

# Współpraca centrali wentylacyjnej z regulatorami zmiennego przepływu powietrza VAV

Mirosław Dechnik, Karina Grzywocz, Anna Romańska-Zapała

## Wstęp

Ludzie spędzają większą część życia w budynkach, które chronią ich przed wpływem czynników atmosferycznych. Zamknięte pomieszczenia z jednej strony zapewniają pewien poziom komfortu użytkownika, a z drugiej sprzyjają niekorzystnym zmianom fizykochemicznym powietrza zużywanego przez użytkowników. Dodatkowym źródłem zanieczyszczeń i nadmiaru ciepła są urządzenia, których obecnie używa się coraz więcej. „Celem wentylacji jest poprawa stanu i składu powietrza, z punktu widzenia wymagań organizmu ludzkiego lub procesów produkcyjnych, co osiąga się przez wymianę powietrza wewnątrz pomieszczeń. Wymiana powietrza w pomieszczeniu powoduje usunięcie zanieczyszczeń gazowych, parowych i pyłowych, względnie ich rozcieńczenie do stanu dopuszczalnego ze względów zdrowotnych” [1].


Polska norma PN-83/B-03430 [2] mówi, że w każdym nowo wznoszonym budynku mieszkalnym, zamieszkania zbiorowego oraz użyteczności publicznej powinien być zaprojektowany system wentylacji.

Wentylacja pomieszczeń ma na celu zapewnienie odpowiednich warunków użytkownika, czyli dostarczenie świeżego powietrza (w przypadku wentylacji mechanicznej można zmieniać jego parametry na pożądane) i odprowadzenie powietrza zanieczyszczonego. Skuteczność wentylacji można oceniać na podstawie jej możliwości usuwania zanieczyszczeń. W trakcie użytkownika w pomieszczeniu wzrasta koncentracja dwutlenku węgla i wilgoci, możliwe jest pojawienie się bakterii chorobotwórczych wraz ze wzrostem poziomu substancji organicznych. Czynniki te wpływają nie tylko na samopoczucie

**Streszczenie:** Budynki coraz częściej wyposażane są w wentylację mechaniczną. W wybranych przypadkach jest to wymóg określony w obowiązujących aktach prawnych. Zwiększa się również liczba obiektów, gdzie inwestor świadomy korzyści wynikających z zastosowania tego typu wentylacji decyduje się na jej wykorzystanie bez konieczności spełnienia jakichkolwiek wymogów. Ważny jest aspekt zapewnienia komfortu użytkownika, ale też efektywne zużycie energii poprzez optymalne sterowanie pracy centrali wen-

tylacyjnej, współpracującej z regulatorami zmiennego przepływu powietrza VAV. Podczas prezentowanych badań *in situ* wyznaczone zostały zależności wynikające ze współpracy elementów badanego układu. Stanowią one podstawę do optymalizacji algorytmów sterowania współpracą: centrala wentylacyjna – VAV.

Słowa kluczowe: wentylacja mechaniczna, regulatory zmiennego przepływu powietrza VAV, sterowanie, efektywność energetyczna, inteligentny budynek

 **Abstract:** Increasing number of buildings is equipped with mechanical ventilation. In selected cases it is required by the applicable legislation. Nevertheless, in many cases, the investor is aware of the benefits of using this type of ventilation and therefore decides to use it without having to meet any requirements. The aspect of user comfort is very important, but the efficient use of energy through the optimal control of the operation of the air handling unit, which works with VAV

airflow regulators should be taken into account. In the presented „in situ” studies the dependences between the cooperation of the elements of the studied system were determined. They are the basis for the optimization of control algorithms of the cooperation of the air handling unit with VAV airflow regulators.

Keywords: mechanical ventilation, VAV, control, energy efficiency, intelligent building

(ból głowy, trudność w oddychaniu), ale mogą poważnie zaszkodzić zdrowiu ludzi. W skrajnych przypadkach, gdy wydzielają się substancje toksyczne, przebywanie w źle wentylowanym pomieszczeniu może zagrażać życiu.

