

Działanie wymienników do odzysku ciepła na tle zachodzących zmian klimatu

Operation of heat recovery exchangers against climate change

SYLWIA SZCZĘŚNIAK, ŁUKASZ STEFANIAK, MAŁGORZATA MAŁYSZKO, PAULINA KANAŚ, AGNIESZKA GRABKA, WERONIKA MICHALAK

DOI 10.36119/15.2023.4.4

W artykule omówiono wpływ zmian klimatu, zachodzących we Wrocławiu, na działanie wymienników do odzysku ciepła. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ regulacji sprawności temperaturowej odzysku ciepła na czas działania chłodnicy i nagrzewnicy powietrza, a tym samym na energię niezbędną do ich eksploatacji. W celu zobrazowania rocznego cyklu pracy typowego systemu wentylacji z chłodzeniem i z wymiennikiem do odzysku ciepła, dla przyjętych założeń, wykonano wykres t-tz. Dla wykazania zachodzących zmian klimatycznych porównano dane obliczeniowe przyjmowane zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, z późn. zm.) z danymi udostępnionymi przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju (1971–2000) oraz z danymi z lat 1996–2022 dostępnymi na portalu meteomodel.pl. Wykazano, że zmiany klimatyczne spowodowały wzrost średniej temperatury powietrza zewnętrznego, jaką przyjmuje się do obliczeń w okresie zimowym i letnim we Wrocławiu o około 5 K w stosunku do danych normatywnych. Wskazano, że dla najnowszych, uśrednionych danych (1996–2022) czas występowania temperatury powietrza zewnętrznego w zakresie od 0°C do +17°C stanowi około 68% czasu w roku. Wpływa to na wzrost możliwości wykorzystania free-cooling, a tym samym ograniczenia energii niezbędnej do ochładzania powietrza.

Słowa kluczowe: wentylacja, sprawność temperaturowa, chłodnica, nagrzewnica, energia, free-cooling

The article discusses the influence of climate change in Wrocław on the operation of heat recovery exchangers. The main focus is the influence of heat recovery temperature efficiency regulation on the cooler and heater operation time and thus on the energy required for their operation. A typical HVAC system with heat recovery system operation is evaluated using a t-tz chart. To present ongoing climate changes, a comparison of design data from the Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 is made, with later amendments and data released by the Ministry of Investment and Development (1971–2000) and data from 1996–2022 available at meteomodel.pl. The article provides data that confirm that climate changes caused an increase in outdoor temperature air by 5 K that should be used as design parameters (compared to regulations) for the winter and summer conditions in the city of Wrocław. Currently, the duration of outdoor air temperature (mean values for the period 1996–2022) in the range of 0–17°C is shown to be approximately 68% of the year. Therefore, the possibility of using free-cooling is significantly increased, influencing the reduction of the energy required for cooling purposes.

Keywords: ventilation, temperature efficiency, heat exchanger, air cooler, heating coil, energy, free-cooling

Wstęp

Systemy wentylacyjne oraz klimatyzacyjne są jednymi z najbardziej energochłonnych instalacji eksploatowanych w budynkach użyteczności publicznej i przemysłowych [1]. Ich wykorzystanie poprawia komfort życia [2,3,4], a odpowiednio zaprojektowane zapewniają bezpieczne przebywanie w budynkach [5,6]. Najważniejszym zadaniem systemów wentyla-

cyjnych jest usuwanie z pomieszczeń powietrza zanieczyszczonego i dostarczanie w to miejsce powietrza czystego. Zadaniem tych systemów jest także utrzymanie odpowiedniej temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń. Zadaniem systemów klimatyzacyjnych jest utrzymanie co najmniej czystości, temperatury oraz wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach obsługiwanych. Czystość powietrza uzyskiwana jest przez

odpowiednią filtrację powietrza nawiewanego. Temperatura, oraz wilgotność względna powietrza w pomieszczeniach uzyskiwane są poprzez odpowiednie uzdatnianie powietrza zewnętrznego lub mieszanie powietrza zewnętrznego i obiegowego. Parametry powietrza zewnętrznego, w warunkach klimatycznych Polski, wykazują znaczne zróżnicowanie w ciągu roku, dlatego wymagane jest zastosowanie odmiennego uzdatniania

dr inż. Sylwia Szczęśniak <https://orcid.org/0000-0003-4358-0263>, mgr inż. Łukasz Stefaniak <https://orcid.org/0000-0002-0291-1575>, mgr inż. Małgorzata Małyszko <https://orcid.org/0000-0002-1397-9743>, mgr inż. Paulina Kanaś <https://orcid.org/0000-0001-5291-4857> – Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Politechnika Wrocławska inż. Agnieszka Grabka, Weronika Michalak – student Wydziału Inżynierii Środowiska, Koło Naukowe Environmental Team, sekcja Energy Loop, Politechnika Wrocławska

Adres do korespondencji/ Corresponding author: sylwia.szczesniak@pwr.edu.pl

powietrza zewnętrznego (lub mieszanie powietrza zewnętrznego i obiegowego) w okresie zimnym (ogrzewanie i/lub nawilżanie) oraz w okresie ciepłym (ochładzanie i osuszanie) [7].

