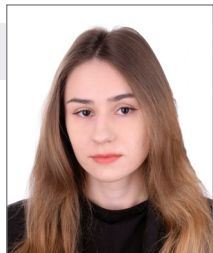




Zdecentralizowane systemy wentylacji fasadowej – przegląd literatury

Decentralized façade ventilation systems – a literature review



Mgr inż. Kinga Kujawska

ORCID ID: 0009-0009-7503-2502

Absolwentka

Wydział Inżynierii Środowiska,

Geodezji i Energetyki Odnawialnej

Politechnika Świętokrzyska

kujawskakinga4@gmail.com

Słowa kluczowe: wentylacja zdecentralizowana, wentylacja fasadowa, naprzemienny nawiew/wywiew, odzysk ciepła, jakość powietrza wewnętrznego, PCM

Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat zdecentralizowanych systemów wentylacji fasadowej, w szczególności w aspekcie efektywności odzysku ciepła oraz wpływu warunków zewnętrznych na pracę takich urządzeń. Analizie poddano artykuły naukowe oraz materiały konferencyjne dotyczące zdecentralizowanych systemów wentylacji fasadowej z ostatnich 11 lat, które wyszukiwano w wybranych bazach naukowych. Publikacje wyselekcjonowano na podstawie określonych kryteriów, obejmujących m.in.: dostępność pełnego tekstu („open access”) oraz skupienie na materiałach opublikowanych w języku polskim i angielskim. Wyszukiwanie artykułów przeprowadzono z wykorzystaniem odpowiednio dobranych słów kluczowych. Wyselekcjonowane publikacje podzielono na kilka części tematycznych, które obejmowały: efektywność energetyczną urządzeń fasadowych, utrzymanie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego, efektywność odzysku ciepła, wpływ czynników zewnętrznych na pracę tego typu urządzeń oraz ich wady. Przegląd literatury pozwolił stwierdzić, że systemy wentylacji zdecentralizowanej stanowią efektywne rozwiązanie pozwalające utrzymać odpowiednie warunki wewnętrzne w obiektach. Istotnym problemem jest natomiast wpływ niekorzystnych czynników zewnętrznych, które mogą obniżać sprawność odzysku ciepła oraz wpływać na wielkość strumienia powietrza.

Keywords: decentralized ventilation, façade ventilation, alternative supply/exhaust airflow, heat recovery, indoor air quality, PCM
Abstract

The aim of this article is to present the current state of knowledge on decentralized façade ventilation systems, particularly with regard to the efficiency of heat recovery and the impact of external conditions on the operation of such systems. The analysis covered articles and conference papers of decentralized façade ventilation systems from the last 11 years, which were obtained from selected databases. The publications were selected on the basis of specific criteria, including, amongst others: the availability of the full text (“open access”), and materials published in Polish and English. The search for articles was carried out using appropriately selected keywords. The selected publications were divided into several thematic sections, which included: the energy efficiency of façade systems, the ability to maintain appropriate indoor air quality, heat recovery efficiency, the impact of external factors on the operating of this type of systems and their disadvantages. A review of the literature has shown that decentralised ventilation systems are an effective solution for maintaining suitable indoor conditions. A significant problem is the impact of adverse external conditions, which can reduce the efficiency of heat recovery and affect the air flow rate.

Wstęp i cel

Współczesny człowiek spędza zdecydowaną większość swojego życia wewnątrz budynków (Mannan & Al-Ghamdi, 2021). Z tego powodu zapewnienie we wnętrzach odpowiednich warunków mikroklimatycznych ma kluczowe znaczenie dla zdrowia i komfortu przebywających w nich użytkowników. W celu utrzymania właściwej jakości środowiska wewnętrznego, pomieszczenia powinny być właściwie wentylowane – zapewnienie odpowiedniej wymiany powietrza umożliwia utrzymanie prawidłowych

parametrów powietrza wewnętrznego, takich jak temperatura, wilgotność względna oraz stężenie zanieczyszczeń, a także ogranicza rozwój i rozprzestrzenianie się mikroorganizmów mogących mieć negatywny wpływ na ludzkie zdrowie (Pekdogan i in., 2020). Obecne trendy dotyczące zwiększania efektywności energetycznej budynków sprawiają, że nowe obiekty są bardzo szczelne, co z jednej strony ogranicza straty ciepła (Zender-Świercz, 2020), ale w konsekwencji tych działań, wymiana powietrza przez nieszczelności budynku, zachodząca wskutek różnicy ciśnienia pomiędzy środowiskiem wewnętrznym

