



Komfort cieplny w pomieszczeniach z decentralizowaną wentylacją o naprzemiennym nawiewie i wywiewie – przegląd stanu badań

Thermal comfort in rooms with decentralised alternating supply and exhaust ventilation – a review of current research



Mgr inż. Alicja Kokosza

ORCID ID: [0009-0002-9943-7685](https://orcid.org/0009-0002-9943-7685)

Absolwent
Wydział Inżynierii Środowiska,
Geodezji i Energetyki Odnawialnej
Politechnika Świętokrzyska
alicja.kokosza@gmail.com



Mgr inż. Anna Wypych

ORCID ID: [0009-0009-8695-4895](https://orcid.org/0009-0009-8695-4895)

Absolwent
Wydział Inżynierii Środowiska,
Geodezji i Energetyki Odnawialnej
Politechnika Świętokrzyska
ania.wypych@icloud.com

Słowa kluczowe: komfort cieplny, wentylacja zdecentralizowana, wentylacja rewersyjna, naprzemienny nawiew i wywiew, odzysk ciepła, ryzyko przeciągu

Streszczenie

Celem pracy jest przegląd badań dotyczących komfortu cieplnego w pomieszczeniach wyposażonych w zdecentralizowaną wentylację z naprzemiennym nawiewem i wywiewem powietrza. Przeanalizowano wpływ długości cyklu, strumienia i temperatury nawiewu, odzysku ciepła, rozmieszczenia urządzeń oraz warunków zewnętrznych. Wyniki wskazują, że nominalna wydajność i deklarowana sprawność odzysku ciepła nie wystarczają do oceny działania systemu. Istotne są również zmienność temperatury nawiewu, prędkość strugi, odległość użytkownika od urządzenia oraz różnica ciśnienia między wnętrzem a otoczeniem. Zwiększenie strumienia powietrza może poprawiać jakość powietrza, lecz równocześnie zwiększać ryzyko przeciągu. W analizowanej literaturze nie uwzględniono porównawczych badań lokalizacji i wysokości montażu urządzeń prowadzonych w jednakowych warunkach.

Keywords: thermal comfort, decentralised ventilation, reversible ventilation, alternating supply and exhaust, heat recovery, draught risk

Abstract

The paper reviews studies on thermal comfort in rooms equipped with decentralised ventilation systems providing alternating air supply and exhaust. The analysis covers cycle duration, supply airflow rate and temperature, heat recovery, unit arrangement and external conditions. The results show that nominal airflow rate and declared heat recovery efficiency are insufficient to assess system performance. Supply-air temperature variations, jet velocity, distance from the unit and pressure differences across the external wall are also important. Higher airflow may improve indoor air quality while increasing the risk of draught. The reviewed literature does not include comparative studies on unit location and installation height conducted under identical conditions.

Wstęp

Znaczenie wentylacji w budynkach o wysokiej szczelności

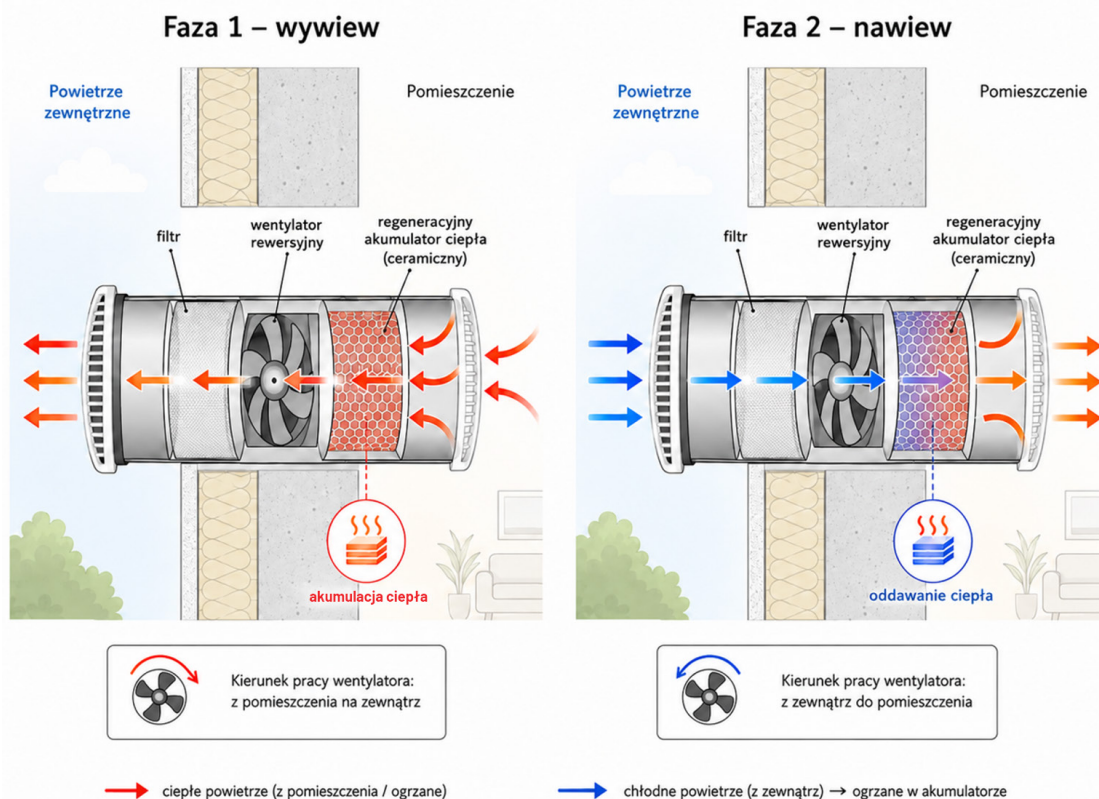
Współczesne działania termomodernizacyjne obejmują przede wszystkim poprawę izolacyjności cieplnej przegród oraz wymianę stolarki okiennej na rozwiązania o wysokiej szczelności. Ogranicza to niekontrolowaną infiltrację powietrza i straty ciepła, lecz jednocześnie zmniejsza naturalny dopływ powietrza zewnętrznego. Jeżeli modernizacji obudowy budynku nie towarzyszy zapewnienie skutecznej wentylacji, w pomieszczeniach może dochodzić do wzrostu stężenia dwutlenku węgla i wilgotności względnej oraz pogorszenia jakości środowiska wewnętrznego (Zender-Świercz, 2020).

