

Wpływ zmian klimatu na długookresową wydajność wentylacji grawitacyjnej – studium przypadku

Impact of climate change on the long-term performance of gravity ventilation – case study

ARKADIUSZ WITEK

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.09.03

W artykule przeanalizowano wpływ prognozowanych zmian klimatu na wydajność wentylacji grawitacyjnej w klimacie śródkowoeuropejskim (na przykładzie stacji Warszawa-Okęcie). Celem pracy była ilościowa ocena funkcjonowania referencyjnego kanału wentylacyjnego w horyzontach czasowych 2050 i 2080 przy użyciu scenariusza umiarkowanego rozwoju SSP2-4.5. Obliczenia wykonano w kroku godzinnym na podstawie przeskalowanych metodą morfingu danych Typowego Roku Meteorologicznego. Analiza wrażliwości modelu wykazała, że uproszczony stacjonarny model termofizyczny osiąga wysokie dopasowanie (średni ważony błąd względny w skali roku WAPE = 2,57%), co uzasadnia jego stosowanie w symulacjach wielkoskalowych. Wyniki obliczeń wydajności kanału wskazują na sukcesywną degradację ciągu grawitacyjnego – średni roczny strumień powietrza spadnie z obecnych 50,5 m³/h do 44,0 m³/h w roku 2050 i 42,0 m³/h w 2080, a czas pracy z niedostateczną wydajnością (strumień < 25% nominalnego) wzrośnie z 16,9% do odpowiednio 24,2% i 26,6% w skali roku. Aby odtworzyć te warunki w stacjonarnym projektowaniu, wyznaczono nowe temperatury odniesienia: 13,7°C dla roku 2050 oraz 14,2°C dla roku 2080 (wobec 12,0°C obecnie). Konieczność wydłużenia kanałów w skrajnych przypadkach aż o 55% dla utrzymania strumienia nominalnego dowodzi, że układy pasywne wyczerpują swoje możliwości eksploatacyjne przy akceptowalnych gabarytach przewodów, co uzasadnia stopniowe wdrażanie rozwiązań hybrydowych. Słowa kluczowe: wentylacja grawitacyjna, zmiany klimatu, typowy rok meteorologiczny (TMY), scenariusz SSP2-4.5, wypór termiczny, analiza wrażliwości modelu

This paper investigates the impact of projected climate change on the performance of natural ventilation in a Central European climate. The Warsaw-Okęcie weather station is used as a case study. The aim was to evaluate the operation of a reference ventilation duct quantitatively for the time horizons of 2050 and 2080 under the moderate SSP2-4.5 socio-economic scenario. Hourly calculations were performed using morphed Typical Meteorological Year data. Model sensitivity analysis demonstrated that the simplified steady-state thermophysical model achieves high accuracy (annual WAPE = 2.57%), thus justifying its use in large-scale simulations. The results of the duct airflow calculations indicate a gradual degradation of the stack effect. The average annual airflow rate is expected to decrease from 50.5 m³/h to 44.0 m³/h in 2050 and to 42.0 m³/h in 2080. Meanwhile, the operating time with insufficient performance (i.e. an airflow rate of less than 25% of the nominal rate) is expected to increase from 16.9% to 24.2% and then to 26.6% per year, respectively. To replicate these conditions using steady-state design methods, new reference temperatures were established: 13.7°C for 2050 and 14.2°C for 2080 (compared to 12.0°C currently). The requirement to extend the duct length by up to 55% in extreme cases to maintain nominal capacity demonstrates that passive systems are reaching their adaptive limits and highlights the need for a gradual transition towards hybrid ventilation solutions. Keywords: natural ventilation, climate change, typical meteorological year (TMY), SSP2-4.5 scenario, stack effect, model sensitivity analysis

Wprowadzenie

Obserwowane w ostatnich dekadach zmiany klimatyczne przestają być wyłącznie domeną globalnych prognoz ekologicznych, a stają się realnym wyzwaniem dla inżynierii środowiska i fizyki budowli. Aktualizacje krajowych baz danych meteo-

rologicznych jednoznacznie wskazują na stały wzrost średnich rocznych temperatur powietrza zewnętrznego oraz pogodzenie zimowych ekstremów w Polsce [1]. Tradycyjne metody projektowania i wymiarowania instalacji budowlanych, często oparte na statystycznych, historycznych danych meteorologicznych, stopniowo

tracą swoją reprezentatywność w konfrontacji z nowymi, lokalnymi warunkami klimatycznymi.

Zagadnienie wpływu transformacji klimatycznych na funkcjonowanie budynków jest przedmiotem intensywnych badań zarówno w Polsce, jak i na świecie. W warunkach krajowych wentylacja

Arkadiusz Witek ORCID: 0000-0002-3744-9579, Uczelnia Techniczno-Handlowa im. Heleny Chodkowskiej, Wydział Inżynieryjny, ul. Jagiellońska 82f, 03-301 Warszawa, arkadiusz.witek@uth.edu.pl

Data zgłoszenia: 23.07.2026. Data przyjęcia: 24.08.2026. Data publikacji: 22.09.2026

grawitacyjna wciąż stanowi dominujący system wymiany powietrza w budownictwie mieszkaniowym. Badania nad jej rzeczywistą wydajnością i wrażliwością na zmienne warunki pogodowe prowadzili m.in. Jędrzejuk [2], Radzikowska-Juś i Owczarek [3] oraz Firląg i Miszczuk [4], wskazując na jej wysokie uzależnienie od wyporu termicznego i częste niedobory strumienia powietrza w okresach przejściowych i letnich. Z kolei Basińska i Koczyk [5] zwrócili uwagę na konieczność redefinicji kryteriów trwania sezonu grzewczego i dynamiki stopniodni w nowo projektowanych, wysokoefektywnych obiektach.

W literaturze światowej kluczowym narzędziem analizy wpływu zmian klimatu na budynki stało się generowanie przyszłych danych pogodowych (tzw. morfing), opisane szczegółowo przez Jentscha i in. [6]. Prowadzone na ich podstawie symulacje pokazują wyraźny spadek zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania przy jednoczesnym gwałtownym wzroście ryzyka przegrzewania wewnątrz, co wykazano w pracach Franka [7] oraz Holmesa i Hackera [10]. Badania Coleya i Kershawa [9] dowodzą przy tym bezpośrednio, niemal liniowej zależności między wzrostem temperatury zewnętrznej a podwyższeniem temperatur wewnątrz obiektów. W tym kontekście Lomas i Ji [8] przeanalizowali odporność budynków z wentylacją naturalną na przyszłe fale upałów, wskazując na wyzwania i ograniczenia pasywnych strategii chłodzenia w utrzymaniu komfortu cieplnego.