i zewnętrznym, zostaje istotnie ograniczona (Pekdogan i in., 2020). W przypadku nowo wznoszonych obiektów, problem niewystarczającej wymiany powietrza można łatwo rozwiązać, stosując system wentylacji centralnej. Wówczas, wszelkie niezbędne rozwiązania konstrukcyjne i instalacyjne mogą zostać uwzględnione już na etapie projektowania budynku. Z kolei, w przypadku obiektów poddawanych termomodernizacji, często niemożliwe jest rozprowadzenie rozległej instalacji wentylacji centralnej z uwagi na brak miejsca (Zender-Świercz, 2020; Koper, 2024). Najprostszym i najtańszym rozwiązaniem tego problemu jest wykonanie dodatkowych otworów wentylacji naturalnej. Opcja ta, nie jest jednak w pełni polecana z uwagi na ryzyko wychładzania pomieszczeń (Zender-Świercz, 2020a, 2020b). W takich przypadkach efektywną alternatywę może stanowić zastosowanie zdecentralizowanych systemów wentylacji, służących do wymiany powietrza w pojedynczych pomieszczeniach lub strefach budynku (Amanowicz i in., 2019; Davidson i in., 2022; Pomorski & Kim, 2023). Systemy te dzieli się na urządzenia pracujące w sposób ciągły, które wyposażone są w dwa wentylatory oraz na urządzenia pracujące w cyklach naprzemiennego nawiewu i wywiewu powietrza (Amanowicz i in., 2019). Takie urządzenia posiadają kompaktowe rozmiary i są montowane w fasadzie budynku (Davidsson & Chowdary, 2022; Pomorski & Kim, 2023; Koper i in., 2020; Amanowicz i in. 2023). Najczęściej stosuje się je parami i umieszcza po przeciwległych stronach pomieszczenia (Amanowicz i in., 2019). Pracują one naprzemiennie – gdy jedno z nich działa w trybie nawiewu, drugie pracuje w trybie wywiewu. Obecne rozwiązania komercyjne wykorzystują najczęściej wentylator rewersyjny, który umożliwia zmianę kierunku przepływu powietrza po upływie określonego czasu. W literaturze spotyka się również urządzenia wykorzystujące układ przepustnic otwierających i zamykających się w odpowiedniej sekwencji, co umożliwia zmianę cykli pracy (Zender-Świercz, 2021).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat zdecentralizowanych systemów wentylacji fasadowej na podstawie dostępnej literatury naukowej. Analizie poddano aspekty dotyczące efektywności energetycznej tego typu systemów, ich możliwości utrzymania odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego, efektywność odzysku ciepła przy zastosowaniu różnych wymienników ciepła oraz wpływ czynników zewnętrznych na pracę urządzeń fasadowych.

Metodologia

Analiza literatury obejmowała artykuły naukowe i materiały konferencyjne identyfikowane za pomocą numeru DOI oraz książki posiadające numer ISBN. Podczas przeglądu literatury uwzględniono publikacje wydane w latach 2015–2026. Korzystano z baz naukowych, takich jak Research Gate, Science Direct, MDPI, Google Scholar. Podczas wyszukiwania publikacji przyjęto następujące kryteria kwalifikacji:

- dostępność pełnego tekstu (tzw. „open access”),
- publikacja w języku polskim lub angielskim,
- materiały opublikowane w analizowanym okresie czasu (2015–2026),
- materiały mające bezpośredni związek z zagadnieniem zdecentralizowanych systemów wentylacji fasadowej

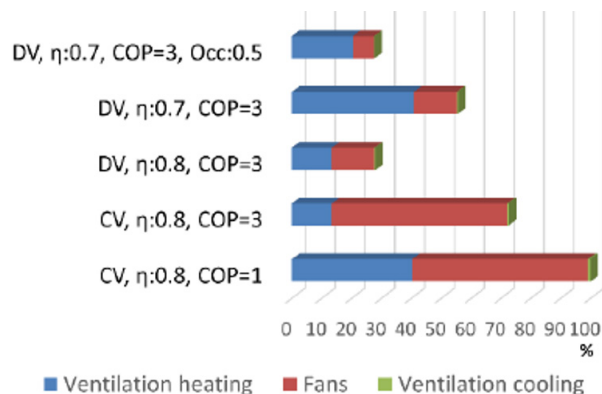
(w szczególności w kontekście jakości powietrza wewnętrznego oraz efektywności odzysku ciepła).

Wyszukiwanie przeprowadzono dla określonych słów kluczowych, takich jak: *decentralized ventilation, decentralized façade ventilation, decentralized heat recovery, single room ventilation unit, single duct ventilation, façade ventilation, alternative supply/exhaust airflow, decentralna wentylacja, wentylacja zdecentralizowana, wentylacja fasadowa, naprzemienny nawiew/wywiew, jednorurowe urządzenia wentylacyjne*. Wyniki wyszukiwania poddano analizie pod kątem zgodności tematycznej. Następnie wyselekcjonowano najbardziej reprezentatywne artykuły, które poddano szczegółowej analizie. Ostatecznie liczba publikacji, które wykorzystano do przeglądu literaturowego wyniosła 28 pozycji. Przegląd literatury podzielono na kilka bloków tematycznych obejmujących: efektywność energetyczną urządzeń fasadowych, jakość powietrza wewnętrznego, efektywność odzysku ciepła, ich wady oraz wpływ różnic ciśnienia na pracę takich systemów.

Przegląd literatury

Efektywność energetyczna

Badania na temat efektywności energetycznej systemów wentylacji zdecentralizowanej bazują głównie na porównaniu ich pracy z systemami wentylacji centralnej. Przykładem takich badań jest publikacja konferencyjna (Pomorski & Kim, 2023), opisująca wyniki symulacji, której celem było określenie zużycia energii do napędu wentylatora w systemie wentylacji zdecentralizowanej i centralnej z odzyskiem ciepła. Symulację wykonano dla mieszkania zlokalizowanego w Oslo w Norwegii. Przeanalizowano różne warianty systemów, różniące się sprawnością odzysku ciepła oraz wartością współczynnika efektywności zainstalowanej pompy ciepła. Wyniki wykazały, że zapotrzebowanie na energię było niższe w przypadku systemu zdecentralizowanego (Rysunek 1). Zaobserwowano również, że system wentylacji zdecentralizowanej charakteryzuje się mniejszym spadkiem ciśnienia, co ma bezpośredni związek z krótką drogą dystrybucji powietrza.