Zapewnienie wymaganej wymiany powietrza powinno być rozpatrywane łącznie z ograniczaniem zapotrzebowania budynku na energię. Wentylacja usuwa z pomieszczeń zanieczyszczenia i nadmiar wilgoci, ale w sezonie grzewczym powoduje również straty ciepła związane z usuwaniem ogrzanego powietrza. Z tego względu w budynkach

nowych i modernizowanych coraz większe znaczenie mają systemy umożliwiające kontrolowanie strumienia powietrza oraz odzysk ciepła z powietrza wywiewanego. Przegląd badań dotyczących urządzeń fasadowych wskazuje, że mogą one poprawiać jakość powietrza wewnętrznego, jednak ich skuteczność zależy między innymi od warunków zewnętrznych, organizacji przepływu oraz parametrów pracy urządzenia (Zender-Świercz, 2021b).

Zastosowanie wentylacji zdecentralizowanej

W istniejących budynkach zastosowanie centralnej wentylacji mechanicznej bywa utrudnione z powodu braku przestrzeni na przewody, ograniczeń konstrukcyjnych oraz konieczności prowadzenia rozległych prac instalacyjnych. Alternatywę stanowią urządzenia zdecentralizowane, montowane bezpośrednio w przegrodzie zewnętrznej i obsługujące pojedyncze pomieszczenie albo grupę pomieszczeń. Ograniczenie długości przewodów upraszcza montaż i może ułatwiać zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła podczas



Rysunek 1. Zasada działania zdecentralizowanego urządzenia wentylacyjnego z naprzemiennym nawiewem i wywiewem powietrza.
Źródło: opracowanie własne
Figure 1. Operating principle of a decentralised ventilation unit with alternating air supply and exhaust. Source: authors' own study

modernizacji budynków mieszkalnych (Wirnsberger i in., 2019; Zender-Świercz, 2021a).

Jedną z odmian wentylacji zdecentralizowanej stanowią urządzenia pracujące w sposób naprzemienny, w których ten sam kanał służy okresowo do nawiewu i wywiewu powietrza. Zasadę działania takiego urządzenia oraz proces akumulacji i oddawania ciepła przedstawiono na Rysunku 1. W typowym rozwiązaniu wentylator okresowo zmienia kierunek przepływu powietrza. Umieszczony w kanale wymiennik akumulacyjny jest ogrzewany przez powietrze usuwane. Następnie w cyklu nawiewnym oddaje zgromadzone ciepło strumieniu powietrza. Urządzenia często pracują parami: podczas gdy jedna jednostka nawiewa powietrze, druga je wywiewa, po czym następuje zmiana kierunku przepływu. Taki sposób pracy pomaga ograniczyć różnicę ciśnienia w budynku. Jednocześnie powoduje okresową zmianę kierunku i parametrów strugi w pomieszczeniu, co ma znaczenie zarówno dla efektywności wymiany powietrza, jak i lokalnego komfortu cieplnego (Wirnsberger i in., 2019; Zender-Świercz i in., 2022).

Problem komfortu cieplnego

Komfort cieplny jest wynikiem łącznego oddziaływania parametrów środowiskowych i indywidualnych. Do podstawowych wielkości środowiskowych należą temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, prędkość i wilgotność powietrza, natomiast po stronie użytkownika uwzględnia się aktywność metaboliczną i izolacyjność cieplną odzieży. Ogólną ocenę środowiska umiarkowanego prowadzi się najczęściej z wykorzystaniem wskaźników PMV i PPD, natomiast komfort lokalny ocenia się między innymi na podstawie ryzyka przeciągu, pionowej różnicy temperatury, asymetrii

temperatury promieniowania oraz temperatury podłogi (ISO, 2025; PKN, 2019).

W przypadku wentylacji naprzemiennej szczególnego znaczenia nabierają krótkotrwałe i lokalne zmiany temperatury oraz prędkości powietrza. Parametry uśrednione dla całego pomieszczenia lub pełnego cyklu pracy mogą nie ujawniać chwilowego wychłodzenia użytkownika znajdującego się w zasięgu strugi nawiewnej. Z tego względu ocena powinna obejmować nie tylko średnią temperaturę operatywną i wskaźniki PMV-PPD, lecz także przebieg parametrów podczas poszczególnych faz oraz pomiary w kilku odległościach od urządzenia. Potrzebę takiego podejścia potwierdzają wyniki badań wskazujące na przestrzenną niejednorodność wymiany powietrza oraz możliwość występowania dyskomfortu w pobliżu jednostki fasadowej (Auerswald i in., 2020; Zender-Świercz i in., 2022).

Cel i zakres artykułu

Celem artykułu jest uporządkowanie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego wpływu zdecentralizowanej wentylacji z naprzemiennym nawiewem i wywiewem na komfort cieplny w pomieszczeniach. Przegląd obejmuje zasadę działania urządzeń rewersyjnych, stosowane kryteria komfortu oraz wpływ długości cyklu, strumienia i temperatury powietrza nawiewanego, sprawności odzysku ciepła, warunków zewnętrznych i rozmieszczenia jednostek na komfort cieplny. Szczególną uwagę poświęcono lokalizacji urządzenia, kierunkowi doprowadzania powietrza i odległości użytkownika od strugi nawiewnej, ponieważ dotychczasowe badania wykazują silną zależność efektów wentylacji od warunków brzegowych i organizacji przepływu w pomieszczeniu (Auerswald i in., 2020; Carbonare i in., 2020; Pekdogan i in., 2021).

Metoda przeglądu literatury

Przegląd literatury przeprowadzono na podstawie publikacji odnalezionych w serwisach wydawców i repozytoriach naukowych, w tym ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, MDPI, BazTech, AIVC, IBPSA oraz Fraunhofer Publica. Wyszukiwanie prowadzono z wykorzystaniem anglojęzycznych słów kluczowych decentralised ventilation, push-pull ventilation, alternating supply and exhaust, reversible airflow, single-room heat recovery ventilation i thermal comfort, łączonych z hasłami dotyczącymi prędkości oraz temperatury powietrza, ryzyka przeciągu, lokalizacji urządzeń, skuteczności wymiany powietrza i odzysku ciepła. Analizę uzupełniono o publikacje wskazane w bibliografiach najważniejszych prac dotyczących wentylacji rewersyjnej (Amanowicz i in., 2023).

