria, Wielka Brytania	2023
[26]	Ograniczenie potencjału wentylacji naturalnej o nawet 40% do roku 2080, przy RCP 8.5. Kilkukrotny wzrost liczny godzin dyskomfort cieplnego	AR6, RCP 2.6 - RCP 8.5	Dwa	Harbin	China	2024

uwzględnieniu najniekorzystniejszego scenariusza klimatycznego IPCC AR6 [26]. Jednocześnie wykazuje się wzrost zapotrzebowania na energię do chłodzenia przestrzeni, np. w Shanghai jest to wzrost o ponad 80%, również w przypadku najniekorzystniejszego scenariusza klimatycznego [22]. We Wrocławiu w roku 2080 można spodziewać się wzrostu zapotrzebowania od 35% (wariant optymistyczny) do nawet 100% (wariant pesymistyczny – najbardziej niekorzystny) [10]. Co więcej, zapotrzebowanie na energię chłodniczą przyrasta w miastach szybciej, w porównaniu do terenów pozamiejskich, w konsekwencji opisywanego wcześniej zjawiska miejskiej wyspy ciepła. Stopniodni chłodnicze wzrastają szybciej w mieście, niż na terenach podmiejskich, w zależności od konspektu urbanistycznego miasta [11].

Wpływ zmian klimatu i miejskiej wyspy ciepła na obserwowaną wilgotność względną powietrza jest trudny do uogólnienia, gdyż na świecie obserwowane są skrajnie różne wyniki, w dużej mierze zależne od klimatu danego obszaru. Przykładowo w analizie przeprowadzonej dla miast Shenzhen i Shanghai wykazano, że w przyszłości mogą one odnotowywać nawet 250 dni, podczas których wilgotność względną powietrza w mieście przekroczy 70% [22]. Widoczne jest to także w Salonikach i Atenach – na podstawie analizy danych archiwalnych, określono, że energia potrzebna do chłodzenia i osuszania powietrza wentylacyjnego w ciągu ostatnich dekad stale rośnie [19]. W Atenach całkowity wzrost między pierwszą a ostatnią dekadą wynosi 48,5%, podczas gdy w Salonikach wzrost wynosi około 32% (1983–2012). Zwiększyło się zarówno zapotrzebowanie na energię w postaci ciepła jawnego, jak i utajonego [19]. Wskazane powyżej obszary znajdują się jednak w obszarze dominacji gorącego i wilgotnego klimatu (odpowiednio Cwa i Cfa w skali Köppena dla Shenzhen i Shanghai oraz Csa dla Saloników i Aten) i wartości tych nie da się bezpośrednio przełożyć na miasta Polski (kli-

mat Dfb i Cfb). Podsumowanie badań dotyczących wpływu UHI i zmian klimatu na wartości temperatury zewnętrznej w mieście i zapotrzebowanie na energię chłodniczą, w wyszczególnieniu typu klimatu w skali Köppena, przedstawiono w poniższej tabeli (Tab. 1).

Wiele publikacji wskazuje również na powiązanie zjawiska miejskiej wyspy ciepła z powstawaniem obszarów o obniżonej wilgotności względnej, nazywanej w anglojęzycznej literaturze UDI (ang. Urban Dry Island) [4, 12, 30]. Zjawisko to może nieść ze sobą potencjalnie korzystne konsekwencje, gdyż niższa wilgotność względna obniża temperaturę odczuwalną i może łagodzić stres cieplny człowieka. Zmniejsza również potrzebę osuszania powietrza, co ogranicza zużycie energii w urządzeniach chłodniczych w porównaniu z procesem chłodzenia powietrza o tej samej temperaturze, ale wyższej zawartości wilgoci. Z drugiej strony, nadmiernie obniżona wilgotność względna w okresach fal upałów może jednak nasilać odwodnienie organizmu i podrażniać drogi oddechowe. Pogarsza także warunki życia roślin co skutkuje ograniczeniem tkanki zielonej i dodatkowym potęgowaniem zjawiska wzrostu temperatury otoczenia.