Ze względu na konieczność utrzymania, nierzadko przez całą dobę, wymaganej czystości oraz warunków termicznych czy wilgotnościowych powietrza w pomieszczeniach, praca systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych związana jest z dużym zapotrzebowaniem na ciepło (ochładzanie, ogrzewanie, osuszanie) oraz energię elektryczną (transport powietrza, nawilżanie parowe). W celu obniżenia zużycia ciepła w układach wykorzystywane są wymienniki do odzysku ciepła (WOC) i/lub recyrkulacja powietrza usuwanego z pomieszczenia. Rozwiązania te znacząco ograniczają zużycie energii poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego z powietrza wywiewanego. W systemach bez WOC lub recyrkulacji, ciepło zawarte w powietrzu z pomieszczenia zostaje bezpowrotnie utracone. Nie bez powodu stosowanie WOC w instalacjach wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnych lub klimatyzacji o wydajności większej lub równej 500 m³/h jest wymagane na podstawie Warunków Technicznych [8].

Różne sposoby odzysku ciepła z powietrza wywiewanego stosowane są zarówno w pomieszczeniach mieszkalnych, użyteczności publicznej [9], jak i w pomieszczeniach o podwyższonych wymaganiach (pomieszczenia czyste, przemysłowe i in.) [10]. Zadaniem WOC w okresie zimowym jest wykorzystanie ciepła z powietrza usuwanego i przekazanie go do oczyszczonego powietrza zewnętrznego. W okresie letnim kierunek przepływu ciepła jest odwrotny, powietrze zewnętrzne zostaje wstępnie ochłodzone wskutek przekazania ciepła z powietrza zewnętrznego do chłodniejszego powietrza wywiewanego. Należy jednak podkreślić, że w warunkach klimatycznych Polski zastosowanie WOC jest opłacalne tylko wtedy, gdy zachowane jest racjonalne sterowanie sprawnością odzysku ciepła w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego. Polega ono na wykorzystaniu potencjału chłodniczego powietrza zewnętrznego do utrzymania wymaganej temperatury powietrza nawiewanego dostarczanego do pomieszczenia [11]. Ten rodzaj free-cooling jest możliwy w okresach przejściowym i letnim, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od temperatury powietrza w pomieszczeniu, a sprawność odzysku ciepła jest ograniczona lub zerowa.

Sterowanie sprawnością WOC w okresie przejściowym polega na regulacji

sprawności z poziomu wartości maksymalnej do całkowitej rezygnacji z odzysku ciepła. W wymiennikach obrotowych realizowane jest to za pomocą redukcji prędkości obrotowej rotora aż do jego zatrzymania. W przypadku wymienników krzyżowych niezbędne jest wykorzystanie by-passu z przepustnicami regulacyjnymi. Jego zastosowanie pozwala na częściowe lub całkowite przekierowywanie strumienia powietrza zewnętrznego do sekcji poza wymiennikiem. Dzięki temu regulowany jest strumień powietrza przepływający przez WOC, gdzie następuje odzysk ciepła. Podczas płynnej redukcji odzysku ciepła temperatura powietrza za WOC powinna być zgodna z wymaganą temperaturą powietrza nawiewanego. Natomiast, gdy WOC nie jest wykorzystywany, temperatura powietrza za WOC jest taka jak temperatura powietrza zewnętrznego.

Obecnie producenci dążą do opracowania WOC o jak największej sprawności. Służą to ograniczeniu zapotrzebowania na energię, które jest zdefiniowane prawnie [12,13,14]. Jednak wysokosprawną konstrukcję WOC wiąże się ze zwiększeniem oporów przepływu powietrza [15]. Istnieje przekonanie, że WOC z wyższymi sprawnościami pracują lepiej i dłużej w ciągu roku. Powstaje jednak pytanie, czy w świetle bardzo rygorystycznych wymagań dotyczących izolacyjności przegród budowlanych oraz zachodzących zmian klimatycznych stosowane w Polsce WOC powinny charakteryzować się wysoką sprawnością.

Celem artykułu jest przedstawienie oraz omówienie wykorzystania WOC, o różnych wartościach sprawności temperaturowej, na tle zmian temperatury powietrza zewnętrznego związanych z globalnym ociepleniem klimatu. Do analizy wykorzystano aktualne dane klimatyczne z okresu 1996–2022 oraz dane z lat 1971–2000. Odniesiono się także do aktualnie obowiązujących norm z zakresu temperatur obliczeniowych. Średnia temperatura powietrza zewnętrznego na przestrzeni ostatnich 30 lat znacząco wzrosła, zarówno w okresie letnim jak i zimowym [16]. W celu zobrazowania rocznego cyklu pracy przykładowego systemu wentylacyjnego wykonano wykresy t-tz obrazujące roczny cykl pracy urządzenia wentylacyjnego [17]. Na ich podstawie przeanalizowano pracę WOC ze statą i regulowaną sprawnością temperaturową. Na wykresach zobrazowano także zakres temperatury powietrza zewnętrznego, w którym można wykorzystać potencjał chłodniczy powietrza zewnętrznego czyli free-cooling.