Rysunek 1. Porównanie różnych wariantów wentylacyjnych w budynku mieszkalnym w Oslo: CV (wentylacja centralna), DV (wentylacja zdecentralizowana), η (sprawność odzysku ciepła (0:zero–1:sto procent)), Occ (wskaźnik obecności (0–1)) (tłumaczenie własne). (Pomorski & Kim, 2023)

Figure 1. Comparisons of different ventilation strategies at a residential building in Oslo: CV (centralized ventilation), DV (decentralized ventilation), η (heat recovery unit efficiency (0:zero–1:hundred percent)), Occ (occupancy ratio (0–1)). (Pomorski & Kim, 2023)

Innym przykładem publikacji porównującej efektywność energetyczną systemów wentylacji zdecentralizowanej i centralnej jest artykuł (Kim i in., 2024). Badania opierały się na symulacji numerycznej dla modelowego pomieszczenia biurowego zlokalizowanego w trzech miastach w Norwegii – Oslo, Bergen i Kirkenes. Wyniki wykazały, że systemy wentylacji zdecentralizowanej z wysoką efektywnością odzysku ciepła mają niższe zapotrzebowanie na energię do napędu wentylatora oraz ogrzewania i chłodzenia powietrza wentylacyjnego. System wentylacji zdecentralizowanej o sprawności odzysku ciepła równemu 70%, przyczynił się do zaoszczędzenia 14,5% całkowitej energii niezbędnej do pokrycia potrzeb HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) w porównaniu do systemu wentylacji centralnej.

Komfort termiczny

Jednym z zagadnień podejmowanych w literaturze dotyczącej zdecentralizowanych systemów wentylacji jest ich wpływ na komfort cieplny użytkowników. Zender-Świercz (2020a) prowadziła badania w pomieszczeniu biurowym wyposażonym w zdecentralizowany system wentylacyjny. Ocenę komfortu cieplnego przeprowadzano w strefie pracy oraz w centralnej części pomieszczenia. Analizie poddano pracę systemu o długościach cykli 2, 4 i 10 min. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że zarówno w miejscu pracy, jak i w centralnej części pomieszczenia spełniono wymagania komfortu termicznego odnośnie temperatury, podczas wszystkich długości cykli. W przypadku wilgotności względnej wymagania dotyczące komfortu cieplnego zostały spełnione tylko dla części analizowanych wariantów długości cyklu pracy.

Kubacka & Heim (2015) przeprowadzili symulację dla czterech różnych konfiguracji umieszczenia otworów wlotowych i wylotowych w pomieszczeniu biurowym, które wyposażone było w zdecentralizowaną jednostkę nawiewną. Temperatura powietrza nawiewanego była stała i wynosiła 20°C, natomiast wywiew zużytego powietrza odbywał się za pomocą wyciągu grawitacyjnego. Dla każdego wariantu oceniono komfort cieplny w dwóch strefach pomieszczenia – w centralnej jego części i przy oknie. Do oceny komfortu termicznego wykorzystano wskaźniki PMV i PPD. Wyniki wykazały, że komfort termiczny został zachowany we wszystkich analizowanych wariantach, w obu strefach pomieszczenia.

Usuwanie zanieczyszczeń

Istotnym aspektem oceny zdecentralizowanych systemów wentylacji jest również ich skuteczność w usuwaniu zanieczyszczeń z powietrza wewnętrznego. Badania Zender-Świercz (2021) objęły efektywność redukcji zanieczyszczeń (CO_2) z powietrza wewnętrznego przez jednostkę fasadową. Badania wykazały, że wentylacja fasadowa pozwala na skuteczną redukcję stężenia CO_2 . Najwyższą efektywność zaobserwowano dla cykli wywiewu oraz cyklu dwuminutowego, podczas którego stężenie CO_2 zostało zredukowane o połowę w stosunku do stężenia początkowego.

Zender-Świercz (2020b) analizowała również potencjał usuwania zanieczyszczeń przez jednostkę fasadową przy pomocy gazu wskaźnikowego, którym był dwutlenek węgla. W celu określenia efektywności redukcji CO_2 , zba-

dano ilość wymian powietrza oraz stopień rozcieńczenia zanieczyszczeń. Dla każdego z analizowanych długości cykli wynoszących 2, 4 i 10 min zaobserwowano redukcję stężenia CO_2 . Największy spadek zanieczyszczeń w powietrzu wewnętrznym zaobserwowano podczas najdłuższego cyklu pracy.

Altendorf i in. (2022) zbadali efektywność redukcji radonu w powietrzu wewnętrznym mieszkania zlokalizowanego na terenie dawnej eksploatacji uranu. Podczas pracy systemu wentylacji zdecentralizowanej stężenie radonu ulegało redukcji nawet do 83%. Po wyłączeniu wentylacji stężenie radonu w powietrzu gwałtownie wzrastało.

Odzysk ciepła

Urządzenia do wentylacji fasadowej najczęściej wyposażone są w akumulacyjny wymiennik do odzysku ciepła. Odbiera on energię ciepłą z powietrza wywiewanego, a następnie oddaje ją do powietrza nawiewanego po zmianie cyklu. Powszechnie stosuje się ceramiczny wymiennik, jednak wraz z postępem badań nad urządzeniami do naprzemiennego nawiewu i wywiewu obserwuje się wprowadzanie nowych rozwiązań np. materiałów zmiennofazowych PCM (Phase Change Materials).