Do przeglądu włączano przede wszystkim recenzowane badania eksperymentalne, terenowe i numeryczne dotyczące zdecentralizowanych urządzeń z okresową zmianą kierunku przepływu. Warunkiem kwalifikacji było przedstawienie wyników związanych z komfortem cieplnym, temperaturą lub prędkością powietrza, skutecznością wentylacji, jakością powietrza wewnętrznego bądź odzyskiem ciepła. Z każdej pracy pozyskiwano informacje o rodzaju urządzenia, geometrii pomieszczenia, lokalizacji jednostki, strumieniu powietrza, długości cyklu, warunkach cieplnych oraz zastosowanej metodzie oceny. Ze względu na różnice pomiędzy stanowiskami badawczymi i sposobami przedstawiania wyników zastosowano porównawczą syntezę opisową i tabelaryczną, bez prowadzenia metaanalizy statystycznej (Grant & Booth, 2009).

Wyniki przeglądu literatury

Budowa i zasada działania zdecentralizowanych urządzeń rewersyjnych

Zdecentralizowane urządzenie rewersyjne jest zwykle montowane w otworze wykonanym w ścianie zewnętrznej i obsługuje pomieszczenie bez rozbudowanej sieci przewodów. Podstawowy tor przepływu obejmuje osłonę zewnętrzną, filtr, wentylator o zmiennym kierunku pracy, wymiennik akumulacyjny oraz osłonę wewnętrzną. W zależności od kierunku przepływu wymiennik pochłania ciepło z powietrza usuwanego albo oddaje je powietrzu nawiewanemu. W badaniach najczęściej stosowano ceramiczne wkłady o strukturze kanalikowej, chociaż analizowano także akumulatory aluminiowe (Carbonare i in., 2020; Wirnsberger i in., 2019).

Praca urządzenia ma charakter cykliczny i obejmuje naprzemienne fazy wywiewu i nawiewu. Czas pojedynczej fazy zależy od konstrukcji i sposobu sterowania urządzeniem. W badaniach systemów typu push-pull często stosowano zmianę kierunku przepływu po około 60–70 s, natomiast w eksperymentach dotyczących właściwości cieplnych analizowano również cykle kilkuminutowe. Wydłużenie fazy zwiększa objętość powietrza przepływającą w danym kierunku, ale jednocześnie prowadzi do stopniowego rozładowania akumulatora i zmiany temperatury nawiewu (Auerswald i in., 2020; Pekdogan i in., 2021).

W instalacjach mieszkaniowych jednostki rewersyjne są najczęściej łączone parami i sterowane przeciwfazowo, tj. gdy jedna pracuje w trybie nawiewu, druga pracuje w try-

bie wywiewu, a następnie urządzenia zamieniają funkcje. Para urządzeń może obsługiwać jedno pomieszczenie albo stworzyć przepływ między pomieszczeniami przez szczelinę pod drzwiami lub inny element transferowy. W badaniu mieszkania testowego zastosowano urządzenia o maksymalnym strumieniu $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, fazę przepływu trwającą 60 s i 10-sekundową przerwę przed zmianą kierunku. Są to jednak parametry konkretnego modelu; istotniejszym wnioskiem ogólnym jest konieczność zachowania równowagi nawiewu i wywiewu oraz zapewnienia swobodnego przepływu na drodze pomiędzy jednostkami (Wirnsberger i in., 2019).

Metody i wskaźniki oceny komfortu cieplnego

Ocena komfortu cieplnego nie opiera się wyłącznie na pomiarze temperatury powietrza – na odczucia użytkownika wpływają równocześnie temperatura powietrza i przegród, prędkość oraz wilgotność powietrza, a także aktywność fizyczna i izolacyjność cieplna odzieży. Aktualna norma ISO 7730:2025 rozróżnia ocenę ogólnego komfortu cieplnego, opartą przede wszystkim na wskaźnikach PMV i PPD, oraz ocenę dyskomfortu lokalnego, związane go między innymi z przeciągiem, pionowym zróżnicowaniem temperatury i asymetrią temperatury promieniowania (ISO, 2025).

Wskaźnik PMV, czyli przewidywana średnia ocena odczuć cieplnych, pozwala określić ogólne wrażenie cieplne grupy użytkowników, natomiast PPD oznacza przewidywany odsetek osób niezadowolonych z warunków cieplnych. Wartości te odnoszą się do całego organizmu i mogą nie ujawniać dyskomfortu występującego w obrębie wybranej części ciała. W pomieszczeniu z urządzeniem rewersyjnym użytkownik może zatem odczuwać chłodną strugę na wysokości głowy, karku albo kończyn dolnych, mimo że średnie warunki cieplne w centralnej części pomieszczenia wskazują na stan zbliżony do neutralnego (ISO, 2025; Tawackolian i in., 2020).

W przypadku wentylacji naprzemiennej szczególne znaczenie ma ryzyko przeciągu, określające udział użytkowników, którzy mogą negatywnie odbierać miejscowe ochłodzenie spowodowane ruchem powietrza. Na wartość tego wskaźnika wpływają temperatura, średnia prędkość oraz intensywność turbulencji powietrza. Ponieważ w urządzeniu rewersyjnym kierunek i prędkość przepływu zmieniają się cyklicznie, pomiar powinien być prowadzony z krokiem umożliwiającym rozpoznanie przebiegu pojedynczej fazy, zamiast średniej z kilkunastu minut lub całego cyklu pracy. Badania nawiewu przerywanego, choć nie dotyczyły bezpośrednio jednostek fasadowych, potwierdzają, że krótkotrwałe wzrosty prędkości mogą nasilać odczucie przeciągu, mimo że średnie parametry wskazują na warunki neutralne (ISO, 2025; Tawackolian i in., 2020).