W budynkach powinien być zapewniony komfort użytkownika. Składają się na niego komfort termiczny, odpowiednio niski poziom hałasu oraz właściwa jakość powietrza. „Komfort cieplny (termiczny) wyraża satysfakcję danej osoby

(grupy osób) z warunków termicznych środowiska w pomieszczeniach, w którym osoba (osoby) ta przebywa” [3]. Stan ten jest związany z równowagą pomiędzy stratą ciepła do otoczenia oraz jego zyskami spowodowanymi przemianami metabolicznymi oraz wynikającymi z warunków środowiskowych. Z powodu różnic biologicznych komfort termiczny dla każdej osoby charakteryzuje się innymi parametrami, ale możliwe jest dobranie ich w taki sposób, aby były

**reklama**

odpowiednie dla większości użytkowników. Systemy wentylacji i klimatyzacji mają wpływ na każdy z czynników decydujących o komforcie użytkownika, dlatego tak ważne jest odpowiednie ich zaprojektowanie.

Brak przetworzenia powietrza powoduje znaczne straty ciepła, niekontrolowany napływ zanieczyszczeń oraz brak możliwości wpływania na mikroklimat pomieszczeń. Z wyżej wymienionych powodów w coraz większej liczbie budynków montowany jest system wentylacji bądź klimatyzacji mechanicznej. Przykładowo w obiektach biurowych, gdzie występują duże zyski ciepła (duża ilość osób i urządzeń emitujących ciepło, duże powierzchnie przeszklone), najważniejszym wymogiem wentylacji staje się nie zapewnienie odpowiedniej ilości krotności wymian powietrza, ale odbieranie nadmiaru ciepła i wilgoci.

Wraz z kolejnymi sposobami realizacji wentylacji i klimatyzacji mechanicznej rośnie ilość badań przeprowadzanych w tym zakresie. Przykładowo naukowcy z Danii [4] przeprowadzili badania symulacyjne wentylacji mechanicznej opierającej się na kontroli ilościowej powietrza nawiewanego, w celu sprawdzenia możliwości obniżenia zużycia energii, zmieniając ciśnienie w głównym przewodzie wentylacyjnym w zależności od potrzeb. Z ich pracy wynika, że możliwe jest zmniejszenie o 14% zużycia energii potrzebnej na pracę wentylatorów.

Rahnama et. al. [5] przeprowadzili podobne badania, ale z wykorzystaniem modelu. Zgodnie z ich obliczeniami możliwe jest nawet 20% zmniejszenie zużycia energii potrzebnej na pracę wentylatorów.

Hesaraki et. al. [6] wykonali badania dotyczące jakości powietrza w nowo wybudowanych budynkach. W swej pracy dowodzą, iż zmniejszenie poziomu wentylacji w czasie, kiedy nie ma w nim użytkowników, do  $0,1 \text{ l/sm}^2$ , powoduje znaczne przekroczenie norm stężenia lotnych związków organicznych, pomimo dozwolenia takiego działania przez szwedzką normę.

Yu wraz z zespołem [7] skupili się na wpływie zewnętrznych stężeń dwutlenku węgla i organicznych związków lotnych na jakość powietrza wewnętrznego. W swej pracy wskazują, że zarówno

wentylacja mechaniczna pracująca na stałym poziomie, jak i regulowana na podstawie stężenia dwutlenku węgla może powodować znaczne zwiększenie koncentracji organicznych związków lotnych wewnątrz budynku, jeżeli zewnętrzna koncentracja tych zanieczyszczeń jest wysoka.

Dutka et. al. [8] przeprowadzili badania optymalnego sterowania systemem wentylacyjnym wyposażonym w regulatory przepływu w części mieszkalnej hotelu. W swych badaniach skupili się przede wszystkim na możliwości zmniejszenia zużycia energii.