5. Wentylacja budynków mieszkalnych w obszarach miejskich

Opisywane powyżej zjawiska UHI, SUHI, UDI i zmiany klimatu oraz ich skutki dla mikroklimatu miasta w sposób bezpośredni przekładają się na wentylację budynków, w tym często pojawiających się w ścisłej zabudowie miejskiej budynków wielorodzinnych. W budynkach tych dominują aktualnie dwa rozwiązania wentylacyjne: systemy naturalne dominujące w budynkach starszej tkanki miejskiej, oraz systemy oparte o wentylatory wywiewne, montowane w nowopowstających oraz modernizowanych budynkach. Najbardziej spotykanymi rozwiązaniami są pełne sys-

temy mechaniczne, wykorzystujące dodatkowo wymienniki do odzysku ciepła.

Konsekwencje opisywanych zjawisk dotyczą wszystkich budynków, niezależnie od zastosowanego rozwiązania wentylacyjnego, jednak to właśnie w tych w których wymiana powietrza oparta jest na procesach naturalnych, stają się szczególnie dotkliwe. Strumień powietrza w wentylacji naturalnej powiązany jest ściśle z różnicą wartości temperatury wewnętrznej i zewnętrznej oraz z prędkością wiatru oddziałującego na budynek. Obserwowane kierunki zmian tych parametrów powodują, że mieszkania narażone są na niedostateczne wartości strumieni wentylujących, określane za pomocą wskaźnika krotności wymiany powietrza. W rezultacie, przy niskiej krotności wymiany powietrza, następuje kumulacja zanieczyszczeń biologicznych, cząstek zawieszonych PM i lotnych związków organicznych, a także wzrost wilgotności względnej i stężenia dwutlenku węgla. Skutkiem kumulacji zanieczyszczeń może być występowanie tzw. syndromu chorego budynku [7, 23]. Naukowcy podkreślają dodatkowo zwiększone ryzyko tworzenia się pleśni w warunkach wysokiej wilgotności panującej w niedostatecznie wentylowanych pomieszczeniach [31].

W systemach wentylacyjnych wyposażonych w wentylatory, zmiany ilościowe strumienia powietrza stają się mniej istotne, natomiast nadal nie do pominięcia są zmiany jakościowe: wraz ze wzrostem temperatury zewnętrznej do wewnątrz wprowadzana jest nadmiarowa energia cieplna, ograniczona wymiana powietrza w mieście skutkuje niższą jakością powietrza wewnątrz budynków, a tropikalne noce utrudniają usuwanie energii zakułowanej w trakcie gorących dni.

Ponadto, poza potencjalnym ograniczeniem wymiany powietrza w budynkach wentylowanych naturalnie, przegrzewanie się pomieszczeń w okresie ciepłym może skutkować dodatkową wewnętrzną emisją lotnych związków organicznych i innych zanieczyszczeń z wyposażenia i elementów wykończenia (np. meble, farby) [31] niezależnie od zastosowanego rozwiązania wentylacyjnego.

6. Podsumowanie

Zjawisko miejskiej wyspy ciepła obserwowane jest na całym świecie, a jego wpływ na jakość życia w obszarach silnie zurbanizowanych w okresie letnim oceniany jest jako negatywny. Oczekuje się także, że przewidywane zmiany klimatu spotęgują negatywne skutki UHI, dodatkowo obniżając komfort i jakość życia mieszkańców miast latem.

Pogorszenie warunków życia latem w miastach dotyczy nie tylko przestrzeni zewnętrznych, ale przekłada się bezpośrednio na środowisko wewnętrzne budynków, w tym obiektów mieszkalnych. Obserwowane zjawiska wpływają negatywnie na jakość powietrza wewnętrznego i zapotrzebowanie na energię do chłodzenia pomieszczeń, a szczególnie narażone są budynki wentylowane naturalnie.

Pomimo iż Polska nie znajduje się w czołówce krajów najbardziej narażonych na zmiany klimatu [15], także tutaj niezbędne jest prowadzenie badań pozwalających ocenić jak nasilające się zjawiska wpłyną na stale rozbudowujące się środowiska miejskie. Analiza odporności aglomeracji miejskich oraz ich zdolności adaptacyjnych umożliwi opracowanie strategii minimalizu-

jących negatywne skutki UHI i zmian klimatu, co przyczyni się zarówno do poprawy jakości życia mieszkańców, jak i do uzyskania wymiernych korzyści ekonomicznych poprzez zmniejszenie obciążenia systemu opieki zdrowotnej czy infrastruktury energetycznej.