Najważniejsze wielkości, które powinny być uwzględniane podczas oceny komfortu cieplnego w pomieszczeniu wyposażonym w wentylację naprzemienną, zestawiono w Tabeli 1. Zestawienie obejmuje zarówno parametry służące do oceny całego pomieszczenia, jak i wielkości pozwalające rozpoznać dyskomfort w bezpośrednim sąsiedztwie nawiewnika oraz w poszczególnych częściach strefy przebywania ludzi (ISO, 2025; Tawackolian i in., 2020; Zhou i in., 2023).

Tabela 1. Wskaźniki i parametry stosowane w ocenie komfortu cieplnego w pomieszczeniach z wentylacją naprzemienną. Źródło: opracowanie własne na podstawie ISO (2025), Tawackolian i in. (2020) i Zhou i in. (2023)

Table 1. Indicators and parameters used to assess thermal comfort in rooms with alternating ventilation. Source: authors' own study based on ISO (2025), Tawackolian i in. (2020) and Zhou i in. (2023)

Parametr lub wskaźnik	Znaczenie	Zastosowanie w ocenie wentylacji naprzemiennej
Temperatura powietrza, t_a	Temperatura powietrza w określonym punkcie pomiarowym	Umożliwia określenie chwilowego ochłodzenia podczas fazy nawiewu oraz różnic pomiędzy strefą nawiewnika i pozostałą częścią pomieszczenia
Średnia temperatura promieniowania, t_r	Wypadkowa oddziaływania ciepłego otaczających przegród	Pozwala uwzględnić wpływ chłodnej ściany zewnętrznej, okna i pozostałych powierzchni na odczucia użytkownika
Temperatura operatywna, t_{op}	Wielkość łącząca oddziaływanie temperatury powietrza i promieniowania	Służy do ogólnej oceny warunków cieplnych w strefie przebywania ludzi
Prędkość powietrza, v_a	Średnia lub chwilowa prędkość przepływu w punkcie	Określa zasięg strugi oraz umożliwia wskazanie miejsc narażonych na nadmierny ruch powietrza
Intensywność turbulencji, Tu	Miara zmienności prędkości powietrza	Jest potrzebna do oceny charakteru strugi i ryzyka przeciągu
PMV	Przewidywana średnia ocena odczuć cieplnych grupy użytkowników	Umożliwia porównanie ogólnego komfortu w różnych wariantach pracy urządzenia
PPD	Przewidywany procent osób niezadowolonych	Pozwala przedstawić wynik oceny komfortu w formie procentowej
Ryzyko przeciągu, DR	Przewidywany udział osób odczuwających miejscowe wychłodzenie wskutek ruchu powietrza	Ma podstawowe znaczenie w pobliżu jednostki i w osi strugi nawiewnej
Pionowa różnica temperatury	Różnica warunków cieplnych pomiędzy poziomem głowy i kończyn dolnych	Pozwala ocenić nierównomierność warunków w strefie przebywania ludzi
Oceny subiektywne użytkowników	Odczucia cieplne, komfortu, akceptacji ruchu powietrza i preferencji	Umożliwiają sprawdzenie, czy wskaźniki obliczeniowe prawidłowo odwzorowują reakcje osób w warunkach zmiennych

Tabela 2. Wpływ strumienia powietrza i długości cyklu na wybrane parametry pracy zdecentralizowanych urządzeń rewersyjnych. Źródło: opracowanie własne na podstawie Auerswald i in. (2020), Carbonare i in. (2020), Pekdogan i in. (2021) i Koper (2024)

Table 2. Influence of airflow rate and cycle duration on selected operating parameters of decentralised reversible ventilation units. Source: authors' own study based on Auerswald i in. (2020), Carbonare i in. (2020), Pekdogan i in. (2021) and Koper (2024)

Publikacja	Analizowane parametry	Najważniejszy wynik
Auerswald i in. (2020)	Dwie jednostki push-pull, zmienne warunki cieplne, strumień w przykładowym wariancie $28 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Nominalny strumień nie przesądzał o równomiernej wymianie; efektywność wzrosła maksymalnie do około 0,6 po zastosowaniu źródła ciepła o mocy 300 W
Carbonare i in. (2020)	Fazy 60 i 180 s; 50 i 100% prędkości obrotowej wentylatora	Dla fazy 60 s uzyskano sprawność 83% przy połowie prędkości obrotowej i 75% przy pełnej prędkości obrotowej; dla 180 s odpowiednio 80 i 66%
Pekdogan i in. (2021)	Czas pracy 2, 5, 7,5 i 10 min; ceramiczny akumulator	Najlepsze parametry uzyskano dla 2 min: sprawność nawiewu 82%, sprawność wywiewu 67%
Koper (2024)	Regulacja prędkości wentylatora lub długości cyklu na podstawie sygnałów z czujników	Obie strategie zbilansowały strumienie nawiewu i wywiewu, a sprawność odzysku wzrosła o ponad 10% względem trybu standardowego