Urządzenia z ceramicznym wymiennikiem do odzysku ciepła

Koper (2019) badaniami objął jednoprzewodowe urządzenia wentylacyjne wyposażone w wymiennik ceramiczny, pracujące z trzema prędkościami wentylatora. Pomiary temperatury wykonywano za pomocą termopar umieszczonych w odpowiednich miejscach. Pomiary przeprowadzano dla kilku cykli, a następnie obliczono średnie temperatury w każdym punkcie pomiarowym. Określono dwie sprawności odzysku ciepła – osobno dla cyklu nawiewu i wywiewu. Wyniki wykazały, że sprawność odzysku ciepła jest wyższa dla niższych prędkości wentylatora, co ma związek z wydłużonym czasem kontaktu powietrza z wymiennikiem ciepła. Podczas najniższego biegu wentylatora sprawność odzysku ciepła wyniosła 79% w cyklu nawiewu. Zaobserwowano również, że sprawność odzysku ciepła jest wyższa dla cykli wywiewu, niż dla nawiewu.

Pekdogan i in. (2020) badali wydajność pracy jednostki wentylacji zdecentralizowanej z ceramicznym wymiennikiem do odzysku ciepła. Stanowisko badawcze stanowiło pomieszczenie ze ścianą betonową, która dzieliła pomieszczenie na dwie części. Znajdowały się w niej dwa kanały wentylacyjne – jeden z nich działał jako kanał wywiewny, a drugi jako nawiewny. Części pomieszczenia oddzielone od siebie ścianą betonową symulowały środowisko wewnętrzne i zewnętrzne. Badanie wykonano dla warunków zimowych i letnich, dlatego część reprezentująca środowisko zewnętrzne była wyposażona w chłodnicę oraz nagrzewnicę elektryczną. Zastosowano termopary w wyznaczonych miejscach, co pozwoliło obliczyć ciepło zgromadzone i oddane z wymiennika. Badania wykonano dla długości cykli wynoszących: 1, 2, 5, 7,5 i 10 min. Dla warunków zimowych stwierdzono, że najwyższą efektywność odzysku ciepła w cyklu nawiewu występuje w cyklu dwuminutowym (82%), a najniższa podczas cyklu trwającego 7,5 minuty (73%). Dla warunków letnich stwierdzono, że w cyklu nawiewu efektywność odzysku ciepła wynosi 89% przy cyklu wynoszącym 7,5 minuty oraz 81% przy cyklu wynoszącym 10 minut. Zestawienie efektywności

odzysku ciepła dla poszczególnych cykli przedstawiono w Tabeli 1.

Koper i in. (2020) sprawdzili rzeczywiste parametry pracy urządzenia fasadowego z wymiennikiem ceramicznym, celem porównania ich z wartościami deklarowanymi przez producenta. Wyniki wykazały, że uzyskane parametry nie różniły się znacznie względem wartości podanych przez producenta. Dodatkowo, zaobserwowano rozbieżność pomiędzy wartościami temperatury mierzonej w środowisku wewnętrznym, oraz tej mierzonej w miejscu pomiędzy wentylatorem, a wymiennikiem do odzysku ciepła. Stwierdzono, że inne elementy urządzenia mogą akumulować energię cieplną, co sugeruje ich wpływ na końcową wartość sprawności.

Alternatywne materiały akumulacyjne stosowane w wymiennikach regeneracyjnych

W literaturze, poza tradycyjnie stosowanymi wymiennikami ceramicznymi, obserwuje się również możliwość zastosowania alternatywnych materiałów akumulacyjnych do odzysku ciepła. Badaniami (Zender-Świercz, 2024) objęto zdecentralizowane urządzenie wentylacyjne wyposażone w wymiennik, którego materiał wypełniający stanowiły żwir oraz gips. Badania przeprowadzono dla trzech długości cyklu – 2, 6 i 10 min. Wyniki badań wykazały, że rodzaj materiału wypełniającego wpływa na średnią sprawność odzysku ciepła. W przypadku wymiennika wypełnionego gipsem najwyższą sprawność uzyskano dla cyklu trwającego dwie minuty, osiągając 86%. Wydłużenie czasu cyklu do 6 i 10 minut spowodowało obniżenie średniej sprawności do odpowiednio 70% i 71%. Z kolei wymiennik wypełniony żwirem charakteryzował się wyższą i bardziej stabilną sprawnością odzysku ciepła, wynoszącą 92–93%, niezależnie od długości cyklu pracy.

W podobnych badaniach (Romaniec i in., 2023) większą efektywność i stabilność odzysku ciepła uzyskano dla wymiennika z wypełnieniem żwirowym. W przypadku wymiennika wypełnionego żwirem, sprawność odzysku ciepła utrzymywała się na wysokim poziomie i wynosiła odpowiednio 92%, 93% oraz 92% dla cykli trwających 2, 6 i 10 minut. Natomiast dla wymiennika wypełnionego gipsem odnotowano niższe wartości, osiągające 86%, 70% i 71% dla analogicznych długości cyklu.