Mając na uwadze potencjalnie negatywny wpływ zmian klimatycznych na stabilność działania wentylacji naturalnej, głównym celem niniejszej pracy była ilościowa ocena funkcjonowania referencyjnego kanału grawitacyjnego w perspektywie lat 2050 i 2080 przy użyciu umiarkowanego scenariusza rozwoju społeczno-gospodarczego (tzw. scenariusza „środką drogi”). Ponadto, poprzez szczegółową analizę parametrów meteorologicznych (w tym prędkości i parcia wiatru oraz wilgotności), podjęto próbę oceny, jak czynniki pogodowe nieujęte bezpośrednio w prostych algorytmach obliczeniowych wpływają na długookresową wydajność wymiany powietrza.

Model przepływu przez kanał wentylacyjny

Wydajność kanału wentylacji naturalnej zależy od ciśnienia grawitacyjnego (wyporu termicznego), wywołanego różnicą gęstości powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, a także od ciśnień spowodowanych parciem i ssaniem wiatru na przegrody zewnętrzne budynku [11, 3].

Ze względu na dużą nieprzewidywalność siły i kierunku wiatru, w prostym podejściu inżynierskim jego wpływ jest często pomijany. Wówczas jako jedyny czynnik wymuszający przepływ powietrza przyjmuje się grawitacyjną różnicę ciśnień Δp_{gr} . Równanie opisujące ten stan przyjmuje postać, np. [3]:

$$\Delta p_{gr} = g \cdot H \cdot (\rho_e - \rho_i) \quad (1)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie, $[m/s^2]$, H – różnica wysokości otworu wlotowego i wylotowego w kanale wentylacyjnym, $[m]$, ρ_e – gęstość powietrza zewnętrznego, $[kg/m^3]$, ρ_i – gęstość powietrza wewnętrznego, $[kg/m^3]$.

Czynne ciśnienie grawitacyjne Δp_{gr} w stanie równowagi jest w całości równoważone przez sumaryczne straty ciśnienia: opory liniowe (Δp_l) oraz opory miejscowe (Δp_m). Pierwsze wynikają z tarcia powietrza o chropowate ścianki przewodu, natomiast drugie są skutkiem lokalnych zaburzeń strugi na elementach takich jak kratki wentylacyjne, załamania czy zmiany przekroju. Całkowitą stratę ciśnienia w kanale opisuje zależność, np. [2]:

$$\Delta p = \sum \Delta p_l + \sum \Delta p_m = \left(\sum L \frac{\lambda}{D_h} + \sum \xi \right) \frac{\rho_i \cdot w^2}{2} \quad (2)$$

gdzie: λ – współczynnik tarcia, $[-]$, D_h – średnica hydrauliczna, $[m]$, w – średnia prędkość przepływu powietrza przez kanał wentylacyjny, $[m/s]$, ξ – opory miejscowe, $[-]$, L – długość całkowita kanału, $[m]$, ρ_i – gęstość powietrza wewnętrznego, $[kg/m^3]$.

Współczynnik tarcia liniowego w przedstawionym algorytmie wyznaczano z równania Colebrook-White'a [2], przy założeniu chropowatości bezwzględnej ścianek kanału wentylacyjnego $k = 3 \text{ mm}$ (wartość reprezentatywna dla tradycyjnego muru z cegły). W warunkach rzeczywistych wydajność ta będzie dodatkowo ograniczana przez opory przepływu nawiewników okiennych oraz czynniki eksploatacyjne [4, 12], a także ewentualny wzrost chropowatości ścianek kanału w czasie jego użytkowania. Oznacza to, że wyliczony w pracy strumień stanowi maksymalną teoretyczną wydajność przepływową kanału. Sumę współczynników oporów miejscowych, uwzględniającą kratki wentylacyjne na otworze wlotowym i wylotowym, kolano i trójnik rozprawy, czyli elementy typowego kanału w domu jednorodzinnym, przyjęto $\sum \xi = 10,4$ [2]. W stosunku do modelu zastosowanego w [2] wprowadzono zależność niektórych

parametrów od wilgotności powietrza, gdyż, jak wynika z analizy w następnej sekcji pracy, będzie ona ulegać znacznym zmianom w przyszłości. Gęstość wilgotnego powietrza, ρ , określano na podstawie prawa gazu doskonałego dla mieszanin. Lepkość kinematyczną ν_i , niezbędną do wyznaczenia tarcia liniowego, wyznaczono z uwzględnieniem wpływu wilgoci zarówno na gęstość, jak i lepkość dynamiczną ($\nu_i = \mu_i / \rho_i$). Natomiast lepkość dynamiczną powietrza wilgotnego, μ_i , obliczano za pomocą empirycznego modelu Studnikova [13]. Ciśnienie pary wodnej nasyconej, p_{sat} , niezbędne do wyznaczenia ciśnień cząstkowych, określano przy użyciu metody Hylanda-Wexlera, zapewniającej wysoką dokładność obliczeń zarówno w temperaturach ujemnych, jak i dodatnich [13].

Po wyznaczeniu wymienionych wyżej właściwości powietrza i parametrów jego przepływu strumień objętościowy Q $[m^3/h]$ wyznacza się ze wzoru:

$$Q = A \cdot w \cdot 3600 = a \cdot b \cdot w \cdot 3600 \quad (3)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego kanału, $[m^2]$, $A = a \cdot b$; a , b – wymiary poprzeczne przekroju kanału, $[m]$, w – prędkość przepływu powietrza, $[m/s]$, wyznaczana po przekształceniu wzoru (2).

Dane pogodowe na przyszłe lata

Do oszacowania wydajności wentylacji na etapie projektowania budynku przyjęto najaktualniejsze dostępne godzinowe dane pogodowe w postaci typowego roku meteorologicznego (TMY, ang. Typical Meteorological Year) [1]. Dane te bazują na pomiarach IMGW ze stacji na Lotnisku Okęcie z lat 2011-2025. Dane pogodowe na lata 2050 i 2080 uzyskano w wyniku morfingu, czyli matematycznej transformacji wyników globalnych modeli klimatycznych (GCM, ang. Global Climate Model). Morfing pozwala na przeskalowanie wyników GCM, tworzonych dla siatek o niskiej rozdzielczości, na konkretną, punktową lokalizację [14].