7. Literatura

- [1] Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2004). Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6), 633-645. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.018>
- [2] Baborska-Narożny, M., Kostka, M., & Smektała, M. (2014, November). Informing housing planning policy to minimize the need for active cooling in temperate (Cfb) climate. In *Comfort at the Extremes. Investing in Well-Being in a Challenging Future, international conference, scientific and professional meetings, Seville, Spain*.
- [3] Bidarmaghz, A., Choudhary, R., Soga, K., Terrington, R. L., Kessler, H., & Thorpe, S. (2020). Large-scale urban underground hydro-thermal modelling—A case study of the Royal Borough of Kensington and Chelsea, London. *Science of the total environment*, 700, 134955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134955>
- [4] Cao, J., Li, M., Yang, X., Zhang, R., & Wang, M. (2024). The impact of urban dry island on building energy consumption is overlooked compared to urban heat island in cold climate. *Energy and Buildings*, 320, 114655. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114655>
- [5] Georgaklis, C., & Santamouris, M. (2006). Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and buildings*, 38(4), 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.07.009>
- [6] Hajnrych, M., Blachowski, J., & Worsa-Kozak, M. (2025). Groundwater Urban Heat Island (GUHI) and Climate Warming: Insights from Two Decades of Monitoring in Wrocław, Poland. *Water*, 17(21), 3090. <https://doi.org/10.3390/w17213090>
- [7] Kempton, L., Daly, D., Kokogiannakis, G., & Dewsbury, M. (2022). A rapid review of the impact of increasing airtightness on indoor air quality. *Journal of Building Engineering*, 57, 104798. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104798>
- [8] Klemm, K., Chojna, W., & Bochenek, A. D. (2025). Influence of urban changes on the efficiency of ventilation paths. *Budownictwo i Architektura*, 24(2), 133-156.
- [9] Kostka, M., & Prokopowicz, Z. (2026). Jak zmieniający się klimat wpłynie na nasze domy? Wentylacja w dobie zmian klimatycznych. *Instal*, (1), 17-22. <https://doi.org/10.36119/15.2026.1.2>
- [10] Kwiecień, D., & Kowalski, P. (2024). Wpływ prognozowanych zmian klimatu na zapotrzebowanie na energię do uzdatniania powietrza wentylacyjnego dla Wrocławia. *Instal*, (7-8), 23-28. <https://doi.org/10.36119/15.2024.7-8.3>
- [11] Li, H.; Zhao, Y.; Bardhan, R.; Chan, P.W.; Derome, D.; Luo, Z.; Ürgel-Vorsatz, D.; Carmeliet, J. (2023). Relating three-decade surge in space cooling demand to urban warming. *Environmental Research Letters*, 18(12), 124033.
- [12] Liao, W., Zheng, K., & Liu, X. (2024). Regional and seasonal partitioning of water and temperature controls on urban dryness variability in China. *Urban Climate*, 56, 102030. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102030>