Wymienniki z materiałami zmiennofazowymi PCM

Zasada działania materiałów zmiennofazowych PCM polega na naprzemiennej akumulacji i oddawaniu ciepła jawnego i utajonego poprzez cykliczną zmianę stanu skupienia ze stałego na ciekły w zależności od wahań temperatury otoczenia. Podczas wzrostu temperatury otoczenia, materiał PCM topnieje, czemu towarzyszy pochłanianie energii cieplnej. Następnie, kiedy temperatura otoczenia maleje, PCM krzepnie, przez co oddaje zgromadzone ciepło. Każdy materiał zmiennofazowy ma określony zakres temperatur topnienia i krzepnięcia, w których zachodzą opisane procesy. Obecnie obserwuje się rosnące zainteresowanie zastosowaniem materiałów PCM np. w przegrodach budowlanych czy instalacjach wentylacyjnych (Laafer i in., 2026). Pomimo rosnącej liczby badań poświęconych wykorzystaniu PCM w systemach HVAC, ich zastosowanie w zdecentralizowanych systemach wentylacji jest nadal stosunkowo słabo opisane w literaturze.

Tabela 1. Wyniki efektywności energetycznej systemu wentylacji z odzyskiem ciepła jawnego (tłumaczenie własne). (Pekdogan i in., 2020)

Table 1. Energy efficiency results for the ventilation system with sensible heat recovery (author's own translation). (Pekdogan et al., 2020)

	Czas, min	Efektywność w cyklu wywiewu, %	Efektywność w cyklu nawiewu, %
Zima	1	73	75
	2	67	82
	5	73	76
	7,5	58	73
	10	52	77
Lato	7,5	61	89
	10	45	81

Przykładem badań poświęconych wentylacji fasadowej z wykorzystaniem PCM są prace Galiszewska & Zender-Świercz (2023a) przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych badanie efektywności odzysku ciepła trzech wariantów konstrukcyjnych wymiennika zbudowanego z aluminiowych cylindrów o różnej średnicy. Cylindry wypełniano materiałami zmiennofazowymi, tj. woda, olej kokosowy i olej jojoba. Badania wykazały, że najwyższą efektywność odzysku ciepła otrzymano dla cylindrów o najmniejszej średnicy oraz podczas najkrótszego cyklu pracy, który trwał 1 minutę. W takiej konfiguracji materiałem zmiennofazowym, który wykazał największą sprawność odzysku ciepła okazał się być olej jojoba. Przy temperaturze powietrza zewnętrznego równego 0°C, wymiennik o średnicy cylindrów 10 mm wypełniony olejem jojoba osiągnął sprawność równą 76,29%. Kontynuacja tych badań, przedstawiona w (Galiszewska & Zender-Świercz, 2023) miała na celu m.in. sprawdzenie zgodności wyników otrzymanych eksperymentalnie, z wynikami symulacji numerycznej. Przeprowadzono ją na podstawie opracowanego modelu CFD wymienników wypełnionych materiałami PCM. Wykazano, że wyniki otrzymane oboma drogami były do siebie zbliżone, a maksymalne odchylenia sprawności wynosiły około 6%.

Podobne badania przeprowadziły Galiszewska & Kujawska (2026), które badały efektywność odzysku ciepła wymienników wypełnionych materiałami zmiennofazowymi w warunkach rzeczywistych. Wymienniki były umieszczone w urządzeniu fasadowym do naprzemiennego nawiewu i wywiewu powietrza. Zastosowano wymiennik o konstrukcji cylindrów, których średnica zewnętrzna wynosiła 10 mm. Badaniom poddano trzy materiały zmiennofazowe – wodę, olej kokosowy i olej jojoba. Porównanie średnich sprawności urządzenia i samego wymiennika wykonano dla dwóch wariantów różnicy temperatury pomiędzy środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym – 20 i 30 K. Wyniki wykazały, że najwyższą sprawność urządzenia uzyskano dla wariantu z wymiennikiem wypełnionym olejem jojoba (68,5% przy ΔT równej 20K, czyli przy temperaturze zewnętrznej ok. 0°C oraz 67,67% przy ΔT równej 30K, czyli przy temperaturze zewnętrznej ok. –10°C). Podobne zależności zaobserwowano dla sprawności samego wymiennika, gdzie również dla wariantu z olejem jojoba otrzymano najwyższą efektywność odzysku ciepła (51,59% przy ΔT równej 20K i 51,85% przy ΔT równej 30K).

Wpływ różnic ciśnienia na pracę systemów wentylacji zdecentralizowanej

Sprawność odzysku ciepła oraz wielkość strumienia powietrza w zdecentralizowanych urządzeniach do wentylacji fasadowej w dużym stopniu zależą od różnicy ciśnienia pomiędzy środowiskiem zewnętrznym i wewnętrznym. Penev & Tsokov (2023) zbadali wpływ warunków zewnętrznych na sprawność odzysku ciepła jednostki do wentylacji fasadowej umieszczonej na ósmym piętrze budynku. Urządzenie wyposażone było w ceramiczny wymiennik do odzysku ciepła. Przeanalizowano pracę dwóch wariantów wymiennika o strukturze plastra miodu, które różniły się gęstością oraz wielkością oczek. Wyniki wykazały, że w warunkach zimowych sprawność odzysku ciepła oraz wydajność nawiewu świeżego powietrza do pomieszczenia wykazują znaczną zmienność. Dodatkowo, w warunkach letnich odzyskiwanie ciepła z powietrza wywiewanego sprzyja zatrzymywaniu energii cieplnej w pomieszczeniu zamiast jej odprowadzania na zewnątrz.