Jako scenariusz zmian klimatu do analizy przyjęto SSP2-4.5 (ang. Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5) [15]. Jest to tzw. scenariusz „środką drogi” (ang. middle-of-the-road), zakładający umiarkowane tempo zmian społeczno-ekonomicznych oraz stabilizację emisji gazów cieplarnianych w połowie XXI wieku. Typowe statystyki meteorologiczne przedstawione w tab. 1 uzupełniono o parametry ściśle powiązane z fizyką budowy. W pierwszej kolejności dokonano dynamicznego podziału roku na sezon grzewczy oraz pozostałą część roku.

Tabela 1. Statystyki parametrów meteorologicznych i wskaźników fizyki budowy w analizowanych horyzontach czasowych dla lokalizacji Warszawa-Okęcie

Table 1. Statistical parameters of meteorological data and building physics indicators across the analyzed time horizons (Warsaw-Okęcie, representing Central European climate conditions)

Parametr\Rok	2011-2025	2050	2080
Średnia temperatura roczna, [°C]	10,13	12,32	13,07
Absolutne maksimum temperatury, [°C]	33,10	35,00	37,30
Absolutne minimum temperatury, [°C]	-14,80	-9,60	-8,50
Liczba godzin pow. 25°C (cieple), [h]	391	804	931
Liczba godzin pow. 30°C (upalne), [h]	29	120	222
Liczba godzin pow. 35°C (skrajnie), [h]	0	0	16
Średnia amplituda dobową (lato), [K]	10,94	11,02	11,17
Godziny z małą różnicą temp. ($\Delta T < 8$ K, lato), [h]	1743	1959	1991
Godziny z małą różnicą temp. ($\Delta T < 8$ K, zima), [h]	1549	2073	2224
Stopniodni grzania (EUROSTAT), [-]	3094,95	2522,10	2327,15
Stopniodni chłodzenia (EUROSTAT), [-]	27,90	91,45	161,70
Koniec sezonu grzewczego (wiosna)	05-12	04-27	04-26
Początek sezonu grzewczego (jesień)	09-23	09-24	09-25
Średnia prędkość wiatru (sezon niegrzewczy), [m/s]	3,08	2,88	2,81
Średnia prędkość wiatru (sezon grzewczy), [m/s]	3,61	3,39	3,31
Średnie parcie dynamiczne wiatru (sezon niegrzewczy), [Pa]	7,51	6,58	6,29
Średnie parcie dynamiczne wiatru (sezon grzewczy), [Pa]	10,67	9,45	9,02
Suma prom. bezpośredniego (sezon niegrzewczy), [kWh/m²]	492,56	520,54	525,49
Suma prom. rozproszonego (sezon niegrzewczy), [kWh/m²]	177,78	187,70	189,48
Suma prom. bezpośredniego (sezon grzewczy), [kWh/m²]	780,47	812,48	812,80
Suma prom. rozproszonego (sezon grzewczy), [kWh/m²]	278,62	289,93	289,95
Średni punkt rosy w lecie, [°C]	12,41	13,79	14,40
Średnia zawartość wilgoci (rok), [g/kg]	6,06	6,73	7,01
Średnia zawartość wilgoci (sezon niegrzewczy), [g/kg]	9,27	10,14	10,54
Średnia zawartość wilgoci (sezon grzewczy), [g/kg]	4,98	5,58	5,82

Ponieważ przedmiotem analizy w niniejszej pracy nie jest całościowa bryła obiektu, lecz zachowanie konkretnego kanału wentylacyjnego, niemożliwe było zastosowanie algorytmów wydzielenia sezonu grzewczego opartych na pełnym bilansie cieplnym budynku i wyznaczaniu temperatury punktu równowagi termicznej, stosowanych m.in. w klasycznej metodyce normy PN-EN ISO 13790 (zastąpionej obecnie przez dynamiczny standard PN-EN ISO 52016-1). W związku z tym podziału dokonano w oparciu o kryterium meteorologiczne: przyjęto, że sezon grzewczy kończy się wiosną w momencie, gdy przez 3 kolejne dni średnia dobowa temperatura powietrza zewnętrznego nie spada poniżej 12°C, a rozpoczyna się jesienią, gdy przez 3 kolejne dni utrzymuje się poniżej tego progu. Uzasadnienie stosowania obniżonej temperatury progowej (12°C), jako reprezentatywnej dla nowoczesnego, efektywnego energetycznie budownictwa, można znaleźć na przykład w pracy [4] i znajduje również odzwierciedlenie w wytycznych normatywnych serii PN-EN ISO 15927.

Do parametrów ściśle powiązanych z fizyką budowy zaliczono: parcie dynamiczne wiatru, zawartość masową wilgoci, stopniodni grzania i chłodzenia oraz liczbę dni z małą różnicą temperatury (< 8 K). Parcie i ssanie wiatru, działające na nieszczelności przegród, stanowi – obok wyporu termicznego – główny mechanizm napędzający infiltrację i wymianę powietrza w obiekcie [11]. Wzrost zawartości wilgoci zmniejsza gęstość całkowitą powietrza (ρ). Wynika to z faktu, że masa mola pary wodnej ($M_{H_2O} \approx 18$ g/mol) jest znacznie niższa niż suchego powietrza ($M_{pow} \approx 29$ g/mol), przez co powietrze wilgotne jest fizycznie lżejsze. Do oceny zmian makroklimatycznych w zapotrzebowaniu na energię do grzania zastosowano standardową metodę EUROSTAT (temperatura bazowa 18°C, graniczna 15°C) [16], co pozwala na znormalizowaną ocenę niezależnie od przyjętego wcześniej, technologicznego proggu trwania sezonu grzewczego (12°C). Za temperaturę bazową chłodzenia przyjęto 20°C. Z kolei liczba dni z małą różnicą temperatury wewnętrznej i zewnętrznej ($\Delta T = T_i - T_e = 8$ K) posłużyła jako wskaźnik ograniczenia wydajności układu, co stanowi standardowe kryterium obliczeniowe w polskich warunkach normowych [2, 17].