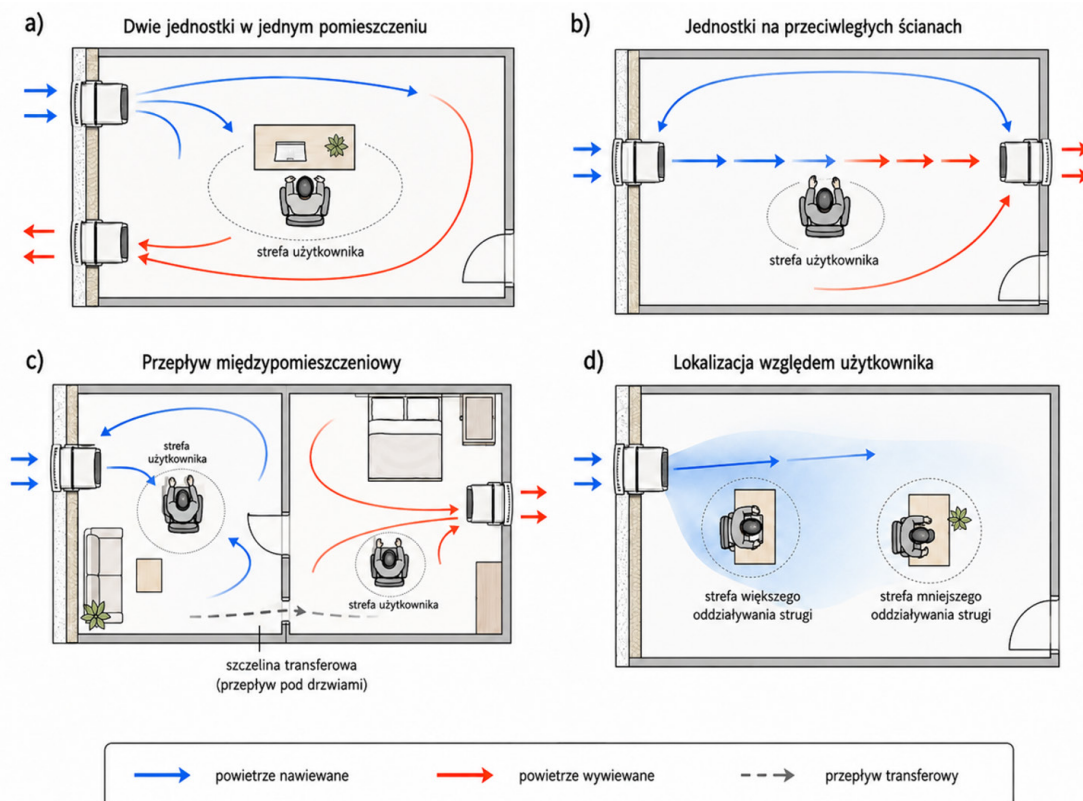
W badaniach dotyczących jednostki fasadowej bez wymiennika odzysku ciepła i bez nagrzewnicy wykazano, że prawidłowa temperatura w centralnej części pomieszczenia nie gwarantowała komfortu w pobliżu urządzenia. W odległości 70 cm od otworu nawiewno-wywiewnego uzyskano wartości PMV od $-4,1$ do $-1,6$, którym odpowiadały wartości PPD od 54,8 do 100%. Wyniki wskazują, że punkty pomiarowe powinny być rozmieszczane nie tylko w środku pomieszczenia, ale również w osi strugi i w przewidywanych miejscach przebywania użytkowników (Zender-Świercz i in., 2022).

Wpływ strumienia powietrza i długości cyklu pracy

Strumień powietrza i długość cyklu wpływają jednocześnie na skuteczność wymiany, temperaturę nawiewu i odzysk ciepła. Zwiększenie wydajności może poprawiać usuwanie zanieczyszczeń, lecz zwiększa prędkość

strugi, natomiast wydłużenie fazy sprzyja rozładowaniu akumulatora. Wyniki najważniejszych badań zestawiono w Tabeli 2 (Auerswald i in., 2020; Carbonare i in., 2020; Pekdogan i in., 2021).

Z punktu widzenia komfortu cieplnego zwiększanie wydajności lub wydłużanie fazy nawiewu wymaga ostrożności. Większy strumień może zwiększyć zasięg strugi i skuteczniej usuwać zanieczyszczenia, ale jednocześnie podnosi prędkość powietrza w strefie przebywania ludzi. Z kolei podczas długiej fazy nawiewu temperatura powietrza za wymiennikiem akumulacyjnym powinna być oceniana łącznie: na podstawie rzeczywistej wymiany powietrza, przebiegu temperatury nawiewu, sprawności odzysku ciepła i lokalnego ryzyka przeciągu, a nie tylko w odniesieniu do nominalnego strumienia podawanego dla urządzenia (Auerswald i in., 2020; Carbonare i in., 2020; Pekdogan i in., 2021).



Rysunek 2. Przykładowe warianty rozmieszczenia zdecentralizowanych urządzeń rewersyjnych i organizacji przepływu powietrza.
Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Examples of reversible decentralised ventilation unit arrangements and airflow organisation. Source: authors' own study

Temperatura powietrza nawiewanego i odzysk ciepła

Cykliczny przebieg temperatury potwierdzono w badaniach ceramicznego regeneratora prowadzonych w rzeczywistych warunkach sezonu grzewczego. Niemierka i Jadwiszczak (2023) rozróżnili chwilową, cykliczną i długookresową efektywność cieplną urządzenia. Efektywność chwilowa była najwyższa bezpośrednio po rozpoczęciu nawiewu, po czym zmniejszała się od wartości zbliżonej do 100% do około 63–67% pod koniec fazy, zależnie od temperatury zewnętrznej. Średnia efektywność określona dla całej fazy nawiewu wyniosła 80–81%, natomiast w dłuższym okresie pracy osiągała 62–63%. Różnice te pokazują, że pojedyncza wartość sprawności nie opisuje w pełni temperatury powietrza, z którą użytkownik ma kontakt podczas całego cyklu urządzenia (Niemierka & Jadwiszczak, 2023).

Ocena odzysku ciepła powinna obejmować nie tylko wartość średnią, lecz także minimalną temperaturę nawiewu i jej zmienność w cyklu. Pojedynczy wskaźnik sprawności może prowadzić do zbyt optymistycznej oceny warunków odczuwanych przez użytkownika, zwłaszcza pod koniec fazy nawiewu (Niemierka & Jadwiszczak, 2023).

Lokalizacja urządzenia i sposób doprowadzania powietrza

Rozmieszczenie jednostek rewersyjnych wpływa na rzeczywistą drogę przepływu powietrza i możliwość wystąpienia krótkiego spięcia pomiędzy nawiewem i wywiewem. W badaniach komorowych z dwiema jednostkami fasadowymi lokalna skuteczność wymiany zmieniała się zależnie od odległości punktu pomiarowego od otworów oraz od różnicy temperatury pomiędzy wnętrzem i otoczeniem. W większości analizowanych wariantów ogólna

efektywność wymiany była niższa od 0,5, co wskazywało, że część świeżego powietrza nie docierała równomiernie do całej objętości pomieszczenia (Auerswald i in., 2020).