Pracę jednostki do wentylacji fasadowej oceniono pod kątem wpływu różnicy ciśnienia pomiędzy środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym (Zemitis & Bogdanovics, 2020). Badania wykonano w warunkach laboratoryjnych. Wyniki wykazały wyraźne obniżenie efektywności odzysku ciepła wraz ze wzrostem różnicy ciśnienia. Ponadto, zaobserwowano wzrost prędkości przepływu powietrza przez jednostkę wraz ze wzrostem różnicy ciśnienia. Może to prowadzić do negatywnego odczucia cieplnego użytkowników znajdujących się w zasięgu strugi powietrza.

Mikola i in. (2019) zbadali wpływ ciśnienia powietrza (ciągu kominowego) w budynku wielopiętrowym na pracę zdecentralizowanych jednostek wentylacyjnych. Porównano pracę dwóch jednostek wentylacyjnych: z płytowym wymiennikiem ciepła i dwoma wentylatorami promieniowymi oraz z ceramicznym wymiennikiem ciepła i wentylatorem osiowym. Dla obu wariantów stwierdzono, że ilość przepływającego przez urządzenie powietrza jest różna dla cyklu nawiewu i wywiewu. W przypadku wariantu z wentylatorem osiowym zaobserwowano niemal całkowity zanik zdolności odzysku ciepła. Wariant z wentylatorami promieniowymi wykazał lepsze zbilansowanie ilości przepływającego powietrza w cyklach nawiewu i wywiewu. Również w tym przypadku zaobserwowano niższe zmiany w efektywności odzysku ciepła. Potwierdzeniem tych wyników są również badania Carbonare i in. (2020), który wykazali negatywny wpływ wiatru na pracę wentylatorów osiowych.

Podobne badania przeprowadzili Penev & Tsokov (2021) na temat wpływu siły wyporu w okresie zimowym na pracę zdecentralizowanych jednostek wentylacyjnych w budynku wielopiętrowym. Badania opierały się na wykonaniu symulacji CFD budynku pięciokondygnacyjnego, ze wspólnym pionem wentylacyjnym oraz jednostką do wentylacji fasadowej na każdym z pięter. Wykazano, że ciąg kominowy powoduje, że ilość powietrza przepływającego w cyklach nawiewu i wywiewu nie pokrywa się na każdej kondygnacji oraz zmienia się prędkość przepływu powietrza przez urządzenie. Dodatkowo, stwierdzono spadek efektywności odzysku ciepła wraz ze wzrostem wysokości budynku.

Również Koper (2019) wykazał, że różnice ciśnienia pomiędzy środowiskiem wewnętrznym, a zewnętrznym powodują zwiększenie przepływu powietrza w cyklu wywiewu w jednostce do wentylacji fasadowej. W konsekwencji miało to wpływ na nierównomierną efektywność odzysku ciepła (wyższą uzyskano w cyklu wywiewu).

Problemy związane z wpływem różnicy ciśnienia mogą zostać zminimalizowane dzięki zastosowaniu dodatkowych układów sterowania. Koper (2024) przeanalizował ich skuteczność w zakresie bilansowania ilości powietrza nawiewanego i wywiewanego oraz poprawy efektywności odzysku ciepła. Zbadano dwa sposoby sterowania pracą urządzenia: regulację prędkości wentylatora opartą na pomiarze strumienia powietrza oraz regulację długości cyklu w zależności od temperatury powietrza opuszczającego wymiennik. Wykazano, że zastosowanie obu sposobów sterowania przyczynia się do lepszego zbilansowania strumieni powietrza oraz wzrostu efektywności odzysku ciepła.

Wady systemów wentylacji zdecentralizowanej

Pomimo licznych zalet zdecentralizowanych systemów wentylacji, ich zastosowanie wiąże się również z pewnymi ograniczeniami i problemami. Jedną z wad urządzeń do wentylacji fasadowej jest możliwość wystąpienia przeciągu, na który szczególnie narażeni są użytkownicy przebywający w zasięgu strumienia powietrza podczas długich cykli pracy (Zender-Świercz, 2020a). Autorka wskazuje, że skutecznym sposobem ograniczenia tego zjawiska jest zastosowanie wymiennika do odzysku ciepła oraz nagrzewnicy. Zender-Świercz i in., (2022) zalecili kierowanie strumienia powietrza wentylacyjnego pionowo ku górze zamiast równoległe do podłogi, co przyczynia się do ograniczenia możliwości wystąpienia przeciągu.

Ryzyko mieszania się ze sobą strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego jest w urządzeniach fasadowych przez długi czas budziło dyskusję co do bezpieczeństwa ich stosowania w aspekcie higienicznym. Naukowcy przeprowadzili badania na temat mieszania się ze sobą obu strumieni (Amanowicz i in., 2019). Wizualizacja rozprzysięgu dymu wokół czepnio-wyrzutni oraz pomiary stężenia CO₂, wykazały, że nie dochodziło do mieszania się ze sobą strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego. Podobne badania z wykorzystaniem wizualizacji rozprzysięgu powietrza oraz pomiarów CO₂ (Amanowicz i in., 2019), również wykazały, że wokół czepnio-wyrzutni nie następowało mieszanie się ze sobą strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego.

Kolejnym ograniczeniem stosowania urządzeń fasadowych jest ryzyko emisji hałasu podczas ich pracy przy wysokiej wydajności. Davidsson i in. (2022) ocenili poziom hałasu zdecentralizowanej jednostki wentylacyjnej przy trzech różnych wartościach strumienia powietrza. Wykazano, że przyjęta, maksymalna wartość hałasu wynosząca 30 dB(A) została spełniona dla niskiej i średniej wydajności, natomiast przy najwyższym strumieniu powietrza poziom hałasu istotnie wzrastał. Jako metody ograniczenia hałasu wskazano zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych, płyt perforowanych oraz wentylatorów o lepszych parametrach akustycznych.