Z przedstawionych w tab. 1 danych wynika, że średnia temperatura roczna w Warszawie w 2050 roku będzie wyższa o 2,19 K, a w 2080 roku o 2,94 K. Ten nieliniowy wzrost – silniejszy w pierwszej połowie wieku – wynika bezpośrednio z proekologicznych założeń scenariusza SSP2-4.5, który przewiduje globalną stabi-

lizację emisji gazów cieplarnianych po 2050 roku. W podobnym zakresie wzrostu temperatury maksymalne, natomiast średnia temperatura minimalna podniesie się aż o ponad 5 K do 2050 roku, co zwiastuje znacznie łagodniejsze zimy. Wyraźnie rośnie liczba godzin z małą różnicą temperatur ($\Delta T < 8$ K), szczególnie zimą. Wskazuje to na teoretyczny spadek naturalnego potencjału wentylacji grawitacyjnej (choć w rzeczywistym budynku ten negatywny wpływ bywa maskowany przez wewnętrzne zyski ciepła). Zmiany te drastycznie przekształcają bilans energetyczny obiektów: liczba stopniodni grzania spadnie odpowiednio o 18% i 28%, podczas gdy liczba stopniodni chłodzenia gwałtownie wzrośnie – ponad trzykrotnie w 2050 r. i niemal sześciokrotnie w 2080 r. w stosunku do okresu bazowego. Sam sezon grzewczy skróci się nieznacznie: wiosną o około dwa tygodnie (przesunięcie z połowy maja na koniec kwietnia), natomiast jesienią jego początek we wszystkich analizowanych okresach przypada na ostatni tydzień września. Niepokojącym sygnałem jest prognozowany spadek średniego parcia wiatru, co osłabi dodatkowy czynnik wspomagający naturalną wentylację. Mimo rosnącej zawartości wilgoci (która zmniejsza przezroczystość atmosfery), promieniowanie docierające do powierzchni Ziemi jednak nieznacznie wzrośnie, co w modelach klimatycznych wiąże się zazwyczaj z redukcją zachmurzenia i aerozoli [18]. W fizyce budowy oznacza to zbliżone zyski radiacyjne, ale znacznie trudniejsze warunki wilgotnościowe. Wyższy punkt rosy i zawartość wody w powietrzu przełożą się na ogromny wzrost energii potrzebnej na osuszanie w systemach klimatyzacji, a w budynkach wentylowanych naturalnie – na ryzyko zaduchu oraz rozwoju grzybów pleśniowych.

Mikroklimat pomieszczenia

W obliczeniach przyjęto zmienną wilgotność powietrza wewnętrznego zgodnie z metodyką normy PN-EN ISO 13788 [19]. Zawartość wilgoci w pomieszczeniu wyznaczana jest jako suma wilgotności powietrza zewnętrznego oraz wewnętrznego przyrostu wilgotności Δv , zależnego od temperatury na zewnątrz. Dla temperatur zewnętrznych poniżej -5°C przyrost ten przyjęto na poziomie $\Delta v = 2$ g/m³ (klasa 2: biura, domy jednorodzinne o małym zagęszczeniu), natomiast dla temperatur powyżej 20°C przyjmuje się brak wzrostu wilgotności w wyniku procesów zachodzących w pomieszczeniach budynku. W przedziale od -5°C do 20°C wartość przyrostu jest interpolowana liniowo. Norma PN-EN ISO 13788 zaleca również

stosowanie 10% współczynnika zwiększającego przyrost Δv na potrzeby bezpiecznego szacowania ryzyka kondensacji powierzchniowej. W niniejszych analizach zrezygnowano z tego dodatku. Wyższa wilgotność powietrza zmniejsza jego gęstość, co sztucznie zwiększałoby siłę wyporu grawitacyjnego i zawyżało wyliczoną wydajność ciągu. Pominięcie tego współczynnika jest zatem podejściem konserwatywnym i bezpiecznym z punktu widzenia oceny sprawności układu wentylacji.

Referencyjny kanał wentylacyjny

Przy założeniu różnicy temperatur 8 K zaprojektowano kanał wentylacyjny o wydajności 50 m³/h, co odpowiada strumieniowi wymaganemu dla pomieszczeń typu łazienka oraz kuchnia z kuchenką elektryczną według normy PN-B-03430:1983/Az3:2000. Wymiary poprzeczne kanału wynoszą 14 cm x 20 cm, a długość między otworem wlotowym i wylotowym to 5,2 m. Podobne wartości są raportowane w pracy [2], a niewielka różnica długości kanału może wynikać z zastosowania innych formuł do opisu parametrów termofizycznych powietrza i tarcia liniowego. Model generalnie wykazuje ogromną wrażliwość na parametryzację strat miejscowych oraz dokładność wyznaczania współczynnika tarcia λ . Szczegółowe dane wejściowe zaprojektowanego kanału wentylacyjnego podano w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry geometryczne, warunki brzegowe oraz nominalna wydajność referencyjnego kanału wentylacyjnego
Table 2. Geometrical parameters, boundary conditions, and nominal airflow capacity of the reference ventilation duct

Parametr	Wartość
Przekrój poprzeczny, [cm x cm]	14 x 20
Odległość otworów wlotowego i wylotowego, [m]	5,2
Temperatura wewnętrzna, [°C]	20
Wilgotność względna RH wewnętrzna, [%]	55
Temperatura zewnętrzna, [°C]	12
Wilgotność względna RH zewnętrzna, [%]	80
Ciśnienie atmosferyczne, [hPa]	101325
Chropowatość k, [mm]	3
Suma oporów miejscowych, [-]	10,4
Wydajność, [m³/h]	50,3

Wrażliwość modelu

Zaprezentowany model poddano analizie wrażliwości na następujące uproszczenia fizyczne i obliczeniowe:

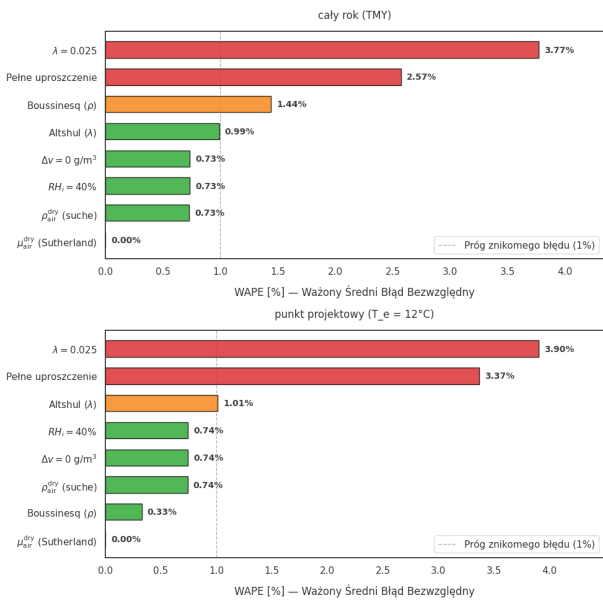
- pominięcie wewnętrznego źródła wilgoci (Δv),

