



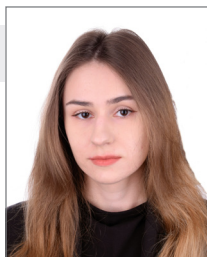
Analiza efektywności odzysku ciepła w zdecentralizowanym systemie wentylacji fasadowej z zastosowaniem materiałów zmienno fazowych (PCM)

Analysis of heat recovery efficiency in a decentralised façade ventilation system using phase change materials (PCM)



Dr inż. Beata Galiszewska

ORCID ID: [0000-0001-6384-994X](https://orcid.org/0000-0001-6384-994X)
Wydział Inżynierii Środowiska,
Geodezji i Energetyki Odnawialnej
Politechnika Świętokrzyska
bgaliszewska@tu.kielce.pl



Inż. Kinga Kujawska

Wydział Inżynierii Środowiska,
Geodezji i Energetyki Odnawialnej
Politechnika Świętokrzyska

Słowa kluczowe: decentralna wentylacja, wentylacja fasadowa, naprzemienny nawiew/wywiew, odzysk ciepła, PCM

Streszczenie

Wprowadzenie. Aktualne wymagania dotyczące energooszczędności budynków, powodują konieczność ich wysokiego uszczelniania. W wyniku tego, obiekty nie są w stanie utrzymać odpowiedniej wymiany powietrza za pomocą wentylacji naturalnej. Wówczas należy zastosować instalację wentylacji mechanicznej, która zapewni wymuszony przepływ powietrza. W przypadku budynków istniejących, często niemożliwe jest zastosowanie rozbudowanej instalacji wentylacji centralnej. W takiej sytuacji, alternatywnym rozwiązaniem jest wykorzystanie wentylacji zdecentralizowanej o przemiennym nawiewie i wywiewie. Dodatkowo zastosowanie odzysku ciepła przyczynia się do ograniczenia strat ciepła oraz zwiększenia sprawności energetycznej. W rezultacie, urządzenia zdecentralizowane stanowią obiecujący kierunek rozwoju w obszarze wentylacji.

Cel. Celem opracowania jest analiza efektywności odzysku ciepła wymienników wypełnionych materiałem zmienno fazowym PCM (Phase Change Material), umieszczonych w zdecentralizowanym urządzeniu fasadowym.

Metody. Poddano jednorurowe zdecentralizowane urządzenie wentylacyjne do naprzemiennego nawiewu i wywiewu, realizowanego przez wentylator rewersyjny. Urządzenie wyposażone jest w aluminiowy wymiennik do odzysku ciepła składający się z 313 cylindrów wypełnionych materiałem zmienno fazowym PCM. Badano trzy warianty wypełnienia (wymiennik wypełniony wodą, olejem kokosowym i olejem jojoba). Badania wykonano dla długości cyklu 1 min. Analizę przeprowadzono w warunkach rzeczywistych w zakresach temperatury zewnętrznej od 0 do -10°C, przy temperaturze wewnętrznej około 20°C.

Wnioski. Wyniki badań wykazały, że najwyższą efektywnością odzysku ciepła charakteryzuje się wymiennik wypełniony olejem jojoba, który osiągnął sprawność urządzenia równą 68,5% przy temperaturze zewnętrznej 0°C oraz 67,67% przy temperaturze zewnętrznej -10°C. Najniższą efektywność odzysku ciepła uzyskano dla wymiennika wypełnionego wodą, dla którego odnotowano sprawność urządzenia równą 66,54% przy temperaturze zewnętrznej 0°C oraz 65,46% przy temperaturze zewnętrznej -10°C. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość efektywnego wykorzystania materiałów zmienno fazowych w systemach wentylacji zdecentralizowanej.

Keywords: decentralized ventilation, façade ventilation, alternative supply/exhaust airflow, heat recovery, PCM

Abstract

Introduction. Current energy efficiency requirements for buildings necessitate high levels of airtightness. As a result, buildings are unable to maintain adequate air exchange through natural ventilation. In such cases, a mechanical ventilation system must be installed to ensure forced air flow. In existing buildings, it is often impossible to install an extensive central ventilation system. In such situations, an alternative solution is to use decentralised ventilation with alternating supply and exhaust. The additional use of heat recovery contributes to reducing heat loss and increasing energy efficiency. As a result, decentralised devices represent a promising direction for development in the field of ventilation.

Aim. The purpose of the study is to analyse the heat efficiency of heat exchangers filled with phase change materials (PCM) placed in decentralised ventilation unit.

Methods. The decentralised single-duct ventilation unit for alternating exhaust and supply has been analysed. The alternate flow was caused by reversible fan. The unit is equipped with aluminium heat exchanger composed of 313 cylinders filled with Phase Change Material (PCM). Three variants of filling were studied (heat exchanger filled with water, coconut oil and jojoba oil). The tests were performed for a cycle length of 1 minute. Analysis was conducted under real conditions with the outdoor temperature ranging from 0 to -10°C, and the indoor temperature of approximately 20°C.

Conclusions. The test results showed that the highest heat recovery efficiency was achieved by the exchanger filled with jojoba oil, which reached a device efficiency of 68,5% at an external temperature of 0°C and 67,67% at an external temperature of -10°C. The lowest heat recovery efficiency was obtained for the exchanger filled with water, which achieved a device efficiency of 66,54% at an external temperature of 0°C and 65,46% at an external temperature of -10°C. The results obtained indicate the possibility of effective use of phase change materials in decentralised ventilation systems.

Wstęp

Ludzie spędzają większość swojego życia wewnątrz budynków (Mannan i Al-Ghamdi, 2021). Z tego powodu niezwykle istotne jest, aby panujące w nich warunki sprzyjały komfortowi i zdrowiu przebywających tam osób. Kluczowe znaczenie ma zapewnienie właściwej wymiany powietrza w pomieszczeniach. Niewystarczająca wentylacja, prowadzi do wzrostu temperatury, wilgotności i stężenia zanieczyszczeń w pomieszczeniu (Wolkoff i in., 2021, Kelley i Gilbert, 2013, Del Ama Gonzalo i in., 2022). W następstwie tego, budynek zostaje narażony na ogólne pogorszenie warunków wewnętrznych oraz rozwój mikroorganizmów tj. wirusy czy bakterie (Kelley i Gilbert, 2013)

Warunki niespełniające wymaganych standardów stanowią zagrożenie dla zdrowia ludzi oraz mają istotny wpływ na jakość życia użytkowników budynku (Wolkoff i in., 2021)

Nieefektywne wentylowanie pomieszczeń, wpływa w negatywny sposób na wydajność uczenia się i pracy (Telejko i in., 2025, Grineski i in., 2019, Marcotte, 2016, 2016b). Obecnie, z uwagi na regulacje prawne oraz wzrastającą świadomość ekologiczną, dąży się do konstruowania budynków wysoce energooszczędnych. Z tego powodu nowo wznoszone budynki posiadają bardzo dobrą izolacyjność oraz szczelną obudowę, aby ograniczyć straty ciepła (Papadopoulos, 2016). Przynosi to znaczne korzyści energetyczne, jednakże ma to również swoje minusy. Szczelnie wykonane budynki nie są w stanie wentylować się naturalnie, w wyniku czego zostaje zaburzony mikroklimat wewnętrzny (Niculita-Hirzel, 2022, Zamytskyi i Yalova, 2025).