Wnioski i podsumowanie

Rosnąca szczelność współczesnych budynków ogranicza naturalną wymianę powietrza, co prowadzi do konieczności stosowania różnych systemów wentylacyjnych. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku budynków istniejących, poddawanych termomodernizacji, w których ze względu na ograniczoną przestrzeń zastosowanie tradycyjnych systemów wentylacji może być utrudnione. Zdecentralizowane urządzenia wentylacyjne stanowią w takich przypadkach alternatywne rozwiązanie, umożliwiające utrzymanie odpowiednich warunków wewnętrznych bez konieczności rozprowadzania rozległej instalacji kanałów. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonego przeglądu literatury na temat systemów wentylacji zdecentralizowanej są następujące:

- wykazują one niższe zapotrzebowanie na energię do napędu wentylatora oraz ogrzewania i chłodzenia powietrza wentylacyjnego niż systemy centralne,
- pozwalają zachować komfort termiczny w pomieszczeniach,
- efektywnie usuwają zanieczyszczenia z pomieszczeń,
- wykazują wysoką sprawność odzysku ciepła przy zastosowaniu wymienników regeneracyjnych tj.: wymienniki ceramiczne, wymienników z alternatywnymi materiałami akumulacyjnymi (np. żwir, gips) oraz wymienników z materiałami zmiennofazowymi PCM,
- sprawność odzysku ciepła oraz wielkość strumienia powietrza jest uzależniona od różnicy ciśnienia pomiędzy środowiskiem zewnętrznym i wewnętrznym (wraz ze wzrostem różnicy ciśnienia obserwuje się spadek efektywności odzysku ciepła),
- zastosowanie dodatkowych mechanizmów sterowania pracą jednostki pozwala zredukować negatywny wpływ różnicy ciśnienia na ich efektywność,
- istnieje ryzyko wystąpienia przeciągu bezpośrednio w zasięgu strumienia powietrza w dłuższych cyklach pracy, które można zniwelować stosując odzysk ciepła, nagrzewnicę oraz poprzez kierowanie strumienia powietrza pionowo ku górze,
- nie istnieje ryzyko mieszania się ze sobą strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego w zintegrowanej czerpni-wyrzutni,
- istnieje ryzyko występowania hałasu przy wysokich poziomach przepływu powietrza, który można ograniczyć stosując specjalne materiały i wentylatory.

Aktualna wiedza na temat systemów wentylacji zdecentralizowanej pozwala stwierdzić, że są to urządzenia, które w efektywny sposób zapewniają odpowiednie warunki wewnętrzne w pojedynczych pomieszczeniach. Charakteryzują się skuteczną redukcją zanieczyszczeń oraz wysoką efektywnością odzysku ciepła. Cechy te w połączeniu z ich kompaktowymi rozmiarami oraz łatwością montażu, sprawiają, że systemy wentylacji zdecentralizowanej stanowią szansę na zachowanie odpowiednich warunków mikroklimatycznych, szczególnie w budynkach poddanych termomodernizacji. Jednocześnie, konieczne jest prowadzenie dalszych badań nad zmniejszeniem negatywnego wpływu warunków zewnętrznych na pracę urządzeń fasadowych. Należy również podjąć działania mające na celu ograniczenie emisji hałasu generowanego przez urządzenia podczas pracy z wysoką wydajnością.

Bibliografia

- Altendorf, D., Grünewald, H., Liu, T., Dehnert, J., Trabitzsch, R., & Weiß, H. (2022). Decentralised ventilation efficiency for indoor radon reduction considering different environmental parameters. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 58(2), 195–213. <https://doi.org/10.1080/10256016.2022.2047960>
- Amanowicz, Ł., Ratajczak, K., & Szczechowiak, E. (2019). Badania jednorurowych systemów wentylacyjnych pod kątem oceny mieszania się strumieni powietrza w czerpni i wyrzutni. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 50(6). <https://doi.org/10.15199/9.2019.6.4>
- 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>
- Amanowicz, Ł., Ratajczak, K., & Szczechowiak, E. (2019). Analiza możliwości stosowania systemu wentylacji zdecentralizowanej w budynkach edukacyjnych. *Instal*, 20–26. <https://doi.org/10.36119/15.2019.10.3>
- 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>
- Davidsson, H., Johansson, D., & Chowdary, S. K. (2022). Decentralized ventilation unit for window frame integration. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1085(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1085/1/012030>
- Galiszewska, B., & Kujawska, K. (2026). Analiza efektywności odzysku ciepła w zdecentralizowanym systemie wentylacji fasadowej z zastosowaniem materiałów zmiennofazowych (PCM). *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 57(4), 26. <https://doi.org/10.65545/cow.2026.04.04>
- Galiszewska, B., & Zender-Świercz, E. (2023). Development of a numerical simulation methodology for PCM-Air heat exchangers used in decentralised façade ventilation units. *Energies*, 16(15), 5610. <https://doi.org/10.3390/en16155610>
- Galiszewska, B., & Zender-Świercz, E. (2023a). Heat recovery using PCM in decentralised façade ventilation. *Energies*, 16(8), 3310. <https://doi.org/10.3390/en16083310>
- Kim, M. K., Liu, J., & Baldini, L. (2024). Numerical analysis, design and application of a decentralized ventilation system with a heat recovery unit adapting to Nordic climates: A case study in Norway. *Energy Reports*, 11, 3863–3875. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.050>
- Koper, P. (2019). Badanie działania jednorurowego urządzenia wentylacyjnego z odzyskiem ciepła. *Współczesne Problemy Ochrony Środowiska i Energetyki*, s. 23–34,
- Koper, P. (2024). Influence of control strategy on heat recovery efficiency in a Single-Duct periodic ventilation device. *Energies*, 17(22), 5801. <https://doi.org/10.3390/en17225801>
- Koper, P., Palmowska, A., & Myszkowska, A. (2020). Research of single room decentralized heat recovery unit. *Architecture Civil Engineering Environment*, 12(4), 109–114. <https://doi.org/10.21307/acee-2019-056>