W związku z brakiem badań *in situ* dotyczących zarówno poprawy efektywności energetycznej, jak i monitorowania poziomu komfortu użytkownika w polskich warunkach klimatycznych, postanowiono zbadać współpracę centrali wentylacyjnej z regulatorami zmiennego przepływu na drodze ilościowej VAV (ang. *Variable Air Volume* – VAV) dla zapewnienia zadanych parametrów powietrza w obsługiwanych pomieszczeniach przy wykorzystaniu zintegrowanego systemu sterowania procesami.

Badania zostały przeprowadzone w budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego (MLBE), którego infrastruktura pozwala na szeroko zakrojone badania działania poszczególnych instalacji, ich współpracy, a także, dzięki zaimplementowanemu systemowi BMS (ang. *Building Management System*), na optymalizację algorytmów ich działania.

### Opis badań

W miesiącach letnich 2017 roku przeprowadzono serię badań o zmiennych parametrach wejściowych. Harmonogram badań został zaimplementowany za pomocą systemu BMS. W trakcie badań zweryfikowano, czy implementacja regulatorów przepływu VAV korzystnie wpłynie na komfort użytkownika oraz zmniejszy zużycie energii.

W artykule przedstawiono wyniki badań dla jednego z pomieszczeń laboratorium. Znajduje się ono na czwartym piętrze laboratorium od strony północnej. Przeszklenia nie dopuszczają znaczącej ilości promieniowania słonecznego z powodu kierunku, w jakim są skierowane oraz bliskości sąsiedniej zabudowy.

W pomieszczeniu sporadycznie przebywają ludzie, co głównie można zaobserwować poprzez ciągły monitoring zmian stężenia dwutlenku węgla.

### Centrala wentylacyjna

Pomieszczenie badane było zaopatrywane w świeże powietrze poprzez centralę wentylacyjną nawiewno-wywiewną CWK, wyposażoną w rekuperator oraz chłodnicę i nagrzewnicę. Centrala stabilizowała na zadanym poziomie temperaturę powietrza usuwanego z grupy 4 pomieszczeń na III i IV piętrze budynku oraz ciśnienia w przewodach wentylacyjnych w zależności od położenia regulatorów VAV obsługiwanych pomieszczeń.

### Regulatory VAV

Powietrze przetworzone przez centralę wentylacyjną było następnie dostarczane do pomieszczenia w ilości kontrolowanej przez regulatory przepływu VAV. Podczas badania testowany był wielostopniowy algorytm nadrzędny sterujący zaopatrzeniem w powietrze pomieszczeń w zależności od liczby przebywających w nich osób (zmiany stężenia dwutlenku węgla) oraz uchybu regulacji temperatury. W zależności od parametrów regulatory VAV reagują w odmienny sposób, do czego dostosowuje się centrala wentylacyjna CWK, zapewniając odpowiednie ciśnienie w układzie oraz temperaturę powietrza dostarczanego do pomieszczeń.

Ilość powietrza nawiewanego i wywiewanego sterowana była za pomocą dwóch regulatorów przepływu VAV. Jeden był odpowiedzialny za nawiew, drugi za wywiew. Procentowa ilość nawiewanego i wywiewanego powietrza zależała od stężenia dwutlenku węgla i temperatury wewnątrz pomieszczenia oraz temperatury zadanej. Poszczególne progi przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Jak wynika z tabeli, regulatory VAV pozwalały na cztery różne poziomy przepływu powietrza. Regulacja na poziomie VAV przebiegała płynnie, a wartości stężenia dwutlenku węgla i temperatury były odczytywane przez sensory zamontowane w pomieszczeniu.

Regulatory przepływu VAV odpowiedzialne za ilość powietrza nawiewanego i wywiewanego z pomieszczenia działały, biorąc pod uwagę inne parametry.