Przykładowe warianty rozmieszczenia urządzeń oraz organizacji przepływu powietrza przedstawiono na Rysunku 2. Znaczenie organizacji przepływu potwierdzono w mieszkaniu badawczym o powierzchni 70 m², w którym urządzenia zamontowano na wysokości 1,7 m. Porównano układ pokojowy, w którym para jednostek obsługiwała jedno pomieszczenie oraz układ międzypomieszczeniowy, wykorzystujący szczelinę transferową pod drzwiami. Dla całego mieszkania przyjęcie układu międzypomieszczeniowego obniżyło średni wiek powietrza z 2,2 do 2,0 h i zwiększyło efektywność wymiany z 0,33 do 0,36. Układ pokojowy był jednak korzystniejszy dla warunków panujących w samej sypialni, w której średni wiek powietrza wynosił 1,6 h wobec 1,8 h w wariancie międzypomieszczeniowym (Wirnsberger i in., 2019).

Wyniki nie wskazują jednej uniwersalnej lokalizacji urządzeń. Rozwiązanie korzystne dla intensywnej wentylacji pojedynczego pomieszczenia może powodować słabszą wymianę w dalszych częściach mieszkania, natomiast przepływ międzypomieszczeniowy poprawia równomierność kosztem nieznacznego pogorszenia warunków w wybranej strefie. W analizowanych pracach wysokość montażu i kierunek wypływu były najczęściej przyjmowane jako parametry stałe, a nie warianty porównawcze. Uzasadnia to prowadzenie badań obejmujących położenie urządzenia na ścianie, kierunek strugi, odległość od użytkownika oraz współdziałanie z drogami transferu powietrza i systemem ogrzewania (Auerswald i in., 2020; Wirnsberger i in., 2019).

Wpływ warunków zewnętrznych i różnicy ciśnienia

Siła wiatr oraz efekt kominowy powodują różnicę ciśnienia po obu stronach przegrody, która może zaburzać równowagę nawiewu i wywiewu. W badaniu komorowym przy różnicy ciśnienia 30 Pa strumień powietrza podczas wywiewu zmniejszył się nawet o $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, a sprawność odzysku ciepła spadła z około 96% do 76%. Urządzenie dostarczało wówczas więcej powietrza niż usuwało, co w sezonie grzewczym może zwiększać ryzyko nawiewania chłodnego powietrza do pomieszczenia (Zemitis i in., 2024).

Podatność urządzenia na warunki ciśnieniowe zależy między innymi od rodzaju wentylatora. W symulacjach uwzględniających wyłącznie oddziaływanie wiatru odzysk ciepła zmniejszał się maksymalnie o 8% dla urządzeń z wentylatorami promieniowymi i o 22% dla jednostek z wentylatorami osiowymi. Po równoczesnym uwzględnieniu efektu kominowego spadki osiągały odpowiednio 20 i 52%. Wentylatory osiowe, często stosowane w kompaktowych jednostkach ściennych, okazały się zatem bardziej wrażliwe na zmienne ciśnienie zewnętrzne (Filis i in., 2021).

W pomiarach prowadzonych w rzeczywistym mieszkaniu, przy stosunkowo łagodnych warunkach pogodowych i małej prędkości wiatru, nie stwierdzono jednoznacznej zależności efektywności wentylacji od temperatury zewnętrznej lub wiatru. Widoczny był jednak wpływ nierównoważenia instalacji, tj. uruchomienie dodatkowego wentylatora wywiewnego obniżyło efektywność wymiany powietrza z około 0,48 do wartości poniżej 0,39. Oznacza to, że wpływ pogody należy analizować łącznie ze szczelnością budynku, pracą pozostałych wentylatorów oraz rzeczywistą różnicą ciśnienia na elewacji (Auerswald i in., 2022).

Jakość powietrza wewnętrznego a komfort cieplny

Ocena wentylacji rewersyjnej powinna obejmować jednocześnie jakość powietrza i warunki cieplne. Zwiększenie strumienia powietrza sprzyja ograniczeniu stężenia CO_2 , lecz może zwiększać prędkość strugi w strefie przebywania ludzi oraz obniżać temperaturę nawiewu pod koniec cyklu. Parametry urządzenia nie powinny być zatem dobierane wyłącznie na podstawie wymaganej wymiany powietrza albo sprawności odzysku ciepła (Carbonare i in., 2020; Tawackolian i in., 2020).

W badaniu urządzenia rewersyjnego określono wydajność konieczną do utrzymania stężenia CO_2 poniżej 1000 ppm przy różnej liczbie użytkowników. Dla jednej osoby wymagany strumień wynosił około $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, dla dwóch osób $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, natomiast dla pięciu osób przekraczał $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Wyniki dotyczą konkretnego pomieszczenia i urządzenia, ale wskazują, że kompaktowe jednostki o niewielkiej wydajności mogą nie zapewniać odpowiedniej jakości powietrza przy dużym zagęszczeniu użytkowników (Monarkin, 2023).

Zwiększanie wydajności urządzenia nie może jednak odbywać się kosztem lokalnego komfortu. W badaniach wentylacji przerywanej wzrost prędkości i czasu oddziaływania strugi zwiększał odczucie przeciągu, mimo utrzymywania neutralnej temperatury ogólnej w pomieszczeniu. Z tego względu sterowanie zależne od stężenia CO_2 powinno uwzględniać również temperaturę nawiewu i ograniczenie prędkości powietrza w strefie użytkownika. Najkorzystniejszy wariant powinien utrzymywać wymagane stężenie CO_2 przy możliwie małym ryzyku miejscowego wychłodzenia (Monarkin, 2023; Tawackolian i in., 2020).

Wpływ sposobu ogrzewania i obciążeń cieplnych pomieszczenia

Chociaż badanie Sobhi i Khalila (2019) nie dotyczyło bezpośrednio wentylacji rewersyjnej, wykazało, że sposób ogrzewania wpływa na konwekcję naturalną, pionowy rozkład temperatury oraz kierunek przemieszczania się strugi wentylacyjnej. W analizie CFD pomieszczenia wentylowanego przy krotności wymiany 6 h^{-1} porównano ogrzewanie podłogowe, ściennie oraz grzejniki średnio- i wysokotemperaturowe. Ogrzewanie powierzchniowe zapewniało bardziej równomierny rozkład temperatury i mniejszy pionowy gradient niż ogrzewanie grzejnikowe, chociaż we wszystkich wariantach wartości PMV i PPD mieściły się w przyjętym zakresie komfortu (Sobhi & Khalil, 2019).