- przyjęcie stałej wilgotności względnej w pomieszczeniach ($RH_i = 40\%$),
- pominięcie wpływu wilgotności na lepkość dynamiczną powietrza [13] (zastosowanie równania Sutherlanda zamiast zależności Studnikova),
- zastosowanie jawnej formuły Altshul-Tsala [2] w miejsce iteracyjnego równania Colebrook-White’a do wyznaczania współczynnika tarcia liniowego (w celu wyeliminowania pętli iteracyjnej),
- przyjęcie stałej wartości współczynnika tarcia liniowego ($\lambda = 0,025$),
- pominięcie wpływu wilgotności na gęstość powietrza (model powietrza suchego),
- zastosowanie przybliżenia Boussinesqa do wyznaczania gęstości powietrza w miejsce pełnej teorii mieszanin,
- wariant zbiorczy (pełne uproszczenie) – uwzględniający jednocześnie wszystkie możliwe uproszczenia w celu maksymalnego przyspieszenia obliczeń.

Porównanie przeprowadzono na podstawie symulacji rocznej (krok godzinowy) z wykorzystaniem typowego roku meteorologicznego (TMY) dla lat 2011-2025. Wpływ uproszczeń oceniano przy użyciu ważonego średniego bezwzględnego błędu procentowego (ang. Weighted Absolute Percentage Error, WAPE):

$$WAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i|} \cdot 100\% \tag{4}$$

gdzie: y_i – wartość referencyjna, tutaj strumień objętościowy w i-tej godzinie dla pełnego modelu, $\hat{y}_i$ – wartość wznaczona z modelu uproszczonego w i-tej godzinie, n – całkowita liczba obserwacji w analizowanym okresie (dla symulacji rocznej z krokiem godzinnym $n = 8760$).



Rys. 1. Analiza wrażliwości modelu na przyjęte uproszczenia fizyczne w skali symulacji rocznej
Fig. 1. Model sensitivity analysis to applied physical simplifications in the annual simulation

Rys. 2. Analiza wrażliwości modelu na przyjęte uproszczenia fizyczne w nominalnym punkcie pracy (warunki referencyjne)
Fig. 2. Model sensitivity analysis to applied physical simplifications at the reference operating point (nominal design conditions)

Przewidywana wydajność wentylacji z uwzględnieniem zmian klimatu

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w kroku godzinny dla pełnego cyklu rocznego (8760 h) w trzech analizowanych horyzontach czasowych: okresie bazowym (2011-2025) oraz latach 2050 i 2080, wykorzystując typowe lata meteorologiczne wyznaczone zgodnie z metodą opisaną we wcześniejszej części pracy. Symulację wykonano przy użyciu pełnej wersji modelu termofizycznego (szczegółowo omówionej w sekcji poświęconej analizie wrażliwości), przyjmując całorocznie stałą temperaturę powietrza wewnętrznego $T_i = 20^\circ\text{C}$. Jest to podejście konserwatywne. W rzeczywistych warunkach letnich (brak chłodzenia i wzrost T_i do $28-30^\circ\text{C}$) przy wysokich temperaturach zewnętrznych ujemna różnica gęstości wywoła zjawisko ciągu wstępnego. Tym samym rzeczywista wydajność wentylacji naturalnej w sezonie ciepłym będzie jeszcze gorsza niż wykazana w modelu. Jako siłę napędową przepływu uwzględniono wyłącznie wypór termiczny, zgodnie z równaniem (1). Wiatr jest czynnikiem wysoce nieprzewidywalnym i lokalnym. Celowe wyizolowanie wyporu termicznego miało na celu ocenę grawitacyjnego potencjału bazowego, czyli sprawdzenie, czy sam gradient temperatur zapewni wymaganą higienicznie wymianę powietrza w dni bezwietrzne. W sytuacjach zaniku lub odwrócenia ciągu grawitacyjnego ($T_e \geq T_i$) strumień objętościowy przyjmowano jako zerowy. Przedmiotem szczegółowej analizy były uzyskane chwilowe wartości strumienia powietrza oraz ich rozkład w poszczególnych miesiącach i przedziałach wydajności.

W celu dokonania szczegółowej analizy wyników obliczeń przyjęto podział wyznaczonych wydajności kanału wentylacyjnego w odniesieniu do wartości referencyjnej wynoszącej $50 \text{ m}^3/\text{h}$, ustalonej dla standardowych warunków projektowych (tab. 2). Specyfika działania wentylacji grawitacyjnej, ściśle zależnej od zmieniających się warunków meteorologicznych, wymaga uwzględnienia znacznej zmienności strumienia powietrza w czasie, co uzasadnia zastosowanie podziału na przedziały odchylenia od wartości nominalnej.

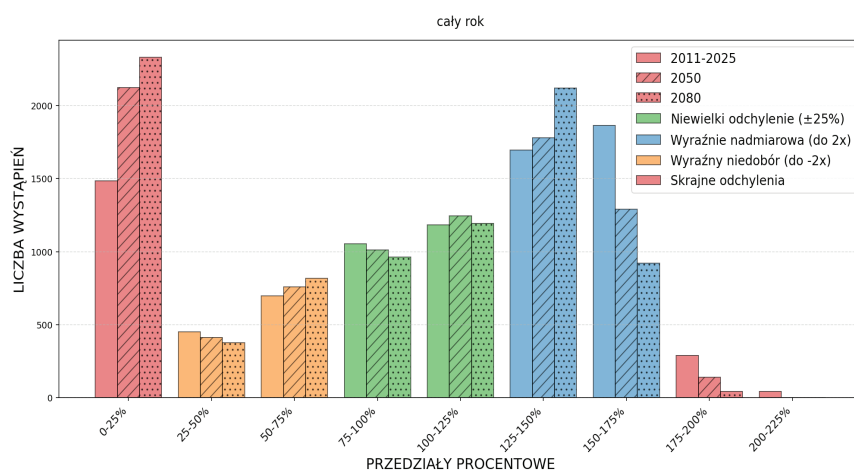
Z przeprowadzonych symulacji wynika, że w okresie referencyjnym (stan bazowy) przez 25,8% godzin w roku strumień powietrza nie odbiega od wartości optymalnej o więcej niż $\pm 25\%$ (rys. 3). W perspektywie kolejnych dekad udział tego przedziału podlega jedynie nieznacznym wahaniom. W latach 2050 i 2080 wynosi odpowiednio 26,3% i 24,9% czasu pracy