Najprostszym i najtańszym sposobem na wymianę powietrza w budynkach jest wentylacja naturalna. Posiada ona jednak wady, ponieważ w dużym stopniu zależy od warunków atmosferycznych, tj.: siły wiatru czy różnicy ciśnienia powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. W konsekwencji, wentylacja naturalna nie zawsze zapewnia wymaganą intensywność wymiany powietrza (Sakiyama i in., 2020). Występują również znaczne straty ciepła, ponieważ do budynku trafia nieogrzone powietrze z zewnątrz (Borodinecs i in., 2016). Jednym z najbardziej efektywnych rozwiązań jest zastosowanie instalacji wentylacji mechanicznej (Rashid i in., 2025). System ten opiera się na wymuszonym przepływie powietrza wentylacyjnego, które w odpowiedniej ilości dostarczane jest do poszczególnych pomieszczeń. Należy jednak zaznaczyć, że instalacja taka, pozbawiona dodatkowych elementów przygotowujących powietrze, może powodować znaczne straty energii. Zastosowanie układów odzysku ciepła umożliwi ich istotne ograniczenie poprzez przekazywanie energii cieplnej z powietrza wywiewanego do powietrza nawiewanego (Aridi i in., 2021). Najpopularniejszym rozwiązaniem, szczególnie w nowych budynkach jest centralna wentylacja mechaniczna. Niestety zastosowanie tego systemu nie jest zawsze możliwe, gdyż wymaga znaczącej wolnej przestrzeni do umieszczenia centrali oraz rozprowadzenia kanałów wentylacyjnych w całym budynku. Jest to szczególnie utrudnione w przypadku starszych obiektów poddanych termomodernizacji, charakteryzujących się zazwyczaj ograniczoną powierzchnią (Hamburg i in., 2025).

Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie syste-

mu wentylacji zdecentralizowanej, polegającej na naprzemiennym nawiewie i wywiewie powietrza. Nie wymaga ona dużej wolnej przestrzeni, ponieważ urządzenia wentylacyjne są montowane w fasadzie budynku. Składają się one z kompaktowych filtrów powietrza, wentylatorów i wymienników do odzysku ciepła (Kim i in., 2024, Zender-Świercz i in., 2022b, Davidsson i in., 2022). Mogą występować jako pojedyncza jednostka, ale bardziej wskazane jest montowanie ich w parach, po przeciwnych stronach pomieszczenia (Koper, 2024, Pekdogan i in., 2020). W czasie, gdy jedno z urządzeń pracuje w cyklu nawiewu, drugie usuwa zużyte powietrze z pomieszczenia. Zmiana cykli następuje po określonym czasie i jest możliwa dzięki zastosowaniu wentylatorów rewersyjnych lub układu przepustnic, które otwierają się i zamykają w odpowiedniej konfiguracji (Zender-Świercz i in., 2022). Urządzenia zdecentralizowane charakteryzują się małym zużyciem energii do napędu wentylatorów (Zender-Świercz, 2024, Amanowicz i in., 2023), ponieważ powietrze wentylacyjne transportowane jest najkrótszą i najprostszą drogą do pomieszczenia (Świercz, 2024) (Romaniec i in., 2023, Kim i in., 2024). Badania dotyczące kształtowania mikroklimatu w pomieszczeniach wyposażonych w urządzenie zdecentralizowane (Zender-Świercz, 2021) wykazały poprawę warunków wewnętrznych. Badania i symulacja CFD dowiodły, że praca urządzenia pozwala na spełnienie wymagań komfortu cieplnego i oczyszczenia powietrza z zanieczyszczeń, bez wychłodzenia pomieszczenia (Zender-Świercz, 2020).

Najpowszechniejszym sposobem odzysku ciepła w systemach wentylacji zdecentralizowanej jest zastosowanie wymiennika w postaci bloku ceramicznego. Jego zadaniem jest akumulowanie ciepła jawnego, odebranego z powietrza wywiewanego i następnie oddawanie ciepła do powietrza nawiewanego po zmianie cyklu (Pekdogan i in., 2020).

Obecnie, coraz więcej uwagi skupia się na rozwiązaniu polegającym na wypełnieniu wymiennika materiałem zmiennofazowym (PCM), tworząc system wentylacji zdecentralizowanej z odzyskiem ciepła jawnego i utajonego (Amanowicz i in., 2023). Zasada działania materiałów zmiennofazowych polega na naprzemiennym akumulowaniu i oddawaniu ciepła poprzez zmianę stanu skupienia (Galiszewska i Zender-Świercz, 2023a). Badania dotyczące oceny efektywności odzysku ciepła w zdecentralizowanej jednostce wentylacyjnej, wyposażonej w wymiennik wypełniony materiałami zmiennofazowymi wykazały dużą skuteczność takiego rozwiązania (Galiszewska i Zender-Świercz, 2023a). W warunkach laboratoryjnych poddano badaniom trzy wielkości wymiennika – o średnicy cylindrów 10, 25 i 40 mm i wypełniano je materiałami zmiennofazowymi tj.: woda, olej kokosowy i olej jojoba. Wykazano, że najlepszą efektywnością odzysku ciepła charakteryzuje się wymiennik o najmniejszej średnicy cylindrów (10 mm), pracujący w najkrótszym cyklu (1 min). W takiej konfiguracji, najwyższą sprawność odzysku ciepła osiągnął olej jojoba.