Wpływ wewnętrznych zysków ciepła stwierdzono również bezpośrednio w badaniach urządzeń typu push-pull. W warunkach izotermicznych ogólna efektywność wymiany powietrza była niższa od 0,5, natomiast umieszczenie w pomieszczeniu manekina termicznego o mocy 300 W zwiększyło ją maksymalnie do około 0,6. Powstająca struga konwekcyjna zmieniała rozkład przepływu i poprawiała transport powietrza poza bezpośrednie sąsiedztwo jednostek (Auerswald i in., 2020).

Dostępne wyniki wskazują, że lokalizacja urządzenia nie powinna być analizowana niezależnie od źródeł ciepła. Grzejnik umieszczony pod oknem może wzmacniać ruch konwekcyjny przy ścianie zewnętrznej, natomiast ogrzewanie podłogowe tworzy bardziej rozproszony strumień wznoszący. W literaturze dotyczącej wentylacji rewersyjnej sposób ogrzewania jest jednak zwykle traktowany jako stały warunek brzegowy, a nie jako porównywany wariant. Brakuje zwłaszcza badań zestawiających różne położenia nawiewnika przy ogrzewaniu grzejnikowym i podłogowym oraz przy zmiennej obecności użytkowników (Auerswald i in., 2020; Sobhi & Khalil, 2019).

Dyskusja

Najważniejsze ustalenia wynikające z dotychczasowych badań

Z przeprowadzonego przeglądu wynika, że ocena zdecentralizowanej wentylacji rewersyjnej nie powinna ograniczać się do nominalnego strumienia powietrza ani średniej sprawności odzysku ciepła. O komforcie użytkownika decydują także zmienność temperatury nawiewu w obrębie cyklu, zasięg strugi oraz równomierność wymiany powietrza. Krótsze cykle mogą sprzyjać utrzymaniu wyższej temperatury nawiewu, natomiast zwiększenie wydajności poprawia usuwanie zanieczyszczeń, ale może nasilać lokalne odczucie przeciągu. Dobór parametrów pracy wymaga więc równoczesnego uwzględnienia jakości powietrza, odzysku ciepła i komfortu lokalnego (Auerswald i in., 2020; Carbonare i in., 2020; Pekdogan i in., 2021).

Rozbieżności pomiędzy wynikami publikacji

Różnice pomiędzy wynikami poszczególnych prac wynikają głównie z odmiennych konstrukcji urządzeń, długości cyklu, warunków cieplnych oraz sposobu rozmieszczenia punktów pomiarowych. W badaniach komorowych efektywność wymiany zależała od obecności źródła ciepła, natomiast w analizach całego mieszkania istotne były drogi przepływu pomiędzy pomieszczeniami. Rozbieżne

wartości sprawności odzysku mogą ponadto wynikać z przyjęcia chwilowej, cyklicznej albo długookresowej definicji wskaźnika. Bez uwzględnienia metodyki i warunków brzegowych bezpośrednie porównywanie pojedynczych wartości liczbowych może prowadzić do błędnych wniosków (Auerswald i in., 2020; Carbonare i in., 2020; Wirnsberger i in., 2019).

Ograniczenia dotychczasowych metod badawczych

W wielu analizowanych pracach lokalizacja i wysokość montażu urządzenia były przyjmowane jako stałe, a nie jako porównywane warianty. Badania laboratoryjne zapewniały kontrolowane warunki, lecz nie zawsze odwzorowywały wpływ wiatru, efektu kominowego, zachowania użytkowników i współpracy z innymi wentylatorami. Z kolei badania terenowe obejmowały zwykle konkretny układ pomieszczeń i urządzeń, co ogranicza możliwość uogólnienia rezultatów. Niewiele opracowań łączyło pomiary chwilowej prędkości i temperatury powietrza z oceną komfortu użytkowników oraz analizą całego cyklu nawiewu i wywiewu (Auerswald i in., 2020; Wirnsberger i in., 2019; Zemitis i in., 2024).

Luki badawcze

Najważniejsza zidentyfikowana luka badawcza dotyczy braku porównawczych badań lokalizacji urządzenia i sposobu wprowadzania powietrza prowadzonych przy jednakowych warunkach brzegowych. Niedostatecznie rozpoznany jest łączny wpływ wysokości montażu, kierunku nawiewu lub wywiewu strugi, odległości użytkownika, sposobu ogrzewania i różnicy ciśnienia na komfort lokalny. Jak wynika z przeglądu wielu publikacji – w literaturze częściej analizowane są pojedyncze urządzenie lub konkretny układ mieszkania niż systematycznie porównuje kilka wariantów rozmieszczenia (Auerswald i in., 2020; Wirnsberger i in., 2019; Zemitis i in., 2024).

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu można stwierdzić, że zdecentralizowana wentylacja o naprzemiennym nawiewie i wywiewie może zapewniać kontrolowaną wymianę powietrza przy jednoczesnym ograniczeniu strat ciepła. Nominalny strumień powietrza i deklarowana sprawność odzysku ciepła nie są jednak wystarczające do pełnej oceny działania systemu, ponieważ istotne znaczenie mają również organizacja przepływu oraz rzeczywiste warunki pracy urządzenia.

Temperatura powietrza nawiewanego i sprawność odzysku ciepła zmieniają się w trakcie cyklu pracy. Krótsze fazy mogą ograniczać wychłodzenie akumulatora, natomiast zwiększenie strumienia lub wydłużenie fazy nawiewu może prowadzić do obniżenia temperatury powietrza doprowadzanego do pomieszczenia oraz wzrostu ryzyka lokalnego dyskomfortu. Ocena komfortu powinna więc obejmować nie tylko wartości uśrednione, lecz także chwilową temperaturę i prędkość powietrza, wskaźniki PMV i PPD oraz ryzyko przeciągu.

Lokalizacja jednostek oraz sposób organizacji przepływu pomiędzy pomieszczeniami wpływają na wiek powietrza i równomierność wentylacji. Układ korzystny dla pojedynczego pomieszczenia nie musi zapewniać najlepszych wa-

runków w całym mieszkaniu, dlatego dobór konfiguracji powinien uwzględniać geometrię pomieszczeń, miejsca przebywania użytkowników oraz drogi przepływu transferowego.