wentylacji. Analiza wykazała również stabilność udziału godzin z wyraźnym niedoborem strumienia (25-75% wartości referencyjnej). W stanie wyjściowym zakres ten obejmuje 13,4% roku, natomiast w prognozach na lata 2050 i 2080 odpowiednio 13,6% i 14,1% godzin. Najistotniejsze przekształcenia struktury przepływu zachodzą w zakresie nadmiernej wymiany powietrza (125-175% wartości nominalnej). W klimacie współczesnym praca układu w tym zakresie występuje aż przez 40,4% godzin rocznie. Wskutek postępującego ocieplenia udział ten ulegnie redukcji do 34,3% w roku 2050 i 33,9% w roku 2080. Zjawisku temu towarzyszy wyraźny spadek liczby godzin w wyższym przedziale przekroczeń (150-175%), a także niemal całkowity zanik epizodów skrajnie nadmiernej wymiany powietrza (175-225%) – ich udział maleje z wyjściowych 3,4% do 1,5% w roku 2050 i zaledwie 0,4% w roku 2080. Obserwowana tendencja wpisuje się w wyniki analizy danych meteorologicz-

nych (tab. 1), gdzie zwrócono uwagę na wyraźne łagodzenie zimowych ekstremów temperatur.

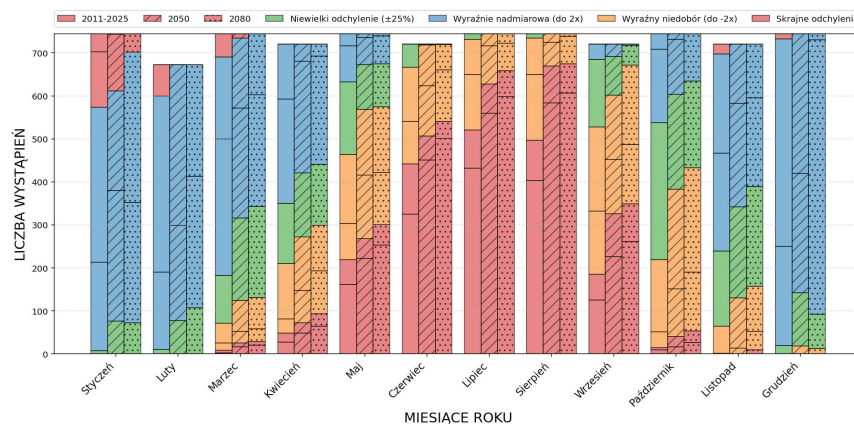
Równolegle obserwuje się niekorzystny, dynamiczny wzrost liczby godzin ze skrajnym niedoborem strumienia wentylacyjnego (poniżej 25% wartości referencyjnej). W okresie bazowym deficyt ten dotyczy 16,9% czasu w roku, podczas gdy w przyszłości wzrośnie do 24,2% i 26,6% odpowiednio w roku 2050 i 2080. Spadek wydajności do tak skrajnie niskich poziomów skupia się przede wszystkim w miesiącach letnich (lipiec, sierpień) oraz we wrześniu, rys. 4.

Negatywnym zjawiskiem z punktu widzenia eksploatacji jest także przesunięcie strefy niedoborów na miesiące jesienne i wczesnonimowe (październik, listopad i grudzień). Z kolei w styczniu i lutym struktura pracy wentylacji ulega poprawie – spadek udziału skrajnie nadmiernej wymiany powietrza ograniczy niepotrzebne straty ciepła, rys. 4.



Rys. 3. Porównanie rocznego rozkładu godzinowej wydajności wentylacji grawitacyjnej w przedziałach odchylenia od strumienia nominalnego w latach 2011-2025, 2050 i 2080

Fig. 3. Comparison of annual distribution of hourly airflow rates for natural ventilation across performance intervals relative to nominal capacity for 2011-2025, 2050, and 2080



Rys. 4. Miesięczna struktura czasu pracy wentylacji grawitacyjnej w przedziałach odchylenia od strumienia nominalnego w latach 2011-2025, 2050 i 2080 (oznaczenia kolorystyczne jak na rys. 3)

Fig. 4. Monthly distribution of hourly airflow rates for natural ventilation across performance intervals for 2011-2025, 2050, and 2080 (color scheme as in Fig. 3)

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono uśredniony w skali roku godzinowy strumień objętości powietrza w okresie bazowym (2011-2025) równy 50,5 m³/h. Zatem przyjęta w tabeli 2 temperatura zewnętrzna równa 12°C, pozwala w obliczeniach stacjonarnych odtworzyć średnioroczną wydajność systemu (przy temperaturze pomieszczeń 20°C). W scenariuszach na lata 2050 i 2080 prognozowany średni strumień ulega redukcji odpowiednio do 44 m³/h i 42 m³/h. Odpowiada to konieczności podniesienia reprezentatywnej temperatury odniesienia do 13,7°C w roku 2050 oraz 14,2°C w roku 2080. Wartości te mogą stanowić wytyczne do uproszczonego projektowania i oceny średniej wydajności wentylacji naturalnej w nowych warunkach klimatycznych.

Wyniki z tab. 3 dowodzą ilościowo, że w warunkach postępujących zmian klimatycznych wentylacja grawitacyjna wyczerpuje swoje fizyczne i geometryczne możliwości zapewnienia wymaganej wydajności. Wymagane wydłużenie przewodów (kanatów) wentylacyjnych na wyższych kondygnacjach budynków wielorodzinnych oraz w budownictwie jednorodzinym jest zazwyczaj nierealne ze względów architektonicznych i konstrukcyjnych. Na przykład, aby w roku 2080 utrzymać nominalny strumień 50 m³/h w standardowym kanale 14 cm × 20 cm, jego wysokość musiałaby wzrosnąć z 5,2 m do 7,9 m (+55%), a dla przewodu 14 cm × 14 cm – z 13,7 m do aż 25,4 m. Ponadto wymiarowanie przewodów pod kątem sprostania ewentualnym ekstremom letnim prowadziłoby do drastycznej nadwentylacji i strat ciepła w okresie zimowym. Wskazuje to jednoznacznie, że zapewnienie stabilnego mikroklimatu wewnętrznego w perspektywie nadchodzących dekad wymagać będzie odchodzenia od układów pasywnych na rzecz systemów ze wspomaganiem mechanicznym (hybrydowych) lub pełnej wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła, odpowiadającej współczesnym standardom efektywności energetycznej.