- Kubacka, E., & Heim, D. (2015). Komfort termiczny w pomieszczeniu ze zdecentralizowanym, mechanicznym systemem doprowadzenia powietrza. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, XXXII(2/2015). <https://doi.org/10.7862/rb.2015.53>
- Laafer, A., Hammouma, T., Hmida, A., & Bourouis, M. (2026). Comprehensive Review of Phase change Materials for building Applications: Passive, Active, and Hybrid Systems (2022–2025). *Energies*, 19(5), 1151. <https://doi.org/10.3390/en19051151>
- Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Indoor air quality in buildings: A comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3276. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063276>
- Mikola, A., Simson, R., & Kurnitski, J. (2019). The impact of air pressure conditions on the performance of single room ventilation units in Multi-Story buildings. *Energies*, 12(13), 2633. <https://doi.org/10.3390/en12132633>
- Pekdogan, T., Tokuç, A., Ezan, M. A., & Başaran, T. (2020). Experimental investigation of a decentralized heat recovery ventilation system. *Journal of Building Engineering*, 35, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102009>
- Penev, A. D., & Tsokov, L. P. (2023). Experimental study of the influence of external factors on the functionality of a regenerative decentralized ventilation unit. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1128(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1128/1/012007>
- Penev, A., & Tsokov, L. (2021). Influence of buoyancy forces in multi-storey buildings on the efficiency of a regenerative air handling unit with heat recovery. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1032(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1032/1/012029>
- Pomorski, P. P., & Kim, A. M. K. (2023). Numerical performance investigation of decentralized ventilation compared to centralized ventilation system at a residential building: A case study in Norway. *E3S Web of Conferences*, 396, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339603001>
- Romaniec, W., Wrzochal, A., & Zender-Świercz, E. (2023). (2023). Experimental study on the performance of a heat recovery exchanger filled with gypsum and gravel. *Journal of Building Engineering*, 80, 108034. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108034>
- Zemītis, J., & Bogdanovičs, R. (2020). Heat recovery efficiency of local decentralized ventilation devices. *Magazine of Civil Engineering*, 94(2), 120–128. <https://doi.org/10.18720/mce.94.10>
- Zender-Świercz, E. (2020a). Microclimate in Rooms Equipped with Decentralized Façade Ventilation Device. *Atmosphere*, 11(8), 800. <https://doi.org/10.3390/atmos11080800>
- Zender-Świercz, E. (2020b). Improvement of indoor air quality by way of using decentralised ventilation. *Journal of Building Engineering*, 32, 101663. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101663>
- Zender-Świercz, E. (2021). 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. (2024). Heat recovery of decentralised façade units: A case study. *Energy and Buildings*, 315, 114338. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114338>
- 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>

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.*



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Kim jesteśmy?

PZITS to ogólnopolska organizacja skupiająca ok. 3 200 techników, inżynierów i naukowców działających w obszarze inżynierii sanitarnej i środowiska.

Misją PZITS jest działalność na rzecz społeczeństwa poprzez rozwój rozwiązań technicznych służących ochronie zdrowia i środowiska naturalnego. PZITS jest jedynym polskim członkiem REHVA oraz International Gas Union, co umożliwia aktywną współpracę międzynarodową.

Więcej szczegółów:

www.pzits.pl/czlonkostwo

Zostań członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych

Członkostwo w PZITS obejmuje:

Otrzymywanie:

- zaproszeń na seminaria, konferencje i szkolenia organizowane przez PZITS,
- dostępu do nagrań z wydarzeń organizowanych przez Zarząd Główny PZITS,
- zaproszeń do udziału w wycieczkach technicznych oraz spotkaniach integracyjnych,
- bieżących informacji o zmianach w przepisach i legislacji branżowej,
- informacji o ofertach pracy w branży.

Możliwość:

- Udziału w opracowywaniu przepisów oraz zgłaszania propozycji zmian w obowiązujących regulacjach,
- nawiązywania bezpośrednich kontaktów z ekspertami i przedstawicielami branży,
- uzyskiwania porad i opinii w sprawach technicznych związanych z zakresem działalności PZITS,
- współpracy i wymiany doświadczeń z organizacjami zrzeszonymi m.in. w REHVA i IGU,
- publikowania artykułów w czasopiśmie PZITS,
- aktywnego udziału w pracach sekcji branżowych,
- otrzymania odznaczeń honorowych PZITS.

Dostęp do:

- materiałów, poradników i wytycznych opracowywanych przez PZITS,
- działalności szkoleniowej i rozwojowej organizowanej w całej Polsce,
- stowarzyszeniowej wspólnoty i wsparcia środowiska inżynierskiego.