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule była analiza efektywności odzysku ciepła w warunkach rzeczywistych w zdecentralizowanym urządzeniu fasadowym przy zastosowaniu różnych materiałów zmiennofazowych jako wypełnienie wymiennika. Aktualnie dostęp-



Rysunek 1. Zdecentralizowane urządzenie fasadowe. Źródło: zasoby własne
Figure 1. Decentralised facade unit. Source: authors' own study



Rysunek 2. Wymiennik do odzysku ciepła. Źródło: zasoby własne
Figure 2. Heat exchanger. Source: authors' own study

ne badania nad urządzeniami zdecentralizowanymi są niewystarczające i skupiają się głównie na aspekcie jakości powietrza. Badania dotyczące odzysku ciepła koncentrują się przede wszystkim na wymiennikach ceramicznych, podczas gdy analiza rozwiązań wykorzystujących materiały zmiennofazowe była prowadzona w warunkach laboratoryjnych.

Metoda badań

Badanie w warunkach rzeczywistych zostało przeprowadzone w Laboratorium Mikroklimatu MIBIOL Politechniki Świętokrzyskiej w pomieszczeniu o wymiarach wewnętrznych wynoszących 3,2 m długości, 2,97 m szerokości i 2,9 m wysokości. Badaniami objęte było jedno-rurowe zdecentralizowane urządzenie wentylacyjne do naprzemiennego nawiewu i wywiewu (Rysunek 1). Jed-



Rysunek 3. Rejestrator ALMEMO 2890-9. Źródło: zasoby własne
Figure 3. ALMEMO 2890-9 recorder. Source: authors' own study

nostka wyposażona jest w wentylator rewersyjny zmieniający kierunek przepływu powietrza w zależności od cyklu. Czas trwania cyklu jest regulowany za pomocą automatyki. Funkcję czepni i wyrzutni pełni kratka, która umiejscowiona jest na ścianie zewnętrznej. Urządzenie posiada skrzynkę, w której znajduje się wymiennik do odzysku ciepła. Nawiew i wywiew powietrza realizowany jest przez końcowy element w postaci kratki, znajdującej się w pomieszczeniu 1 m ponad podłogą. Urządzenie nie stanowi rzeczywistej instalacji wentylacyjnej i służy jedynie do oceny jego pracy.

Wykorzystano wymiennik zbudowany z 313 aluminiowych rurek o średnicy zewnętrznej 10 mm, grubości ścianki rurki 1 mm, średnicy wewnętrznej 8 mm oraz wysokości 300 mm (Rysunek 2). Sumaryczna objętość cylindrów wynosi 4,72 dm³, a powierzchnia wymiany ciepła wynosi 2,95 m².

Badania przeprowadzono w okresie zimowym. Pomiary temperatury powietrza wykonywano przy pomocy sześciu termopar typu K i dwóch czujników rezystancyjnych. Jeden z czujników rezystancyjnych umieszczono po stronie środowiska zewnętrznego (M00), a drugi w pomieszczeniu, po stronie środowiska wewnętrznego (M08). Trzy termopary typu K umieszczono bezpośrednio przed wymiennikiem do odzysku ciepła na wysokościach 4 cm, 12 cm, 24 cm ponad dnem kanału wentylacyjnego i oznaczono je odpowiednio jako M01, M02, M03. Kolejne trzy termopary umieszczono bezpośrednio za wymiennikiem do odzysku ciepła, na tych samych wysokościach w kanale (4 cm, 12 cm, 24 cm) i oznaczono je kolejno jako M04, M05, M06. Dane pomiarowe rejestrowano za pomocą rejestratora ALMEMO 2890-9 producenta Ahlborn (Rysunek 3). Pomiary prowadzono z krokiem czasowym co 5 sekund. Zgromadzone dane wykorzystano do obliczenia efektywności odzysku ciepła przez urządzenie zdecentralizowane.

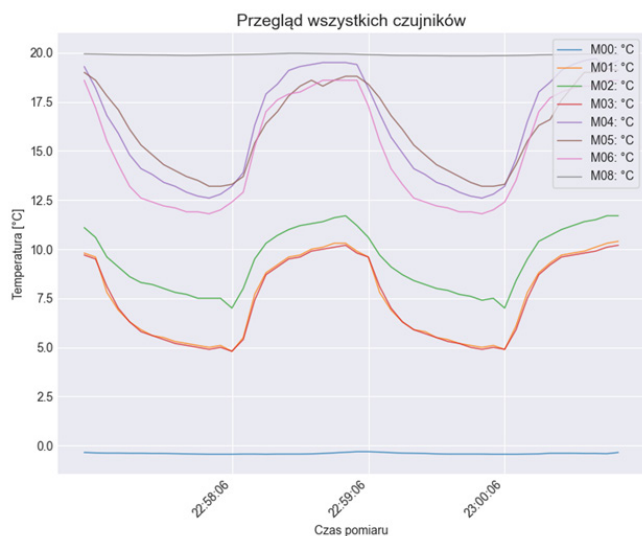
Analizie poddano urządzenie fasadowe pracujące w cyklach 1-minutowych dla trzech różnych wariantów wypełnienia wymiennika do odzysku ciepła materiałem zmiennofazowym:

- wymiennik wypełniony wodą,
- wymiennik wypełniony olejem kokosowym,
- wymiennik wypełniony olejem jojoba.

Wybór użytych materiałów zmiennofazowych został dokonany na podstawie ich właściwości termofizycznych,

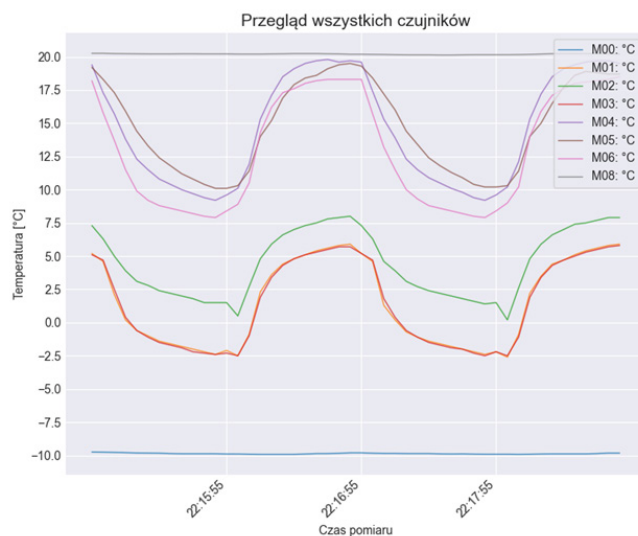
Tabela 1. Właściwości termofizyczne wybranych materiałów zmiennofazowych (Galiszewska, B., & Zender-Świercz, E., 2023a)
Table 1. Thermophysical properties of selected phase change materials (Galiszewska, B., & Zender-Świercz, E., 2023a)

Materiał zmiennofazowy	Ciepło właściwe, J/gK	Ciepło topnienia, J/g	Ciepło krzepnięcia, J/g	Temperatura topnienia, °C	Pojemność cieplna, J/K
Olej kokosowy	1,67	103,02	86,68	25	0,0156
Olej jojoba	10,81	130,7	132,6	14,7	0,1046
Woda	19,88	330,4	258,9	0,3	0,260



Rysunek 4. Przebieg zmian temperatury wyznaczony przez termopary i czujniki M00–M08 przy wypełnieniu wymiennika wodą i ΔT równej 20K. Źródło: zasoby własne

Figure 4. Change in temperature in measuring points marked M00–M08, when heat exchanger filled with water was used at ΔT equal to 20K. Source: authors' own study



Rysunek 5. Przebieg zmian temperatury wyznaczony przez termopary i czujniki M00–M08 przy wypełnieniu wymiennika wodą i ΔT równej 30K. Źródło: zasoby własne

Figure 5. Change in temperature in measuring points marked M00–M08, when heat exchanger filled with water was used at ΔT equal to 30K. Source: authors' own study

które przedstawiono w Tabeli 1.

Sprawność urządzenia określono na podstawie sprawności temperaturowej odzysku ciepła, przy pomocy wzoru:

$$\eta_{urządzenia} = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \times 100, \quad \%$$

gdzie:

- t_1 – średnia temperatura powietrza zewnętrznego danego cyklu (czujnik M00), °C
- t_2 – średnia temperatura powietrza nawiewanego dla danego cyklu (średnia temperatura z termopar M04, M05, M06), °C
- t_3 – średnia temperatura powietrza wewnętrznego dla danego cyklu (czujnik M08), °C

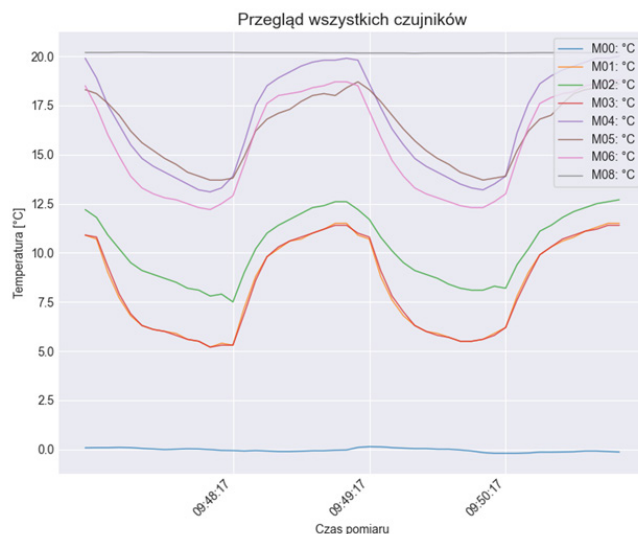
Sprawność wymiennika określono na podstawie sprawności temperaturowej odzysku ciepła, przy pomocy wzoru:

$$\eta_{wymiennika} = \frac{t_2 - t_4}{t_3 - t_4} \times 100, \quad \%$$

gdzie:

- t_2 – średnia temperatura powietrza nawiewanego dla danego cyklu (średnia temperatura z termopar M04, M05, M06), °C
- t_3 – średnia temperatura powietrza wewnętrznego dla danego cyklu (czujnik M08), °C
- t_4 – średnia temperatura powietrza przed wymiennikiem dla danego cyklu (średnia temperatura z termopar M01, M02, M03), °C

Obliczenia wykonano dla ustabilizowanych cykli nawiewu i wywiewu, pomijając pierwsze 30 sekund pomiarów z uwagi na bezwładność cieplną czujników.

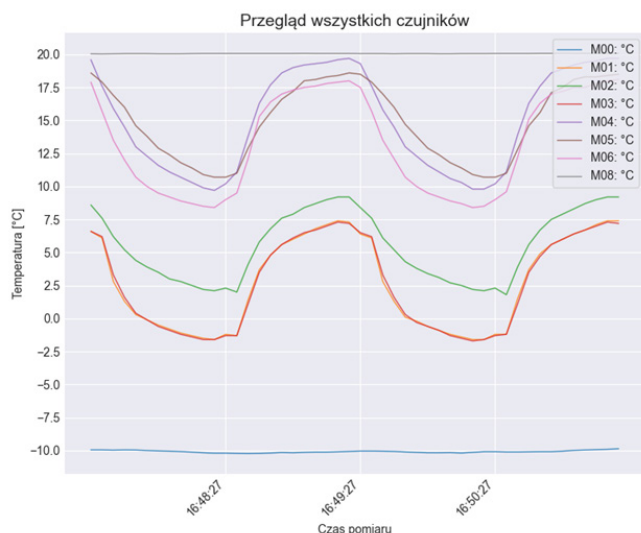


Rysunek 6. Przebieg zmian temperatury wyznaczony przez termopary i czujniki M00–M08 przy wypełnieniu wymiennika olejem kokosowym i ΔT równej 20K. Źródło: zasoby własne

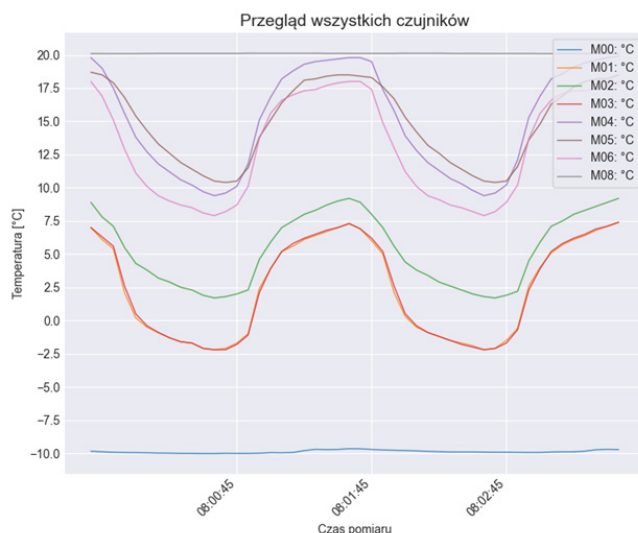
Wyniki i analiza

Przebieg zmian temperatury

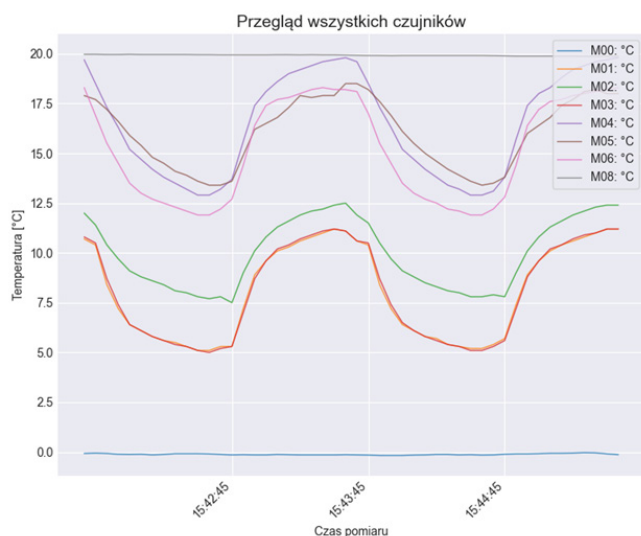
Rysunki 4–9 przedstawiają przebieg zmian temperatury powietrza zmierzonej przez termopary i czujniki rezystancyjne M00–M08 dla wybranych dwóch ustabilizowanych cykli nawiewu i wywiewu w zależności od zastosowanego materiału zmiennofazowego i różnicy temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego.



Rysunek 7. Przebieg zmian temperatury wyznaczony przez termopary i czujniki M00–M08 przy wypełnieniu wymiennika olejem kokosowym i ΔT równej 30K. Źródło: zasoby własne **Figure 7.** Change in temperature in measuring points marked M00–M08, when heat exchanger filled with coconut oil was used at ΔT equal to 30K. Source: authors' own study



Rysunek 9. Przebieg zmian temperatury wyznaczony przez termopary i czujniki M00–M08 przy wypełnieniu wymiennika olejem jojoba i ΔT równej 30K. Źródło: zasoby własne **Figure 9.** Change in temperature in measuring points marked M00–M08, when heat exchanger filled with jojoba oil was used at ΔT equal to 30K. Source: authors' own study



Rysunek 8. Przebieg zmian temperatury wyznaczony przez termopary i czujniki M00–M08 przy wypełnieniu wymiennika olejem jojoba i ΔT równej 20K **Figure 8.** Change in temperature in measuring points marked M00–M08, when heat exchanger filled with jojoba oil was used at ΔT equal to 20K. Source: authors' own study

Przebieg zmian temperatury powietrza przedstawiony na Rysunkach 4–9 dla termopar umieszczonych przed i za wymiennikiem do odzysku ciepła ma charakter sinusoidalny dla wszystkich analizowanych wariantów. Podczas cykli wywiewu, odnotowano wzrost temperatury powietrza w kanale wentylacyjnym, co ma związek z ogrzewaniem się materiału zmiennofazowego PCM od usuwanego powietrza. Z kolei, podczas cykli nawiewu zaobserwowano spadek temperatury w kanale, spowodowany przekazywaniem ciepła zmagazynowanego w wymienniku ciepła powietrzu nawiewanemu.

Zaobserwowano, że przebieg zmian temperatury powietrza przed wymiennikiem, wyznaczony przez termopary M01 i M03 (umieszczone odpowiednio na wysokościach 4 cm i 24 cm nad dnem kanału) jest niemal identyczny w każdym z analizowanych przypadków. Jednocześnie

linia wyznaczona przez termoparę M02 umieszczoną w centralnej części kanału (12 cm nad dnem), przebiega powyżej nich i osiąga wyższe wartości temperatury.

W przypadku rozkładu temperatury za wymiennikiem do odzysku ciepła, linie odpowiadające poszczególnym termoparom znajdują się na różnych poziomach, co świadczy o większym zróżnicowaniu temperatury w przekroju kanału.

W Tabeli 2 przedstawiono średnie wartości temperatury powietrza przed wymiennikiem (termopary M01, M02, M03) i za wymiennikiem (termopary M04, M05, M06) w czasie analizowanych cykli przedstawionych na Rysunek 4–9.

Średnia temperatura powietrza przed wymiennikiem, wyznaczona za pomocą termopar M01, M02, M03 dla analizowanych cykli nawiewu i wywiewu (Rysunek 4–9) wyraźnie spada przy temperaturze zewnętrznej -10°C w porównaniu z wartościami uzyskanymi przy temperaturze zewnętrznej 0°C dla wszystkich badanych substancji zmiennofazowych. Przy temperaturze zewnętrznej 0°C oraz -10°C najwyższe wartości temperatury powietrza za wymiennikiem (termopary M04, M05, M06) uzyskano dla oleju kokosowego, co świadczy o jego dużej zdolności do magazynowania ciepła. Z kolei najniższe wartości temperatury powietrza w kanale zarówno dla różnicy wartości temperatury 20K, jak i 30K, odnotowano w przypadku wody.

Efektywność odzysku ciepła

Zgromadzone dane pomiarowe pozwoliły określić efektywność odzysku ciepła dla trzech wariantów wypełnienia wymiennika materiałem zmiennofazowym. W Tabeli 3 przedstawiono ilość ustabilizowanych cykli nawiewu i wywiewu dla których przeprowadzono dalszą analizę.

Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 4 można zauważyć, że najwyższe sprawności urządzenia otrzymano dla oleju jojoba w obu wariantach różnicy temperatur. Nieco niższe sprawności otrzymano dla oleju kokosowego, a najniższe dla wody. Analogicznie, najwyższą

Tabela 2. Porównanie średniej temperatury powietrza przed i za wymiennikiem do odzysku ciepła w zależności od zastosowanego materiału zmiennofazowego PCM i temperatury zewnętrznej. Źródło: zasoby własne

Table 2. Comparison of the average air temperature before and after the heat recovery exchanger depending on the applied phase change material (PCM) and the outdoor temperature. Source: authors' own study

Różnica temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego	Woda		Olej kokosowy		Olej jojoba	
	Przed wymiennikiem	Za wymiennikiem	Przed wymiennikiem	Za wymiennikiem	Przed wymiennikiem	Za wymiennikiem
$\Delta T = 20K$	6,11	13,02	6,59	13,55	6,30	13,24
$\Delta T = 30K$	-0,67	9,8	0,09	10,37	-0,25	10,3

Tabela 3. Ilość cykli nawiewu i wywiewu zrealizowanych w analizie. Źródło: zasoby własne

Table 3. Number of supply and exhaust cycles analyzed. Source: authors' own study

Różnica temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego	Woda	Olej kokosowy	Olej jojoba
$\Delta T = 20 K$	359	378	277
$\Delta T = 30 K$	25	18	199

Tabela 4. Porównanie otrzymanych średnich wartości sprawności urządzenia i wymiennika w zależności od zastosowanego materiału zmiennofazowego i różnicy temperatur. Źródło: zasoby własne

Table 4. Comparison of the obtained average efficiency values of the device and the heat exchanger depending on the applied phase change material and the temperature difference. Source: authors' own study

Różnica temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego	Woda		Olej kokosowy		Olej jojoba	
	Sprawność urządzenia	Sprawność wymiennika	Sprawność urządzenia	Sprawność wymiennika	Sprawność urządzenia	Sprawność wymiennika
	%	%	%	%	%	%
$\Delta T = 20K$	66,54	50,48	67,50	51,09	68,50	51,59
$\Delta T = 30K$	65,46	50,20	67,36	51,39	67,67	51,85

sprawność wymiennika otrzymano dla oleju jojoba, a najniższą dla wody. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku oleju kokosowego oraz oleju jojoba przy większej różnicy temperatury powietrza ($\Delta T = 30K$) uzyskano wyższe wartości sprawności wymiennika niż przy $\Delta T = 20K$. Przeprowadzono analizę statystyczną, umożliwiającą identyfikację występujących odchyłań w wynikach. Na Rysunkach 10–13 przedstawiono wykresy pudełkowe ilustrujące rozkład cechy Sprawność urządzenia i Sprawność wymiennika w grupach wyznaczonych przez poziomy czynnika Materiał zmiennofazowy. Na pojedynczym wykresie pudełkowym zobrazowano zakres wartości dolny, kwartył dolny, medianę przedstawioną jako czerwona linia, wartość średnią przedstawioną jako znak „x”, kwartył górny, zakres wartości górny i wartości odstające. Obszar wyznaczony przez różnicę kwartyła dolnego i górnego informuje o zakresie połowy centralnie położonych wyników.

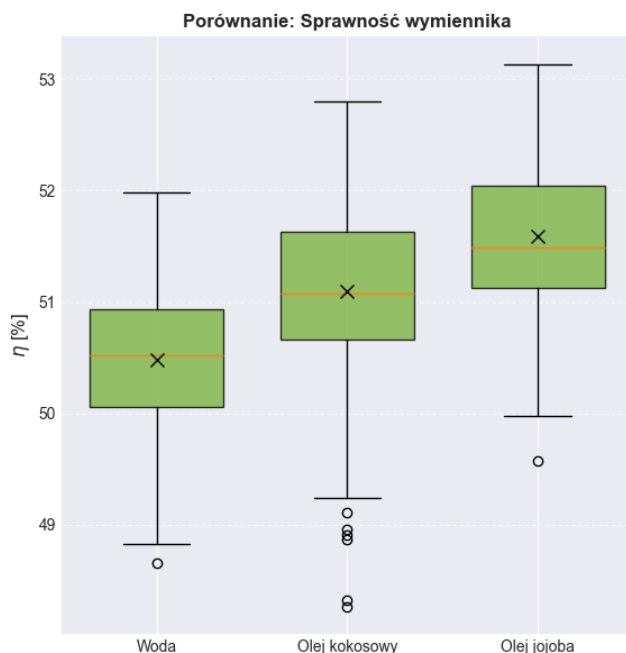
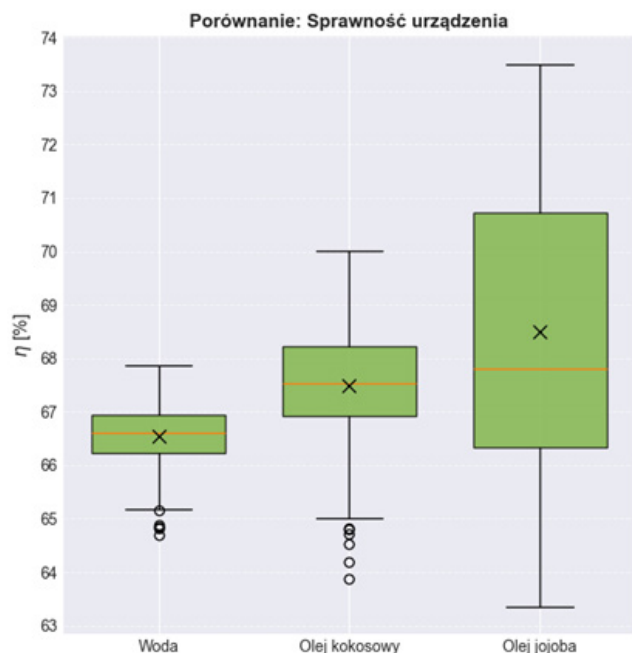
Z wykresów pudełkowych (Rysunek 10 i 11) wynika, że wartość cechy Sprawność urządzenia zależy od poziomów czynnika Materiał zmiennofazowy. Największe zróżnicowanie otrzymanych wartości otrzymano dla oleju jojoba zarówno w przypadku różnicy ΔT równej 20K, jak i 30K. Bardziej spójne dane otrzymano dla wody i oleju kokosowego. Przy różnicy temperatur $\Delta T = 30K$ zaobserwowano znacznie odstające wartości poniżej dolnego zakresu wartości dla oleju kokosowego i oleju jojoba. Tak zróżnicowane wyniki mogły w istotnym stopniu wpłynąć na uzyskane wartości sprawności urządzenia, przedstawione w Tabeli 4.

Z wykresów pudełkowych (Rysunek 12 i 13) wynika, że wartość cechy Sprawność wymiennika zależy od poziomów czynnika Materiał zmiennofazowy. W przypadku różnicy temperatur ΔT równej 30K dla oleju jojoba zaob-

serwowano znaczną ilość wartości odstających poniżej zakresu dolnego i powyżej zakresu górnego. Dodatkowo, górny zakres wartości jest znacznie dłuższy od dolnego, co sugeruje asymetrię układu. Może to przekładać się na wartości sprawności wymiennika uzyskane w Tab. 4.