- [13] Macintyre, H. L., Heaviside, C., Cai, X., & Phalkey, R. (2021). The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate. *Environment International*, 154, 106530. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106530>
- [14] Matallah, M. E., Boulkaibet, A., Arrar, H. F., Wang, T., Amari-padath, D., Ahriz, A., ... & Attia, S. (2025). Data-driven characterization of urban heat island intensity, heat wave, and heat stress interactions in Brussels: A field measurement study. *Sustainable Cities and Society*, 106974. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106974>
- [15] Michalak, D., & Szyja, P. (2023). Polish Adaptation Policy to Climate Change vs. EU Countries' Adaptation Policies. Comparative Economic Research. *Central and Eastern Europe*, 26(3), 127-144.
- [16] Palme, M., Lobato, A., & Carrasco, C. (2016). Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island effect in cities of Latin-American Pacific Coast. *Procedia Engineering*, 169, 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.024>
- [17] Palusci, O., & Cecere, C. (2022). Urban ventilation in the compact city: A critical review and a multidisciplinary methodology for improving sustainability and resilience in urban areas. *Sustainability*, 14(7), 3948. <https://doi.org/10.3390/su14073948>
- [18] Palusci, O., Monti, P., Cecere, C., Montazeri, H., & Blocken, B. (2022). Impact of morphological parameters on urban ventilation in compact cities: The case of the Tuscolano-Don Bosco district in Rome. *Science of the Total Environment*, 807, 150490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150490>
- [19] Papakostas, K. T., & Slini, T. (2017). Effects of climate change on the energy required for the treatment of ventilation fresh air in HVAC systems the case of Athens and Thessaloniki. *Procedia environmental sciences*, 38, 852-859. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.171>
- [20] Salvati, A., & Kolokotroni, M. (2023). Urban microclimate and climate change impact on the thermal performance and ventilation of multi-family residential buildings. *Energy and Buildings*, 294, 113224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113224>
- [21] Air Infiltration and Ventilation Centre. (2004). *Urban ventilation* (VIP No. 3). AIVC. https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP03.Urban%20Ventilation.pdf
- [22] Shen, P., Ji, Y., Li, Y., Wang, M., Cui, X., & Tong, H. (2025). Combined impact of climate change and urban heat island on building energy use in three megacities in China. *Energy and Buildings*, 331, 115386. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115386>
- [23] Sun, Y., Hou, J., Cheng, R., Sheng, Y., Zhang, X., & Sundell, J. (2019). Indoor air quality, ventilation and their associations with sick building syndrome in Chinese homes. *Energy and Buildings*, 197, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.046>
- [24] Tasan, M., Dąbrowska, J., & Michałowska, K. (2025). Surface urban heat islands during heatwaves: Thermal impacts on the built environment in selected polish cities. *Building and Environment*, 113603. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113603>
- [25] Wen, Y., Zhang, P., Wei, J., Yu, F., & Huang, C. (2025). Sustainable urban designs integrating aboveground microclimates and underground heat islands: a systematic review and design strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115445. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115445>
- [26] Xu, X., Dong, Q., & Zhen, M. (2024). Assessing effects of future climate change on outdoor thermal stress and building energy performance in severe cold region of China. *Building and Environment*, 251, 111236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111236>
- [27] Yang, Y.; Zhou, M.; Wang, T.; Yao, B.; Han, P.; Ji, D.; Zhou, W.; Sun, Y.; Wang, G.; Wang, P. (2021). Spatial and temporal variations of CO₂ mole fractions observed at Beijing, Xianghe, and Xinglong in North China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(15), 11741-11757. <https://doi.org/10.5194/acp-21-11741-2021>
- [28] Yu, S., Yu, D., Chen, Y., Zhang, Z., & Xia, H. (2025). Spatiotemporal characteristics of atmospheric CO₂ under the influence of different industrial emission sources using lidar remote sensing in Nanping, China. *Journal of Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.03.046>
- [29] Zarghamipour, M., & Malakooti, H. (2025). The projected effects of urbanization and climate change on urban Heat Island and thermal comfort over the Tehran metropolitan. *Science of The Total Environment*, 992, 179955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179955>
- [30] Zhang, K., Cao, C., Chu, H., Zhao, L., Zhao, J., & Lee, X. (2023). Increased heat risk in wet climate induced by urban humid heat. *Nature*, 617(7962), 738-742. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05911-1>
- [31] Zhao, J., Uhde, E., Salthammer, T., Antretter, F., Shaw, D., Carslaw, N., & Schieweck, A. (2024). Long-term prediction of the effects of climate change on indoor climate and air quality. *Environmental research*, 243, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117804>
- [32] Zhou, H., Chang, J., Sun, J., Shang, C., Han, F., & Hu, D. (2017). Spatial variation of temperature of surface soil layer adjacent to constructions: A theoretical framework for atmosphere-building-soil energy flow systems. *Building and Environment*, 124, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.002>
- [33] Zhu, X. H., Lu, K. F., Peng, Z. R., He, H. D., & Xu, S. Q. (2022). Spatiotemporal variations of carbon dioxide (CO₂) at Urban neighborhood scale: Characterization of distribution patterns and contributions of emission sources. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103646. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103646>
- [34] European Commission. (2025). *Public opinion on urban challenges and investment in cities (Eurobarometer)*. <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/3368>