**Tabela 1.** Kryteria przełączeniowe dotyczące stężenia dwutlenku węgla

| Regulacja ze względu na CO <sub>2</sub> |              |
|---|--------------|
| Stężenie CO <sub>2</sub> [ppm]          | Przepływ [%] |
| Zadane + 100                            | 100          |
| Zadane - 100                            | 25           |

**Tabela 2.** Kryteria przełączeniowe dotyczące temperatury wewnątrz pomieszczenia

| Regulacja ze względu na temperaturę |              |
|-------------------------------------|--------------|
| Temperatura w pomieszczeniu [°C]    | Przepływ [%] |
| Zadana + 0,5                        | 40           |
| Zadana + 1                          | 60           |
| Zadana + 2                          | 100          |

Spodziewano się, iż temperatura zadana 20°C przy temperaturach zewnętrznych sięgających 35°C, przy ograniczonym możliwym do uzyskania przepływie oraz niemożności wprowadzania do pomieszczenia powietrza o zbyt niskiej temperaturze (ze względu na komfort ludzi), prawdopodobnie nie zostanie osiągnięta jedynie dzięki pracy rekupe-ratora i chłodnicy zlokalizowanej w centrali wentylacyjnej.

W ramach eksperymentu przeprowadzono dwa cykle badawcze, każdy trwający dwa tygodnie. Cykle różniły się między sobą temperaturą zadaną w pomieszczeniu. W pierwszym cyklu temperatura zadana wynosiła 20°C, natomiast w drugim 22°C. Warunki pracy poszczególnych urządzeń zależały od zmierzonych parametrów wewnętrznych.

### Wentylacja płaszczyznowa

Powietrze do pomieszczenia było dostarczane poprzez aktywną belkę chłodzącą. Jest to rozwiązanie, które należy umieścić w kategorii klimatyzacji, i jest ono korzystne ze względów ekonomicznych i komfortowych. Belki chłodzące dzięki krążącemu w nich zimnemu medium chłodzą powietrze w pomieszczeniu. Ich działanie opiera się głównie na zjawisku konwekcji: ciepłe powietrze unosi się i przepływa przez belkę, gdzie jest chłodzone zimnym medium, co powoduje zmianę jego gęstości i opadanie. W pewnym stopniu belki chłodzące działają również poprzez promieniowanie. Gdy zyski ciepła są bardzo duże, a zanieczyszczenie

powietrza stosunkowo małe, możliwe jest dostarczanie do pomieszczenia minimum powietrza świeżego niezbędne ze względów higienicznych, przy zachowaniu komfortowych warunków użytkowania.

Dodatkowym atutem zastosowania aktywnych belek chłodzących jest nawiew powietrza nie przez pojedyncze anemostaty czy kratki wentylacyjne, ale poprzez dużo większą powierzchnię belki. W ten sposób zapewniony jest bardziej równomierny rozptył powietrza. Skutkuje to nie tylko lepszym odbiorem przez użytkowników, ale również zmniejszeniem prawdopodobieństwa wystąpienia stref zastoju czy szczególnie burzliwego przepływu powietrza. Dodatkowo belki chłodzące generują znacznie mniejszy poziom hałasu niż anemostaty.

W trakcie eksperymentu aktywna belka chłodząca została wykorzystana jedynie w celu dostarczenia powietrza do pomieszczenia, bez dodatkowego jego chłodzenia.

**Rys. 1.** Pasywna belka chłodząca

### Wyniki badań

Z obu cykli badań wybrano dwa trzydniowe okresy. Na rys. 2, 3, 4, 5 zaprezentowano pomiary dla temperatury zadanej 20°C. Natomiast otrzymane wyniki dla drugiego cyklu pomiarowego, gdy temperatura zadana wynosiła 22°C, zawarto na rys. 6, 7, 8 i 9.