Na działanie urządzeń wpływają również warunki zewnętrzne, w szczególności wiatr, efekt kominowy i związane z nimi różnice ciśnienia. Mogą one powodować nierównowagę pomiędzy nawiewem i wywiewem, a tym samym zmieniać strumień powietrza i rzeczywistą sprawność odzysku ciepła. Z tego względu ocena urządzeń powinna obejmować także warunki odpowiadające ich rzeczywistej eksploatacji w budynkach.

Najważniejszą zidentyfikowaną luką badawczą jest brak porównawczych analiz różnych wysokości i miejsc montażu urządzeń, kierunku strugi oraz odległości użytkownika od nawiewnika prowadzonych w jednakowych warunkach brzegowych. Dalsze badania powinny łączyć przestrzenne pomiary parametrów cieplnych z oceną skuteczności wymiany powietrza oraz uwzględniać długość cyklu, sposób ogrzewania i zmienne warunki zewnętrzne, co pozwoli wskazać rozwiązania zapewniające korzystny kompromis pomiędzy jakością powietrza, odzyskiem ciepła i komfortem cieplnym.

Bibliografia

- 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>
- Auerswald, S., Devineni, R., Pflug, T., & Bongs, C. (2022). Ventilation effectiveness of alternating façade-integrated ventilation devices in a dwelling. W: *Transitioning from IAQ to IEQ: IAQ 2020 Indoor Environmental Quality Performance Approaches*. ASHRAE. <https://doi.org/10.24406/h-441343>
- Auerswald, S., Hörberg, C., Pflug, T., Pfafferott, J., Bongs, C., & Henning, H.-M. (2020). Experimental investigation of the air exchange effectiveness of push-pull ventilation devices. *Energies*, 13(21), 5817. <https://doi.org/10.3390/en13215817>
- Carbonare, N., Fugmann, H., Asadov, N., Pflug, T., Schnabel, L., & Bongs, C. (2020). Simulation and measurement of energetic performance in decentralized regenerative ventilation systems. *Energies*, 13(22), 6010. <https://doi.org/10.3390/en13226010>
- Filis, V., Kolarik, J., & Smith, K. M. (2021). The impact of wind pressure and stack effect on the performance of room ventilation units with heat recovery. *Energy and Buildings*, 234, 110689. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110689>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- ISO. (2025). ISO 7730:2025 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization <https://www.iso.org/standard/85803.html>
- Koper, P. (2024). Influence of control strategy on heat recove-

- ry efficiency in a single-duct periodic ventilation device. *Energies*, 17(22), 5801. <https://doi.org/10.3390/en17225801>
- Monarkin, N. (2023). Reversible decentralized ventilation: Experimental determination of efficiency by carbon dioxide level. *Journal of Building Engineering*, 78, 107675. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107675>
- Niemierka, E., & Jadwiszczak, P. (2023). Experimental investigation of a ceramic heat regenerator for heat recovery in a decentralized reversible ventilation system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 146, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106899>
- Pekdogan, T., Tokuç, A., Ezan, M. A., & Başaran, T. (2021). Experimental investigation of a decentralized heat recovery ventilation system. *Journal of Building Engineering*, 35, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102009>
- PKN. (2019). PN-EN 16798-1:2019-06. Charakterystyka energetyczna budynków — Wentylacja budynków — Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki — Moduł M1-6. Polski Komitet Normalizacyjny.
- Sobhi, M., & Khalil, E. E. (2019). CFD investigation of air flow patterns and thermal comfort in a room with diverse heating systems. *Current Environmental Engineering*, 6(2), 150–158. <https://doi.org/10.2174/2212717806666190527090231>
- Tawackolian, K., Lichtner, E., & Kriegel, M. (2020). Draught perception in intermittent ventilation at neutral room temperature. *Energy and Buildings*, 224, 110268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110268>
- Wirnsberger, M., Buttinger, F., & Krause, H. (2019). Ventilation efficiency of push-pull ventilation systems in residential buildings—CFD simulation and validation of the model with measurements in a research apartment. W: *Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Building Simulation 2019* (s. 785–790). *International Building Performance Simulation Association*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211281>
- Zemitis, J., Bogdanovics, R., Prozuments, A., & Borodinecs, A. (2024). Study of pressure difference influence on air flow, heat recovery efficiency and acoustic performance of a local decentralized ventilation device. *Journal of Building Engineering*, 86, 108900. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108900>
- Zender-Świercz, E. (2020). Microclimate in rooms equipped with decentralized façade ventilation device. *Atmosphere*, 11(8), 800. <https://doi.org/10.3390/atmos11080800>
- Zender-Świercz, E. (2021a). Assessment of indoor air parameters in building equipped with decentralised façade ventilation device. *Energies*, 14(4), 1176. <https://doi.org/10.3390/en14041176>
- Zender-Świercz, E. (2021b). Review of IAQ in premises equipped with façade-ventilation systems. *Atmosphere*, 12(2), 220. <https://doi.org/10.3390/atmos12020220>
- Zender-Świercz, E., Telejko, M., Galiszewska, B., & Starzomska, M. (2022). Assessment of thermal comfort in rooms equipped with a decentralised façade ventilation unit. *Energies*, 15(19), 7032. <https://doi.org/10.3390/en15197032>
- Zhou, B., Li, Z., Yang, B., Li, X., Wang, F., & Wei, S. (2023). Thermal and draught perception in fluctuating stratified thermal environments with intermittent impinging jet ventilation. *Building and Environment*, 229, 109934. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109934>

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.



**22-23 PAŹDZIERNIKA 2026, TRESNA
HOTEL LAKE VIEW ŻYWIEC RESORT & SPA**

<https://pzits.krakow.pl/konferencja-2026/>



**CIEPŁOWNICTWO I OGRZEWNICTWO
– DROGA DO DEKARBONIZACJI**



**WENTYLACJA I KLIMATYZACJA
– KOMFORT, ZDROWIE**



**ŚRODOWISKO
I GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO**



NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE