

# WYKORZYSTANIE WKŁADÓW CERAMICZNYCH W SYSTEMACH REKUPERACJI CIEPŁA

## SŁOWA KLUCZOWE

wentylacja, wentylacja mechaniczna z ceramicznym odzyskiem ciepła, zmiany środowiskowe, zapylenie, stężenie CO<sub>2</sub>, komfort

## KEY WORDS

ventilation, mechanical ventilation with ceramic heat recovery, environmental changes, dust, CO<sub>2</sub> concentration, comfort

Andrzej Grzebielec<sup>1\*</sup>

Adam Szelański<sup>2</sup>

Krzysztof Bruzi<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska, Polska

<sup>3</sup> Stropex Sp. J., Polska

\* E-mail: andrzej.grzebielec@pw.edu.pl

## STRESZCZENIE

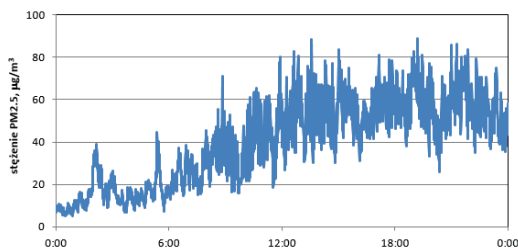
Zajęcia dydaktyczne prowadzone są w salach wykładowych zwykle dostosowanych od strony technicznej do prezentowanych treści. Zainstalowane są systemy audiowizualne i nagłaśniające. Niestety w wielu przypadkach sale lekcyjne projektuje się pod kątem klimatyzacji i wentylacji, podobnie jak pomieszczenia biurowe. W efekcie, podczas zajęć, nawet w pomieszczeniach z klimatyzacją, warunki zmieniają się na tyle niekorzystnie, że zarówno nauczyciel, jak i uczniowie odczuwają dyskomfort. W pracy przeanalizowano zmiany temperatury, stężenia CO<sub>2</sub>, stężenia PM<sub>2,5</sub> i wilgotności względnej w pomieszczeniu, w którym zyski ciepła od ludzi i urządzeń oraz zyski wilgoci przekraczają wartości projektowe. W pracy wykorzystano bezkanałowy rekuperator Respireco o pracy cyklicznej. Najpierw sprawdzono właściwości termodynamiczne samego rekuperatora, a następnie przetestowano go w wybranej polskiej szkole podstawowej. Wyniki pokazują, że tego typu rekuperatory są w stanie zapewnić prawidłowe warunki klimatyczne w salach wykładowych. Zastosowanie wentylacji mechanicznej z wykorzystaniem rekuperatora z ceramicznym odzyskiem ciepła spowodowało, że podczas zajęć stężenie CO<sub>2</sub> w pomieszczeniu spadło o 50%. Stężenie PM<sub>2,5</sub> utrzymywało się na poziomie trzykrotnie niższym niż w pomieszczeniu bez wentylacji mechanicznej. Należy zatem stwierdzić, że zastosowanie wentylacji mechanicznej z rekuperacją nie tylko obniża koszty ogrzewania, ale także znacząco poprawia jakość powietrza.

## SUMMARY

Classes are conducted in lecture rooms usually technically adapted to the content presented. Audio-visual and sound systems are installed. Unfortunately, in many cases, classrooms are designed for air conditioning and ventilation, just like offices. As a result, during classes, even in air-conditioned rooms, the conditions change so badly that both the teacher and the students feel discomfort. The study analyzed changes in temperature, CO<sub>2</sub> concentration, PM<sub>2.5</sub> concentration and relative humidity in a room where heat gains from people and devices as well as moisture gains exceed the design values. The work uses a channelless Respireco recuperator with cyclical operation. First, the thermodynamic properties of the recuperator itself were checked, and then it was tested in a selected Polish primary school. The results show that this type of recuperator is able to provide proper climatic conditions in lecture halls. The use of mechanical ventilation with the use of a recuperator with ceramic heat recovery resulted in the reduction of CO<sub>2</sub> concentration in the room by 50% during the classes. The concentration of PM<sub>2.5</sub> remained three times lower than in the room without mechanical ventilation. Therefore, it should be stated that the use of mechanical ventilation with recuperation not only reduces heating costs, but also significantly improves air quality.

## WSTĘP

Zanieczyszczenie powietrza w Polsce jest na bardzo wysokim poziomie (Domańska i Wojtylak, 2014; Namieśnik i in., 1992). Głównym źródłem zanieczyszczeń są kotły w domach jednorodzinnych, w których spalane są paliwa bardzo złej jakości. Rysunek 1 przedstawia wyniki pomiaru PM<sub>2,5</sub> w centrum Warszawy w dniu 17 stycznia 2020 r. Pomimo tego, że Warszawa posiada największy system ciepłowniczy w Unii Europejskiej (Grzebielec & Rusowicz, 2013; Grzebielec et al., 2015; Werner, 2017; Lund i in., 2010), zanieczyszczenia z osiedli domków jednorodzinnych powodują również zanieczyszczenie w centrum miasta, gdzie dominuje podłączenie budynków do sieci ciepłowniczej (Rusowicz i in., 2017).



Rys. 1. Stężenie PM<sub>2,5</sub> w centrum Warszawy 17 stycznia 2020 r.

W Polsce bardzo dobrze rozwinięte są programy termomodernizacyjne, mające na celu zmniejszenie zużycia energii, a tym samym zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza. Niestety nie wszystko zostało jeszcze osiągnięte (Owczarek i Baryłka, 2019; Rusowicz i Ruciński, 2011; Kajurek i in., 2019). Podczas gdy jakość powietrza zewnętrznego w obecnym systemie prawnym w Polsce jest trudna do poprawy, bardzo ważne staje się utrzymanie dobrej jakości powietrza w pomieszczeniach. Dotyczy to przede wszystkim pomieszczeń, w których przebywają dzieci (Bernstein i in., 2004; Liu i in., 2015; Pui i in., 2014; Griffiths i Eftekhari, 2008; Rosbach i in., 2013).

Wentylacja mechaniczna stosowana w budynkach jest zwykle wyposażona w filtry różnych klas. Filtracja powietrza ma na celu ochronę takich elementów urządzeń jak wymienniki ciepła, rekuperatory czy wentylatory przed zanieczyszczeniami, ale jednocześnie ma na celu poprawę jakości powietrza w budynkach (Xuehuan i in., 2019). Zagadnienia filtracji powietrza są eksplorowane przez wielu badaczy i wszyscy wskazują, że dzięki odpowiedniej filtracji możliwe jest osiągnięcie zadowalającej jakości powietrza, nawet przy silnie zanieczyszczonym powietrzu zewnętrznym (Xuehuan i in., 2019; Park i in., 2011). Badania pokazują, że np. zanieczyszczenie powietrza PM<sub>2,5</sub> wewnątrz pomieszczeń może być nawet kilkukrotnie mniejsze niż na

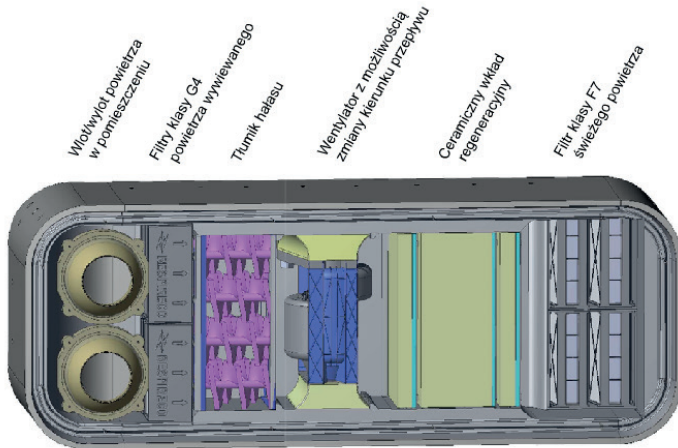
zewnątrz.

W ramach badań postanowiono przeanalizować wpływ stosowania okresowego rekuperatora zbudowanego z wkładu ceramicznego na jakość powietrza w salach lekcyjnych. W pierwszej części określono sprawność cieplną rekuperatora w warunkach laboratoryjnych, a następnie monitorowano stan powietrza podczas jego pracy na sali lekcyjnej. Nowością tych badań jest fakt, że w badaniach zastosowano rekuperator z okresową pracą/przepływem, a nie jak w większości przypadków rozwiązanie oparte na rekuperatorze krzyżowym lub obrotowym.

## 1. METODYKA BADAŃ

### 1.1. Analizowany układ

Aby przeanalizować wpływ rekuperacji na jakość powietrza, do testów efektywności energetycznej wykorzystano urządzenie wentylacyjne Stropex Respiraco. Z technicznego punktu widzenia urządzenie to

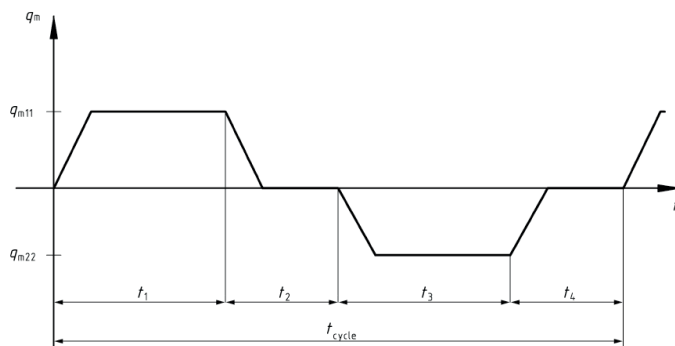


Rys. 2. Wnętrze badanego urządzenia

jest lokalną, jednowentylatorową jednostką odzysku ciepła (Jaworski, 2019; Wasilczuk, 2019; Adamski, 2008; Grzebielec i in., 2014). Podstawowy schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 2. Rysunek przedstawia schemat urządzenia użytego w eksperymencie.

### 1.2. Parametry pracy urządzenia wentylacyjnego

Testowane urządzenie wentylacyjne pracuje cyklicznie. W pierwszym etapie pracy dostarcza do pomieszczenia świeże, przefiltrowane powietrze; w drugim etapie usuwa zużyte powietrze z pomieszczenia na zewnątrz. Dzięki zastosowaniu materiału ceramicznego akumulują-



Rys. 3. Cykl zmiany strumienia powietrza dla badanego urządzenia (EN 13141-8:2014-09 Wentylacja budynków – Badanie wydajności komponentów/produktów do wentylacji mieszkań – Część 8: Badanie wydajności niekanałowych mechanicznych urządzeń nawiewno-wywiewnych (w tym odzysk ciepła) dla mechanicznego Ve, nd).

cego ciepło, ciepło jest odzyskiwane ze zużytego powietrza. Regenerator może pracować na jednym z 10. biegów (prędkość wentylatora) i z dowolnie ustawionym czasem przełączania pomiędzy stopniem nawiewu i wywiewu.

Sprawność cieplna regeneracyjnego wymiennika ciepła została sprawdzona przed zamontowaniem urządzenia w sali lekcyjnej zgodnie z normą PN-EN 13141-8:2014-09. Fazy pracy badanego urządzenia przedstawiono na rysunku 3. Wartość sprawności cieplnej oblicza się wg:

$$\eta_{\theta, su} = \frac{\theta_{22} - \theta_{21}}{\theta_{11} - \theta_{21}} \cdot \frac{q_{m22}}{q_{m11}}, \quad (1)$$

gdzie:  $\theta_{22}$  temperatura powietrza nawiewanego  $\theta_{21}$  temperatura powietrza zewnętrznego  $\theta_{11}$  temperatura powietrza usuwanego;  $q_{m22}$  – strumień masowy powietrza nawiewanego;  $q_{m11}$  – strumień masowy powietrza usuwanego.

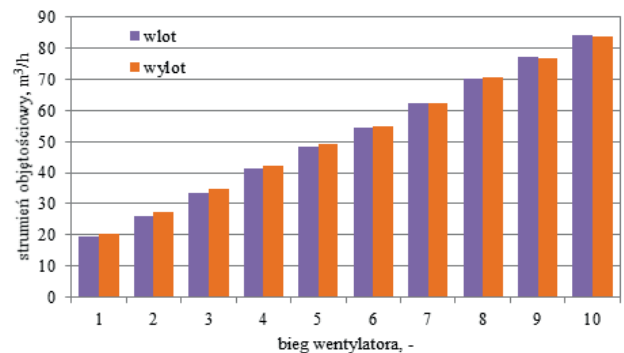
## 2. WYNIKI

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów dla urządzenia pracującego z czasem przełączania pomiędzy nawiewem a wywiewem wynoszącym 60 sekund. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono średnie wartości strumienia objętości powietrza w trybie nawiewno-wywiewnym dla wszystkich 10 biegów. Przepływ powietrza waha się od około 20 m<sup>3</sup>/h (dla najwolniejszego biegu) do około 85 m<sup>3</sup>/h dla najszybszego biegu..

Table 1. Average values of the air stream flowing through the device.

bieg (prędkość wentylatora) [-]	Strumień objętościowy		Strumień masowy		Nominalny strumień masowy*)
	wlot	wylot	wlot	wylot	q <sub>m</sub>
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	kg/h	kg/h	kg/h
1	19,53	20,21	23,44	24,25	22,66
2	26,16	27,53	31,39	33,04	30,34
3	33,41	34,66	40,09	41,59	38,75
4	41,32	42,17	49,59	50,61	47,94
5	48,48	49,09	58,18	58,91	56,24
6	54,49	54,88	65,39	65,86	63,21
7	62,12	62,26	74,55	74,71	72,06
8	70,01	70,76	84,02	84,91	81,22
9	77,11	76,66	92,53	91,99	88,92
10	84,09	83,84	100,91	100,61	97,25

\*) zgodnie z: EN 13141-09.



Rys. 4. Zmierzony strumień objętościowy.

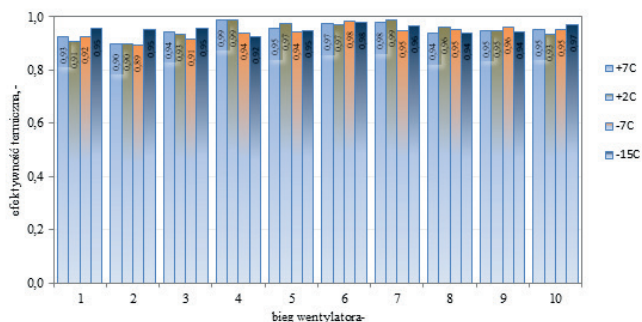
Tabela 2. Zużycie energii elektrycznej podczas przeprowadzanych testów.

bieg (prędkość wentylatora) [-]	włot [W]	wylot [W]	Zmiana kierunku (4s) [W]
1	8,35	8,31	7,59
2	8,65	8,62	7,60
3	9,21	9,17	8,61
4	10,05	9,98	9,00
5	11,14	11,11	10,11
6	12,25	12,25	11,25
7	14,02	14,03	13,30
8	16,13	16,13	15,50
9	18,67	18,64	17,97
10	21,54	21,52	20,90

Urządzenie wykorzystuje wentylator odśrodkowy EC – RadiCal, Typ: K3G133-RA01-03(KG 2012). Rzeczywiste zużycie energii przez wentylator w trybie pracy stabilnej oraz przy przełączaniu pomiędzy nawiewem a wylowem przedstawia tabela 2.

### 2.1. Efektywność energetyczna testowanego urządzenia

Na rysunku 5 przedstawiono wartości współczynnika sprawności cieplnej (mierzonej zgodnie z PN-EN 13141-8:2014-09 dla urządzenia Respireco dla wszystkich biegów (prędkości wentylatora) dla temperatury powietrza zewnętrznego +7 °C, +2 °C, - 7 °C, -15 °C.



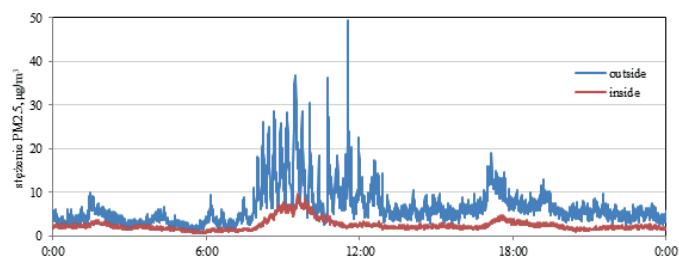
Rys. 5. Sprawność cieplna badanego regeneratora dla różnej temperatury powietrza zewnętrznego.

Pomiary wykazały, że urządzenie posiada bardzo wysoką sprawność cieplną. Uzyskane wartości wahały się od 89 do 99%. Badania wykazały również, że rekuperatory tego typu nie wymagają stosowania ochrony przed zamarzaniem, gdyż temperatura konstrukcji wymiennika nie spada poniżej 0 °C.

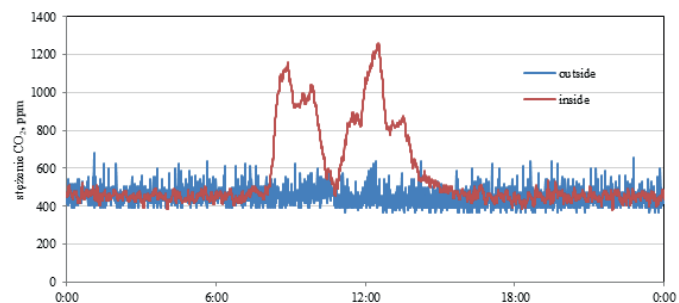
### 2.2. Wyniki pomiarów w miejscu instalacji rekuperatora

Po przetestowaniu urządzenia w laboratorium, urządzenie zostało zainstalowane w szkole podstawowej, zlokalizowanej w Pleszewie (zachodnia Polska). Do badań wybrano dwie sale szkolne o tej samej kubaturze i takiej samej orientacji przestrzennej w stosunku do kierunków geograficznych, przy podobnym nakładzie pracy dziennej i liczbie uczniów. W jednym pomieszczeniu mierzono parametry środowiskowe dla wentylacji wspomaganej przez zamontowane urządzenie, w drugim wentylacja pomieszczenia pozostała bez zmian, czyli zastosowano wentylację naturalną. Na rysunku 6 porównano stężenie pyłu PM2,5 na zewnątrz i wewnątrz pomieszcze-

nia, w którym badany rekuperator nie był używany. Jednak Rysunek 7 przedstawia wyniki testów stężenia CO<sub>2</sub> dla tej samej sytuacji.

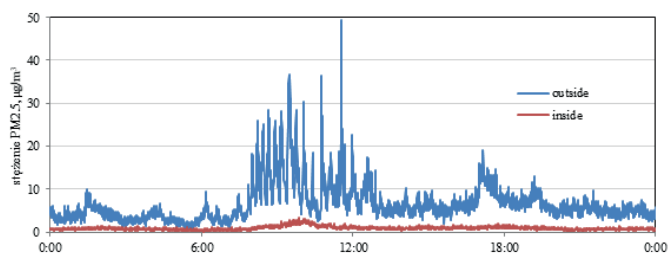


Rys. 6. Stężenie PM2,5 w dniu 2020-02-11 dla pomieszczenia wykładowego bez rekuperacji.

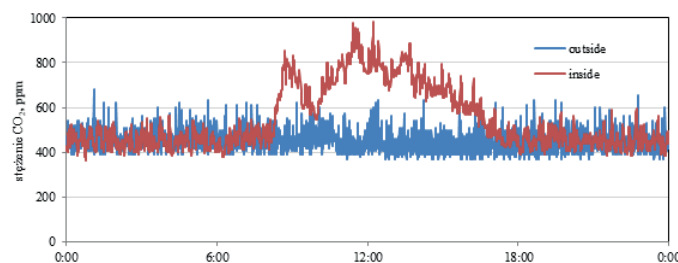


Rys. 7. Stężenie CO<sub>2</sub> dla pomieszczenia wykładowego bez rekuperacji.

Rysunki 8 i 9 przedstawiają te same wyniki w tym samym czasie dla pomieszczeń, w których używany był badany rekuperator. Porównując wykresy można zauważyć, że zastosowanie rekuperacji znacząco obniża stężenie CO<sub>2</sub> i PM2,5. Z wykresów wynika również, że w przypadku PM2,5 stężenie zanieczyszczeń nawet bez zastosowania rekuperacji jest znacznie lepsze po stronie wewnętrznej.



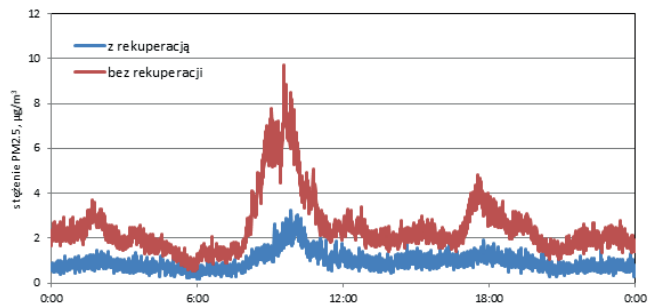
Rys. 8. Stężenie PM2,5 w dniu 2020-02-11 – z wykorzystaniem badanej rekuperacji



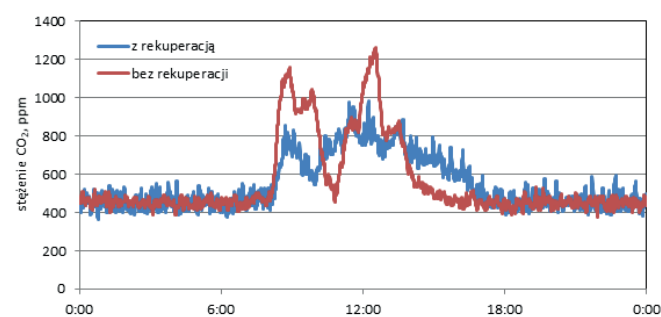
Rys. 9. Stężenie CO<sub>2</sub> w dniu 2020-02-11 dla badanego pomieszczenia z wykorzystaniem rekuperacji



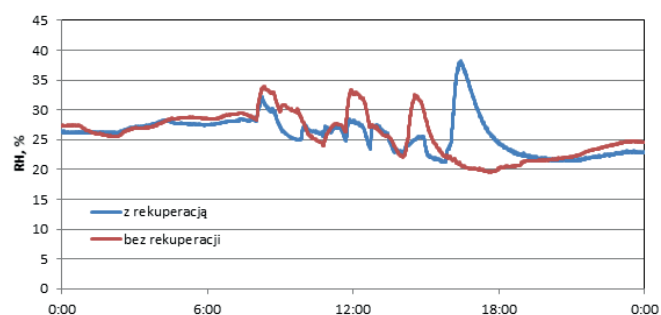
Ponieważ warunki w klasach były porównywalne (temperatura utrzymywana była na poziomie 20 °C, zajęcia z podobną liczbą uczniów odbywały się równolegle), można również porównać podstawowe parametry na zajęciach. Wykresy 10, 11 i 12 przedstawiają porównanie stężenia PM2,5, stężenia CO<sub>2</sub> i wilgotności względnej w tym samym okresie.



Rys. 10. Zmierzony strumień objętościowy.



Rys. 11. Porównanie stężenia CO<sub>2</sub> w klasach dla dnia 2020-02-11



Rys. 13. Relative Humidity for two classrooms at 2020-02-11

Jak pokazano na wykresach, stężenie CO<sub>2</sub>, PM2,5 i wilgotność względna były utrzymywane na niższym poziomie w pomieszczeniu z odzyskiem.

## WNIOSKI

Zastosowanie rekuperatora z wypełnieniem ceramicznym zdecydowanie poprawiło jakość powietrza w sali wykładowej. O ile w przypadku pyłu PM2,5 zauważono, że zarówno przy korzystaniu z rekuperatora, jak i bez, stężenie pyłu jest zdecydowanie mniejsze niż na zewnątrz. Ponadto w obu przypadkach dochodzi do upokorzenia wymagań normatywnych, co oznacza, że w obu przypadkach jakość powietrza jest dobra. Wyraźnie widać też, że w pomieszczeniu, w którym zastosowano rekuperator, stężenie PM2,5 jest o ponad 50% niższe. W przypadku dwutlenku węgla bardzo wyraźnie widać, że zastosowanie rekuperatora zdecydowanie pozytywnie wpływa na jakość powietrza w pomieszczeniu. Wyższe poziomy CO<sub>2</sub> powodują, że uczniowie i nauczyciele są senni i mniej przyswajają wiedzę. Na podstawie przeprowadzonych ekspe-



Rys. 12. Projekt montażu rekuperatora w szkole podstawowej.

rymentów nie można jednoznacznie stwierdzić, że badany rekupe-  
rator ma pozytywny wpływ na jakość powietrza pod względem wil-  
gotności. Ogólnie rzecz biorąc, w krajach północnych zimą powietrze  
w pomieszczeniach jest bardzo suche, ponieważ gdy temperatura  
powietrza na zewnątrz wynosi około 0 °C, poziom wilgotności bez-  
względnej jest bardzo niski, a podniesienie temperatury powietrza  
powoduje znaczny spadek wilgotności względnej. Nawet jeśli w po-  
mieszczeniu znajduje się duża liczba uczniów, wilgotność nie prze-  
kracza zalecanych wartości, a powietrze nadal wydaje się suche.  
W takim przypadku analizę wpływu rekuperacji na wilgotność należy  
przeprowadzić latem, kiedy sytuacja jest dokładnie odwrotna.

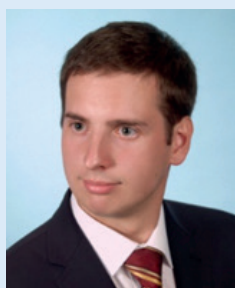
#### Finansowanie

Prace zostały wykonane w ramach projektu badawczego „Opinia  
techniczna urzędzenia wentylacyjnego Respireco” realizowanego dla  
firmy Stropex Sp. J.

#### Bibliografia

- [1] Adamski, M. (2008). Longitudinal flow spiral recuperators in building ventilation systems. *Energy and Buildings*, 40(10), 1883–1888. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.0088>
- [2] Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, Ch., Bernstein, I. L., Bernstein, J. A., Nel, A., Peden, D., Diaz-Sanchez, D., Tarlo, S. M., & Williams, P. B. (2004). Health effects of air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 114(5), 1116–1123. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2004.08.030>
- [3] Domańska, D., & Wojtylak, M. (2014). Explorative forecasting of air pollution. *Atmospheric Environment*, 92, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.041>
- [4] European Committee for Standardization. (2014). *Ventilation for buildings – Performance testing of components/products for residential ventilation – Part 8: Performance testing of un-ducted mechanical supply and exhaust ventilation units (Including Heat Recovery) for mechanical Ve. n.d. (EN 13141-8:2014-09)*.
- [5] Griffiths, M., & Eftekhari, M. (2008). Control of CO<sub>2</sub> in a naturally ventilated classroom. *Energy and Buildings*, 40(4), 556–560. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.013>
- [6] Grzebielec, A., & Rusowicz, A. (2013). Analysis of the use of adsorption processes in trigeneration systems. *Archives of Thermodynamics*, 34(4), 35–49. <https://doi.org/10.2478/aoter-2013-0028>
- [7] Grzebielec, A., Rusowicz, A., Jaworski, M., & Laskowski, R. (2015). Possibility of using adsorption refrigeration unit in district heating network. *Archives of Thermodynamics*, 36(3), 15–24. <https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0019>
- [8] Grzebielec, A., Rusowicz, A., & Ruciński, A. (2014). Analysis of the performance of the rotary heat exchanger in the real ventilation systems. In 9<sup>th</sup> *International Conference*