Temperatura zadana 20°C w badanym pomieszczeniu nie została osiągnięta w całym okresie badań (rys. 2). Przepływ na regulatorze zmiennego przepływu powietrza VAV zwiększył się zgodnie z warunkiem zastosowanym w algorytmie sterowania (rys. 3). Temperatura nawiewu była utrzymywana na stałym poziomie (rys. 4). W trakcie badań w pomieszczeniu sporadycznie przebywali ludzie. Monitoring zmian dwutlenku węgla nie wykazał jego istotnych

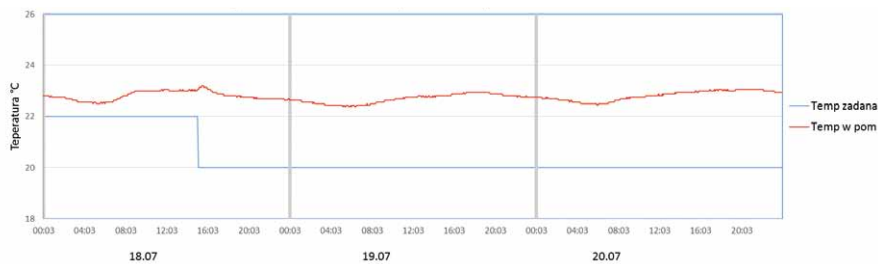
reklama

zmian. Temperatura zewnętrzna w badanym okresie dochodziła w ciągu dnia do 35°C (rys. 5), co mogło wpłynąć na nieosiągnięcie przez badany system temperatury zadanej 20°C.

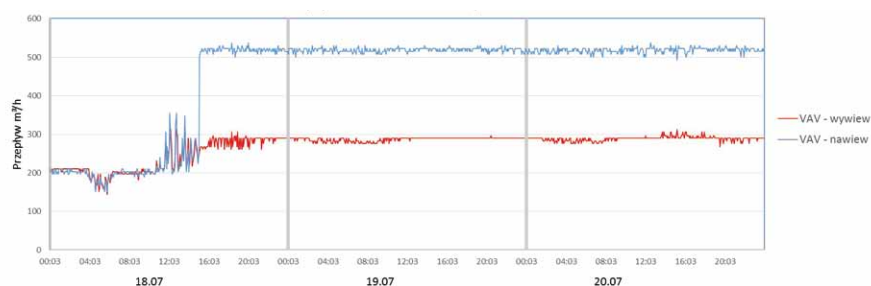
W przypadku cyklu badań, gdzie temperatura zadana w pomieszczeniu wynosiła 22°C, wartość ta została osiągnięta (rys. 6). Współpraca centrali wentylacyjnej z regulatorami zmiennego przepływu powietrza VAV była skuteczna – w przypadku wzrostu temperatury mierzonej w pomieszczeniu przepływ VAV się zwiększał (rys. 6 i 7). Zmiany temperatury nawiewu w tym okresie (rys. 8) wynikały z działania regulatora centrali wentylacyjnej. Temperatura zewnętrzna (rys. 9) osiągała wartości około 25–27°C, co również mogło wpłynąć korzystnie na utrzymanie zadanej temperatury.

## Podsumowanie

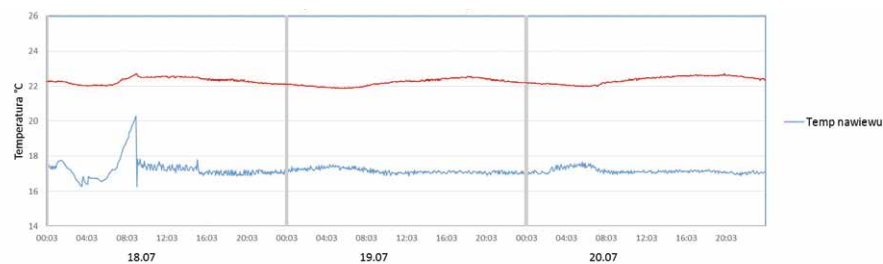
Badanie *in situ* współpracy centrali wentylacyjnej z regulatorami zmiennego przepływu powietrza VAV celem zapewnienia zadanych parametrów powietrza w obsługiwanych pomieszczeniach ma istotne znaczenie praktyczne. Prawidłowe zorganizowanie pracy tych dwóch elementów wentylacji mechanicznej poprzez optymalizację algorytmów ich sterowania pozwoli na poprawę efektywności energetycznej systemu wentylacji jako całości. Badanie wykazało, że chłodzenie przy wykorzystaniu jedynie wentylacji mechanicznej nie jest wystarczające, z powodu znaczącego wpływu czynników zewnętrznych (przede wszystkim temperatury) oraz wewnętrznych (temperatury w sąsiadujących pomieszczeniach). Obserwacja pracy regulatorów zmiennego przepływu powietrza VAV pozwala stwierdzić, że możliwe jest lepsze dopasowanie ich algorytmu pracy do dynamiki zmian parametrów powietrza w budynku. Istotne znaczenie może mieć także uwzględnienie w algorytmie sterowania większej liczby uwzględnianych parametrów, takich jak zmienna liczba użytkowników (dwutlenek węgla), zyski ciepła z zewnątrz, wilgotność itp. Pozwoli to na poprawę efektywności energetycznej budynku jako całości – powtarzalność układu, przy zachowaniu założonego komfortu użytkowego.