Dyskusja

Podobne badania na temat efektywności odzysku ciepła przy zastosowaniu materiałów zmiennofazowych w systemach wentylacji zdecentralizowanej zostały przeprowadzone przez Galiszewska B. i Zender-Świercz E. (Galiszewska i Zender-Świercz, 2023, 2023a). Eksperyment przeprowadzono z użyciem komory klimatycznej symulującej warunki wewnętrzne i zewnętrzne. Obiektem badań były aluminiowe wymienniki w postaci cylindrów o średnicach 10, 25 i 40 mm, wypełnionych materiałami zmiennofazowymi tj.: woda, olej kokosowy, olej jojoba. Badano ich efektywność w czasie cykli o długości 1, 2, 3, 5 min w trzech wariantach temperatury zewnętrznej (0, -10, -20°C) i przy stałej temperaturze wewnętrznej 20°C. Badania wykazały, że najwyższą efektywnością odzysku ciepła w cyklach 1 minutowych charakteryzuje się olej jojoba, który przy temperaturze zewnętrznej równej 0°C osiągnął sprawność urządzenia równą 76,29%, a przy temperaturze -10°C wynosiła ona 75,72%. Olej kokosowy osiągnął sprawność urządzenia na poziomie 75,10% przy temperaturze zewnętrznej 0°C oraz 70,56% przy -10°C. W przypadku wody sprawność wyniosła 72,70% dla 0°C oraz 71,30% dla -10°C. Podobne badania przeprowadzone przez Pekdogan T i inni wykazały, że zdecentralizowane systemy wentylacji z ceramicznym wymiennikiem ciepła stanowią skuteczną alternatywę dla systemów centralnych, szczególnie w zakresie poprawy jakości powie-

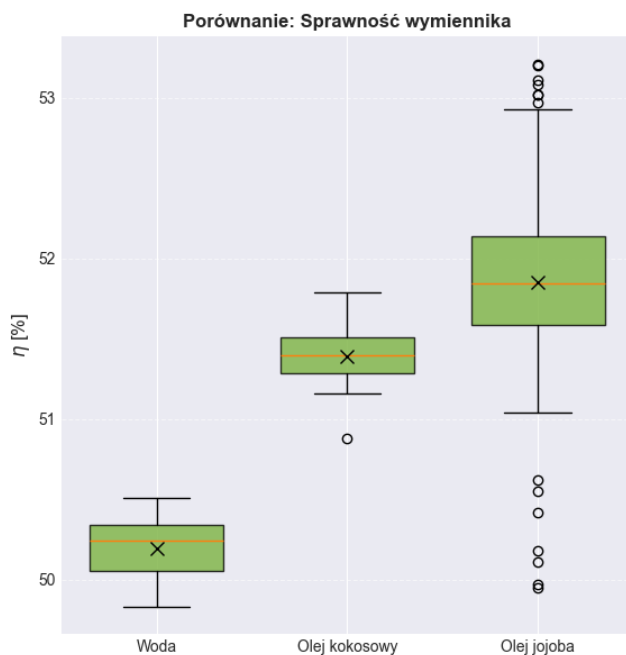
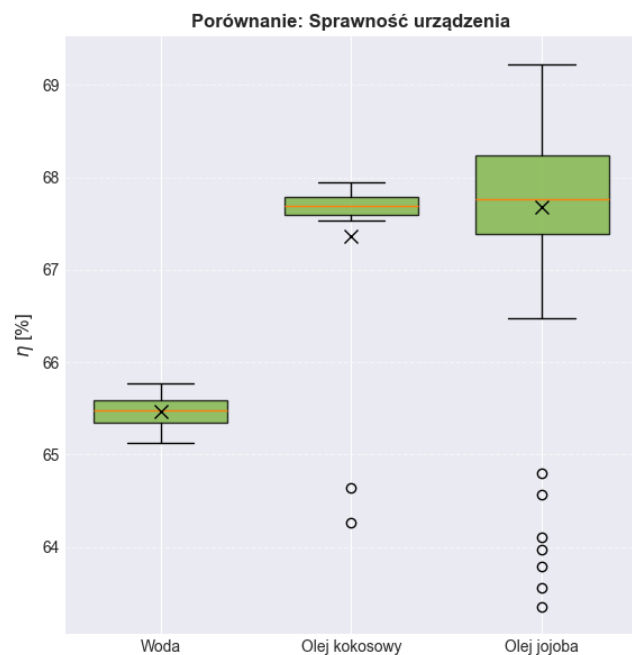


Rysunek 10. Wykresy pudełkowe ilustrujące rozkład cechy Sprawność urządzenia w grupach wyznaczonych przez poziomy czynnika Materiał zmiennofazowy przy ΔT równej 20K. Źródło: zasoby własne

Figure 10. Box plots illustrating the Device efficiency characteristic in groups determined by the levels of Phase change material at ΔT equal to 20K. Source: authors' own study

Rysunek 12. Wykresy pudełkowe ilustrujące rozkład cechy Sprawność wymiennika w grupach wyznaczonych przez poziomy czynnika Materiał zmiennofazowy przy ΔT równej 20K. Źródło: zasoby własne

Figure 12. Box plots illustrating the Heat exchanger efficiency characteristic in groups determined by the levels of Phase change material at ΔT equal to 20K. Source: authors' own study



Rysunek 11. Wykresy pudełkowe ilustrujące rozkład cechy Sprawność urządzenia w grupach wyznaczonych przez poziomy czynnika Materiał zmiennofazowy przy ΔT równej 30K. Źródło: zasoby własne

Figure 11. Box plots illustrating the Device efficiency characteristic in groups determined by the levels of Phase change material at ΔT equal to 30K. Source: authors' own study

Rysunek 13. Wykresy pudełkowe ilustrujące rozkład cechy Sprawność wymiennika w grupach wyznaczonych przez poziomy czynnika Materiał zmiennofazowy przy ΔT równej 30K. Źródło: zasoby własne