- Environmental Engineering (9<sup>th</sup> ICEE) – Selected Papers*. Vilnius Gediminas Technical University Press. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.259>
- [9] Jaworski, M. (2019). Mathematical model of heat transfer in PCM incorporated fabrics subjected to different thermal loads. *Applied Thermal Engineering*, 150(5), 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.019>
- [10] Kajurek, J., Rusowicz, A., Grzebielec, A., Bujalski, W., Futyma, K., & Rudowicz, Z. (2019). Selection of refrigerants for a modified organic rankine cycle. *Energy*, 168, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.024>
- [11] KG, ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. (2012). *EC centrifugal module – RadiCal*.
- [12] Liu, C., Hsu, P. C., Lee, H. W., Ye, M., Zheng, G., Liu, N., Li, W., & Cui, Y. (2015). Transparent air filter for high-efficiency PM<sub>2.5</sub> capture. *Nature Communications*, 6, 6205. <https://doi.org/10.1038/ncomms7205>
- [13] Lund, H., Möller, B., Mathiesen, B. V., & Dyrrelund, A. (2010). The role of district heating in future renewable energy systems. *Energy*, 35(3), 1381–1390. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.023>
- [14] Namieśnik, J., Górecki, T., Kozdroń-Zabiegała, B., & Łukasiak, J. (1992). Indoor Air Quality (IAQ), pollutants, their sources and concentration levels. *Building and Environment*, 27(3), 339–356. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90034-M](https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90034-M)
- [15] Owczarek, M., & Baryłka, A. (2019). Determining the thermal diffusivity of the material based on the measurement of the temperature profile in the wall. *Rynek Energii*, 143(4), 63–69.
- [16] Park, J. H., Yoon, K. Y., & Hwang, J. (2011). Removal of submicron particles using a carbon fiber ionizer-assisted medium air filter in a Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC) System. *Building and Environment*, 46(8), 1699–1708. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.010>
- [17] Pui, D. Y. H., Chen, S.-C., & Zuo, Z. (2014). PM<sub>2.5</sub> in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 13, 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.11.001>
- [18] Rosbach, J. T., Vonk, M., Duijm, F., Van Ginkel, J. T., Gehring, U., & Brunekreef, B. (2013). A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality: The FRESH study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 12, 110. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-110>
- [19] Rusowicz, A., & Ruciński, A. (2011). The mathematical modelling of the absorption refrigeration machines used in energy systems. *Environmental Energy*, 802–806.
- [20] Rusowicz, A., Laskowski, R., & Grzebielec, A. (2017). The numerical and experimental study of two passes power plant condenser. *Thermal Science*, 21(1), 353–362. <https://doi.org/10.2298/TSCI150917011R>
- [21] Wasilczuk, J. (2019). Threats occurring in the functioning of shelter ventilation installations. *Modern Engineering*, 2, 55–60.
- [22] Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 137, 617–631. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>
- [23] Gao, X., Yanyi, X., Yunfei, C., Shi, J., Chen, F., Lin, Z., Chen, T., Xia, Y., Shi, W., & Zhao, Z. (2019). Effects of Filtered fresh air ventilation on classroom indoor air and biomarkers in saliva and nasal samples: A randomized crossover intervention study in preschool children. *Environmental Research*, 179(Part A), 108749. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108749>



#### mgr inż. Adam Szelański

Adiunkt w Zakładzie Chłodziwa i Energetyki Budynku na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Główne zainteresowania to urządzenia adsorpcyjne wykorzystywane zarówno w chłodziwie, w energetyce jak i podczas magazynowania energii.



#### dr inż. Andrzej Grzebielec

Adiunkt w Zakładzie Chłodziwa i Energetyki Budynku na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W pracach badawczych zajmuje się szeroko pojętą energetyką przemysłową, obejmującą zarówno generowanie różnych form energii jak i ich wykorzystanie w różnych procesach.