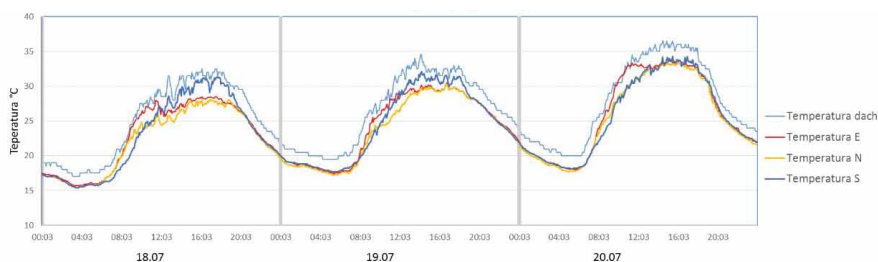
Rys. 2. Temperatura zadana i mierzona dla przełączenia z 22°C na 20°C



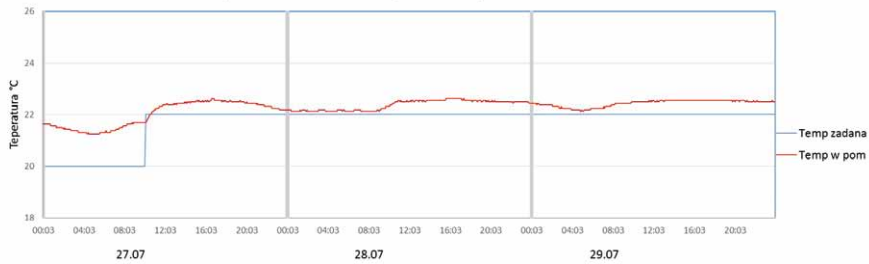
Rys. 3. Zarejestrowane przepływy na VAV - nawiew i wywiew dla przełączenia z 22°C na 20°C temperatury zadanej



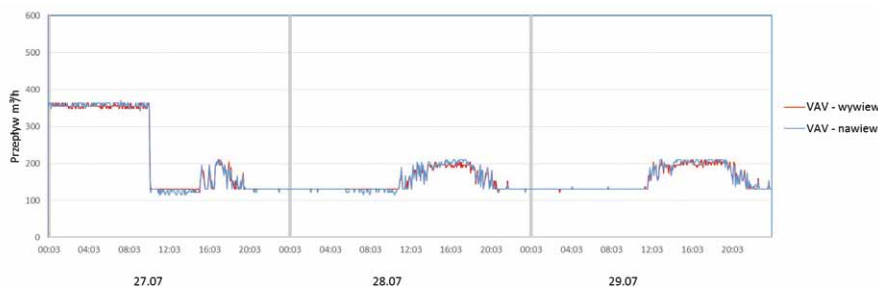
Rys. 4. Temperatury nawiewu i wywiewu dla przełączenia z 22°C na 20°C temperatury zadanej