Podsumowanie

W pracy opisano stacjonarny, uproszczony model szacowania wydajności kanału wentylacyjnego oraz podstawy pozyskiwania danych pogodowych na lata 2050 i 2080. Na podstawie wygenerowanych za pomocą morfingu danych klimatycznych scenariusz środka drogi SSP2-4.5 (tzw. scenariusz umiarkowany wg 6. Raportu IPCC) przeprowadzono podstawową analizę stanu atmosfery z punktu widzenia zagadnień fizyki budowli związanych z wymianą ciepła

Tab. 3. Wymagana długość kanału o przekroju a x b [m] dla zapewnienia strumienia nominalnego Q w warunkach projektowych dla horyzontów 2011-2025 / 2050 / 2080
Tab. 3. Required duct length with cross-section a x b [m] to ensure nominal flow rate Q under design conditions for time horizons 2011-2025 / 2050 / 2080

Q [m ³ /h]	0,14 × 0,14	0,14 × 0,20	0,14 × 0,27	0,20 × 0,14	0,20 × 0,20	0,20 × 0,27	0,27 × 0,14	0,27 × 0,20	0,27 × 0,27
15	0,9 / 1,2 / 1,3	0,5 / 0,6 / 0,6	0,3 / 0,3 / 0,4	0,5 / 0,6 / 0,6	0,2 / 0,3 / 0,3	0,2 / 0,2 / 0,2	0,3 / 0,3 / 0,4	0,2 / /0,2 / /0,2	0,1 / 0,1 / 0,1
30	3,7 / 5,1 / 5,7	1,7 / 2,3 / 2,5	0,9 / 1,2 / 1,3	1,7 / 2,3 / 2,5	0,8 / 1,1 / 1,2	0,5 / 0,6 / 0,7	0,9 / 1,2 / 1,3	0,5 / 0,6 / 0,7	0,3 / 0,4 / 0,4
50	13,7 / 21,3 / 25,4	5,2 / 7,1 / 7,9	2,6 / 3,5 / 3,9	5,1 / 7,1 / 7,9	2,3 / 3,1 / 3,4	1,3 / 1,6 / 1,8	2,6 / 3,5 / 3,9	1,3 / 1,6 / 1,8	0,7 / 0,9 / 1,0
70	-	11,7 / 17,3 / 9,9	5,4 / 7,5 / 8,3	11,7 / 17,3 / 19,9	4,7 / 6,4 / 7,2	2,5 / 3,3 / 3,6	5,4 / 7,5 / 8,3	2,5 / 3,3 / 3,6	1,3 / 1,8 / 1,9
90	-	24,9 / - / -	9,9 / 14,0 / 16,0	24,9 / - / -	8,4 / 11,7 / 13,2	4,2 / 5,6 / 6,2	9,9 / 14,0 / 16,0	4,2 / 5,6 / 6,2	2,2 / 2,9 / 3,2

i masy przez kanał wentylacyjny. Następnie przeprowadzono analizę wrażliwości modelu oraz analizę otrzymanych wartości wydajności wentylacji w poszczególnych godzinach Typowego Roku Meteorologicznego.

Transformacja danych meteorologicznych dla scenariusza SSP2-4.5 wskazuje na postępujące ocieplenie klimatu w lokalizacji Warszawa-Okęcie, objawiające się wzrostem średniej temperatury rocznej o 2,94 K w perspektywie 2080 roku oraz ponad trzykrotnym wzrostem liczby stopnioidni chłodzenia już w 2050 roku. Z punktu widzenia fizyki budowli kluczowym zjawiskiem jest drastyczny wzrost liczby godzin o małej różnicy temperatur ($\Delta T < 8$ K) połączony ze spadkiem średniego parcia wiatru, co bezpośrednio redukuje główne siły napędowe wentylacji naturalnej. Ponadto prognozowany wzrost zawartości wilgoci, przekładający się bezpośrednio na wyższą temperaturę punktu rosy, stwarza zagrożenie dla budynku: w wentylacji naturalnej skutkuje kondensacją wilgoci na chłodniejszych przegrodach wewnętrznych oraz ryzykiem rozwoju pleśni i grzybów, natomiast w systemach mechanicznych prowadzi do kondensacji na elementach instalacji oraz drastycznego wzrostu utajonych obciążeń chłodniczych.

Z przeprowadzonych analiz wyników obliczeń wynika, że zmiany klimatu lokalnego wymuszają przewartościowanie priorytetów eksploatacyjnych budynku. O ile zimą zmiany klimatyczne przyniosą pozytywny efekt w postaci ograniczenia nadmiernej infiltracji i strat energii na ogrzewanie, o tyle w sezonie ciepłym i przejściowym dramatycznie wzrośnie ryzyko długotrwałej stagnacji powietrza. Zjawisko to nie tylko pogorszy jakość powietrza wewnętrznego, ale również utrudni nocne chłodzenie pasywne. W miesiącach jesiennych może stwarzać nowe zagrożenie

kondensacją wilgoci z powodu niedostatecznej wymiany powietrza przy jeszcze niepełnym sezonie grzewczym.

Analiza długookresowa wykazała sukcesywny spadek średniego rocznego ciągu grawitacyjnego pod wpływem ocieplenia klimatu (spadek wydajności o 13-17%), co wymusza podniesienie reprezentatywnych temperatur projektowych z 12°C do 13,7°C w 2050 roku i 14,2°C w 2080 roku. Ze względu na specyfikę analizowanego studium przypadku (pojedynczy kanał) oraz odległy horyzont czasowy prognoz, wyznaczone wartości ilościowe należy traktować jako wytyczne wskazujące ogólne trendy eksploatacyjne. Konieczność znacznego wydłużenia kanałów dla zachowania wydajności nominalnej wskazuje na ograniczenia funkcjonalne rozwiązań pozbawionych wspomagania mechanicznego. Należy jednak podkreślić, że dominująca część istniejącego budownictwa mieszkalnego w Polsce polega na wentylacji grawitacyjnej i z przyczyn ekonomicznych oraz konstrukcyjnych nie zostanie w krótkiej perspektywie w pełni zautomatyzowana czy wyposażona w układy nawiewno-wywiewne. Wyniki pracy stanowią ilościową przesłankę wskazującą na potrzebę ich etapowej, ewolucyjnej modernizacji. Wdrożenie wentylacji hybrydowej (np. poprzez montaż niskoenergetycznych nasad wentylacyjnych) pozwala zachować walory pasywnej wymiany powietrza w okresach sprzyjających, zabezpieczając jednocześnie budynek przed stagnacją powietrza podczas letnich i jesiennych deficytów ciągu.