Figure 13. Box plots illustrating the Heat exchanger efficiency characteristic in groups determined by the levels of Phase change material at ΔT equal to 30K. Source: authors' own study

trza wewnętrznego przy jednoczesnym ograniczeniu strat energii. Kluczowym wnioskiem jest stwierdzenie, że optymalną wydajność termiczną oraz najniższe zużycie energii uzyskuje się przy zastosowaniu 2-minutowego cyklu pracy (naprzemiennego nawiewu i wywiewu). W takich warunkach system osiągnął wysoką sprawność odzysku ciepła, wynoszącą 82% dla trybu nawiewu oraz 67% dla trybu wywiewu w symulowanych warunkach zimowych. Analiza rozkładu temperatury wewnątrz ceramicznego bloku potwierdziła występowanie wyraźnego gradientu termicznego, co jest bezpośrednio związane z procesem jawnego akumulowania energii (Pekdogan i in., 2020). Otrzymane wyniki są porównywalne z wynikami badań przedstawionymi w niniejszym artykule. Różnica wartości wyniku z oddziaływania czynników zewnętrznych na pracę urządzenia, które nie były uwzględnione w warunkach laboratoryjnych.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy efektywności odzysku ciepła dla zdecentralizowanego systemu wentylacji do naprzemiennego nawiewu i wywiewu pracującego w warunkach rzeczywistych. Zastosowano aluminiowe wymienniki cylindryczne, wypełnione materiałami zmiennofazowymi PCM. Długość cyklu wynosiła 1 min. Przeprowadzone badania wykazały, że:

- najwyższe temperatury powietrza w kanale wentylacyjnym przed i za wymiennikiem otrzymano dla oleju kokosowego,
- najniższe temperatury powietrza w kanale wentylacyjnym przed i za wymiennikiem otrzymano dla wody,
- najwyższą sprawność urządzenia otrzymano dla oleju jojoba (68,5% przy ΔT równej 20K i 67,67% przy ΔT równej 30K),
- najniższą sprawność urządzenia otrzymano dla wody (66,54% przy ΔT równej 20K i 65,46% przy ΔT równej 30K),
- najwyższą sprawność wymiennika otrzymano dla oleju jojoba (51,59% przy ΔT równej 20K i 51,85% przy ΔT równej 30K),
- najniższą sprawność wymiennika otrzymano dla wody (50,48% przy ΔT równej 20K i 50,20% przy ΔT równej 30K).

Podsumowując, przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM) w zdecentralizowanych systemach wentylacji stanowi efektywny sposób odzysku ciepła, przyczyniając się do ograniczenia strat energii w budynkach. Spośród badanych materiałów najwyższą efektywność odzysku ciepła wykazał olej jojoba. Dalsze badania są niezbędne, aby uwzględnić dodatkowe czynniki wpływające na pracę urządzenia, takie jak ciśnienie powietrza, które wykraczają poza zakres niniejszego artykułu.

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>

- Aridi, R., Faraj, J., Ali, S., El-Rab, M. G., Lemenand, T., & Khaled, M. (2021). Energy recovery in air conditioning Systems: Comprehensive review, classifications, critical analysis, and potential recommendations. *Energies*, 14(18), 5869. <https://doi.org/10.3390/en14185869>
- Borodinecs, A., Nazarova, J., Zajacs, A., Malyshev, A., & Pronin, V. (2016). Specifics of building envelope air leakage problems and airtightness measurements. *MATEC Web of Conferences*, 73, 02020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167302020>
- 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>
- Del Ama Gonzalo, F., Griffin, M., Laskosky, J., Yost, P., & González-Lezcano, R. A. (2022). Assessment of Indoor Air Quality in Residential Buildings of New England through Actual Data. *Sustainability*, 14(2), 739. <https://doi.org/10.3390/su14020739>
- 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>
- Grineski, S. E., Collins, T. W., & Adkins, D. E. (2019). Hazardous air pollutants are associated with worse performance in reading, math, and science among US primary schoolchildren. *Environmental Research*, 181, 108925. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108925>
- Hamburg, A., Palmiste, Ü., Mikola, A., & Kalamees, T. (2025). Ventilation Strategies for Deep Energy Renovations of High-Rise Apartment Buildings: Energy efficiency and implementation challenges. *Energies*, 18(11), 2785. <https://doi.org/10.3390/en18112785>
- Kelley, S. T., & Gilbert, J. A. (2013). Studying the microbiology of the indoor environment. *Genome Biology*, 14(2), 202. <https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-2-202>
- 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.egyrep.2023.11.050>
- 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>
- 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>
- Marcotte, D. E. (2016). Something in the air? Pollution, allergens and children's cognitive functioning. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2725050>
- Marcotte, D. E. (2016b). Something in the air? Air quality and children's educational outcomes. *Economics of Education Review*, 56, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2016.12.003>
- Niculita-Hirzel, H. (2022). Latest Trends in Pollutant Accumulations at Threatening Levels in Energy-Efficient Residential Buildings with and without Mechanical Ventilation: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3538. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063538>
- Papadopoulos, A. M. (2016). Forty years of regulations on the thermal performance of the building envelope in Europe: Achievements, perspectives and challenges. *Energy and Buildings*, 127, 942–952. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.051>
- 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.jobe.2020.102009>
- Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Maimuri, N. M. L. A., Ameen, A., Agyekum, E. B., Chibani, A., & Kezzar, M. (2025). Mechanical Ventilation Strategies in Buildings: A comprehensive review of climate management, indoor air quality, and energy efficiency. *Buildings*, 15(14), 2579. <https://doi.org/10.3390/buildings15142579>
- Romaniec, W., Wrzochal, A., & Świercz, E. Z. -. (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.jobe.2023.108034>
- Sakiyama, N., Carlo, J., Frick, J., & Garrecht, H. (2020). Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109933. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109933>
- Telejko, M., Zender-Świercz, E. J., Galiszewska, B., & Wojcieszak, R. (2025). COGNITIVE FUNCTIONS OF CHILDREN IN GRADES 5-8 – CASE STUDY. *Structure and Environment*, 17(3), 137–149. <https://doi.org/10.30540/sae-2025-014>
- Wolkoff, P., Azuma, K., & Carrer, P. (2021). Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 233, 113709. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113709>
- Zamytskyi, O. V., & Yalova, A. M. (2025). Research of natural ventilation in a thermally modernized building. *Municipal Economy of Cities*, 3(191), 314–320. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-314-320>
- 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. (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., Telejko, M., Galiszewska, B., & Starzomska, M. (2022b). Assessment of Thermal Comfort in Rooms Equipped with a Decentralised Façade Ventilation Unit. *Energies*, 15(19), 7032. <https://doi.org/10.3390/en15197032>
- 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>
- Zender-Świercz, E. (2024). Heat recovery of decentralized façade units: A case study. *Energy and Buildings*, 315, 114338. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114338>

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.*

XII PODLASKA KONFERENCJA CIEPŁOWNICZA

8–9 październik 2026 / Warchały



PÓLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH
Oddział Białystok

Szczegóły: <https://pzits.bialystok.pl/xii-podlaska-konferencja-cieplownicza>