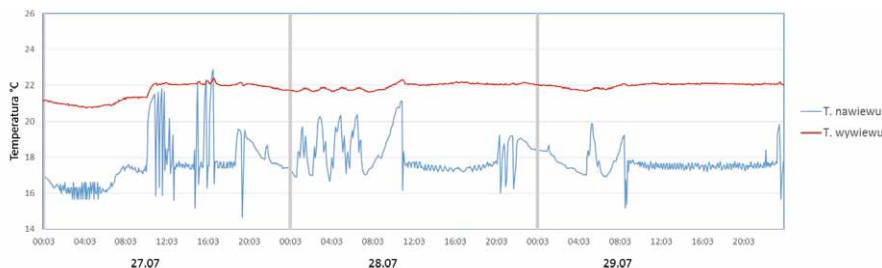
Rys. 5. Temperatura zewnętrzna w okresie 18-20 lipca



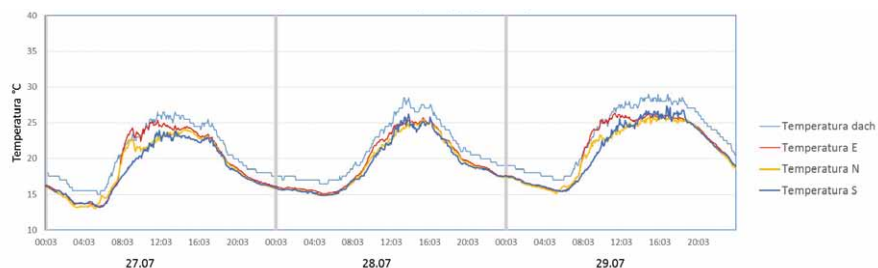
Rys. 6. Temperatura zadana i mierzona dla przełączenia z 20°C na 22°C



Rys. 7. Zarejestrowane przepływy na VAV – nawiew i wywiew dla przełączenia z 20°C na 22°C temperatury zadanej



Rys. 8. Temperatury nawiewu i wywiewu dla przełączenia z 20°C na 22°C temperatury zadanej



Rys. 9. Temperatura zewnętrzna w okresie 27-29 lipca

## Literatura

- [1] MALICKI M.: *Wentylacja i klimatyzacja*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.
- [2] PN-83/B-03430 *Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej*.
- [3] SUDOŁ-SZOPIŃSKA I., CHOJNACKA A.: *Określanie warunków komfortu termicznego w pomieszczeniach za pomocą wskaźników PMV i PPD*. „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka”, 5/2007, s. 19–23.
- [4] KOULANI CH.S., HVIID CH.A., TERKILDSEN S.: *Optimized damper control of pressure and airflow in ventilation systems*. Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund University, s. 822–829.
- [5] RAHNAMA S., AFSHARI A., BERGSOE N., SADRIZADEH S.: *Experimental study of the pressure reset control strategy for energy-efficient fan operation: Part 1: Variable air volume ventilation system with dampers*. Energy and Buildings, 139/2017, s. 72–77.
- [6] HESARAKI A., HOLMBERG S.: *Demand-controlled ventilation in new residential buildings: Consequences on indoor air quality and energy savings*. Indoor and Built Environment, 24/2013, s. 162–173.
- [7] YU C., LI M., CHAN V., LAI A.: *Influence of mechanical ventilation system on indoor carbon dioxide and particulate matter concentration*. Building and Environment, 76/2014, s. 73–80.
- [8] DUTKA A., MRÓZ T.M.: *The Influence of IAQ on the Energy Performance of VAV System – a Case Study*. „Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo i Wentylacja”, 12/2016, s. 511–516.
- [9] Dyrektywa 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.

mgr inż. Mirosław Dechnik – Politechnika Krakowska, Małopolskie Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego

mgr inż. Karina Grzywocz – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

dr inż. Anna Romańska-Zapała – Politechnika Krakowska, Małopolskie Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego

artykuł recenzowany