Analiza wrażliwości modelu wykazała, że większość pojedynczych uproszczeń fizycznych, w tym pominięcie wpływu wilgotności oraz zastąpienie równania Colebrooka-White'a formułą Altshula-Tsala, generuje znikomy błąd rocznego strumienia powietrza. Głównym źródłem odchylenia

okazało się przyjęcie stałego współczynnika tarcia liniowego, jednak wariant w pełni uproszczony, dzięki zjawisku kompensacji błędów, osiąga akceptowalny błąd roczny na poziomie $WAPE = 2,57\%$. Uzasadnia to jego stosowanie do znaczącego przyspieszenia obliczeń w długookresowych symulacjach budynkowych bez istotnej utraty dokładności.

Analizy prowadzone przy użyciu bardziej rozbudowanych programów symulacyjnych mogą zapewnić wyższą szczegółowość wyników, jednak kosztem trudniejszej identyfikacji dominujących mechanizmów fizycznych i mniejszej czytelności uogólnionych wytycznych. W dalszych pracach przewiduje się walidację opracowanego podejścia w warunkach pełnego bilansu cieplnego budynku, celem precyzyjnego określenia granic stosowności proponowanych zaleceń projektowych.

Bibliografia

- [1] Narowski, P. (2022). Analiza porównawcza typowych lat meteorologicznych Polski wyznaczonych na podstawie danych źródłowych z lat 2001-2020. *INSTAL*, 10, 11-25. <https://doi.org/10.36119/15.2022.10.2>
- [2] Jędrzejuk, H. (2017). Uproszczona analiza działania wentylacji grawitacyjnej w sezonie ogrzewczym na przykładzie danych meteorologicznych Warszawy. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*, 22, 260-268.
- [3] Radzikowska-Juś, W., & Owczarek, M. (2015). Działanie wentylacji grawitacyjnej w zależności od warunków zewnętrznych na przykładzie dwóch pomieszczeń biurowych w budynku użyteczności publicznej. *Budownictwo*, 15-21.
- [4] Firląg, S., & Miszczuk, A. (2016). Efektywność działania wentylacji naturalnej i możliwości jej usprawnienia. *Powietrze*, czerwiec 2016.
- [5] Basińska, M., & Koczyk, H. (2005). Metoda wyznaczania strumienia objętości powietrza infiltrującego do budynku mieszkalnego przy użyciu stopniodni dynamicznych. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, T. 1., s. 13-22.
- [6] Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. B. (2008). Climate change future proofing of buildings-Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148-2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- [7] Frank, T. (2005). Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and Buildings*, 37(11), 1175-1185. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.019>
- [8] Lomas, K. J., & Ji, Y. (2009). Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: Advanced natural ventilation and hospital wards. *Energy and Buildings*, 41(6), 629-653. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.01.001>
- [9] Coley, D., & Kershaw, T. (2010). Changes in internal temperatures within the built environment as a response to a changing climate. *Building and Environment*, 45(1), 89-93. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.009>
- [10] Holmes, M. J., & Hacker, J. N. (2007). Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Buildings*, 39(7), 802-814. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.009>
- [11] Antczak-Jarząbska, R., & Niedostatkiewicz, M. (2017). Zwiększenie wydajności wentylacji naturalnej poprzez stosowanie nasady kominowej. *Przegląd Budowlany*, (12), 32-35.
- [12] Mijałowski, M. (1999). Symulacja działania wentylacji naturalnej wykorzystującej nawiewniki powietrza sterowane poziomem wilgotności. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Inżynieria Środowiska*, (41), 63-74.
- [13] Koeroghlian, M., Hall, M. J., & Matthews, R. (2018). Calculating a viscosity correction for humid air in a laminar flow element (SAE Technical Paper 2018-01-0206). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0206>
- [14] Bzowska, D. (2019). Wpływ zmian klimatycznych na temperaturę wewnętrzną budynku. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 8(2), 27-34. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2019.2.03>
- [15] Nauka o Klimacie. (b.d.). Wprowadzenie do 6. raportu IPCC. <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/wprowadzenie-do-6-raportu-ippc-490>
- [16] Dopke, J. (2009, 16 lutego). Obliczenia liczby stopniodni grzania według metody Eurostat. *Ogrzewnictwo.pl*.
- [17] PN-B-03430:1983/Az3:2000. Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej – Wymagania
- [18] Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., ... Palmer, M. D. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. W: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... R. Zhou (red.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (s. 923-1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- [19] PN-EN ISO 13788:2013-05. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku -- Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej -- Metody obliczania



Rok założenia 1919

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH ODDZIAŁ W KRAKOWIE POLISH ASSOCIATION OF SANITARY ENGINEERS AND TECHNICIANS

zaprasza na

XIX OGÓLNOPOLSKĄ KONFERENCJĘ NAUKOWO-TECHNICZNĄ „WENTYLACJA • KLIMATYZACJA • OGRZEWNICTWO • ŚRODOWISKO”



I. CIEPŁOWNICTWO I OGRZEWNICTWO – DROGA DO DEKARBONIZACJI

1. Systemy IV i V generacji
2. Wielkoskalowe pompy ciepła
3. Efektywność energetyczna budynków
4. Hybrydowe węzły ciepłne
5. Magazyny energii
6. Ciepło odpadowe



II. WENTYLACJA I KLIMATYZACJA – KOMFORT, ZDROWIE

1. Wentylacja inteligentna i hybrydowa
2. Filtracja i bezpieczeństwo zdrowotne
3. Chłodzenie pasywne
4. Jakość środowiska wewnętrznego



III. ŚRODOWISKO I GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO

1. Ślad węglowy
2. Oszczędność wody i ochrona wód
3. Retencja i błękitno-zielona infrastruktura
4. Odzysk ciepła i chłodu
5. Infrastruktura liniowa
6. Wentylacja miejska



IV. NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE

1. Narzędzia pracy inżyniera
2. IoT w budynkach i miastach
3. Cyfrowe zarządzanie środowiskiem
4. Inteligentne opomiarowanie
5. AI w zarządzaniu energią



TRESNA, 22-23 PAŹDZIERNIKA 2026 r.

Szczegóły wydarzenia pod linkiem: <https://pzits.krakow.pl/konferencja-2026/>