Metodologia

Obliczenia przeprowadzono na podstawie danych meteorologicznych dla dwóch przedziałów czasowych: 1971–2000, 1996–2022. Pierwszy z nich zawiera dane udostępnione przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju [18]. Drugi zbiór to dane opracowane, przez autorów oraz studentów Koła Naukowego Environmental Team Sekcji Energy Loop, pochodzące z bazy meteomodel.pl [19]. Analizy przeprowadzono dla temperatury powietrza zewnętrznego rejestrowanej w interwale godzinowym w stacji meteorologicznej Wrocław 351160424, z wyłączeniem danych z maja 2019 roku, które nie są dostępne w opisywanej bazie. Dodatkowo odniesiono się do aktualnie obowiązującej normy PN-EN 12831-1:2017-08 *Charakterystyka energetyczna budynków – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego* – Część 1: *Obciążenie cieplne* [20] oraz norm PN-76/B-03420 *Wentylacja i klimatyzacja – Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego* [21] oraz PN-82/B-02403 *Ogrzewnictwo – Temperatury obliczeniowe zewnętrzne* [22].

Analizę działania WOC przeprowadzono dla sprawności temperaturowej wynoszącej odpowiednio: $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ i $\eta_t = 80\%$. Najniższa z przyjętych wartości wynika z Warunków Technicznych [8], kolejne związane są z dostępnością urządzeń na rynku oraz ich stosowaniem w praktyce inżynierskiej [23,24,25].

Zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzewania (E_H) oraz chłodzenia (E_C) powietrza wyznaczono na podstawie wzorów:

$$E_H = \sum_{i=-22}^{38} Q_{ti}^N \cdot \tau_{ti}, \quad \frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \quad (1)$$

$$E_C = \sum_{i=-22}^{38} Q_{ti}^{CH} \cdot \tau_{ti}, \quad \frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \quad (2)$$

gdzie τ_{ti} to czas występowania i-tej temperatury powietrza zewnętrznego; h , Q_{ti}^N to moc nagrzewnicy przy i-tej temperaturze powietrza zewnętrznego; kW, Q_{ti}^{CH} to moc chłodnicy przy i-tej temperaturze powietrza zewnętrznego; kW.

Moc nagrzewnicy oraz chłodnicy suchej obliczono na podstawie wzorów:

$$Q_{ti}^N = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t_{ti}^N, \quad \text{kW} \quad (3)$$

$$Q_{ti}^{CH} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t_{ti}^{CH}, \quad \text{kW} \quad (4)$$

gdzie V – strumień wentylujący (przyjęto 1 m³/s), ρ – gęstość powietrza dla

i-tej temperatury powietrza zewnętrznego przy założeniu ciśnienia atmosferycznego równego 1 atm; kg/m^3 , c_p – ciepło właściwe powietrza (przyjęto wartość w zależności od temperatury powietrza); $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, Δt_{i1}^N to przyrost temperatury powietrza w nagrzewnicy określony dla i-tej temperatury powietrza zewnętrznego; K , Δt_{i1}^{CH} to spadek temperatury powietrza w chłodnicy dla i-tej temperatury powietrza zewnętrznego; K .

Wszystkie obliczenia wykonano dla strumienia powietrza wentylującego wynoszącego $1\text{ m}^3/\text{s}$. Roczne zapotrzebowanie na energię jednostkową (E_j) wyrażono w $(\text{kWh}/\text{m}^3/\text{s})/\text{rok}$.

Do analizy pracy systemu wentylacyjnego wykorzystano wykres t-tz, na podstawie którego odczytywano wzrost temperatury powietrza w nagrzewnicy oraz spadek temperatury powietrza w chłodnicy. Moc chłodnicy została określona jak dla chłodzenia suchego. W obliczeniach nie uwzględniano ciepła związanego z wykopleniem pary wodnej zachodzącego, gdy temperatura ścianki chłodnicy jest niższa od temperatury punktu rosy. Rzeczywi-

sta moc chłodnicy będzie o około 20-30% większa od obliczonej. Poszczególne etapy obliczeń oraz przeprowadzanych analiz przedstawiono na schemacie zamieszczonym na rys.1.

Wykresy t-tz wykonano dla następujących wariantów: I – z płynną regulacją sprawności temperaturowej WOC (rys. 2), II – bez regulacji sprawności temperaturowej WOC (rys. 3). W pierwszym etapie – analiza – przyjęto skrajne wartości temperatury powietrza zewnętrznego zgodne z PN-EN 12831 i PN-76/B-03420 (od -18°C do 30°C). W drugim etapie – obliczenia energetyczne – przyjęto parametry powietrza zewnętrznego dla okresów czasowych 1971-2000 [18] i 1996-2022 [19].

Założenia przyjęte do wykonania wykresu t-tz:

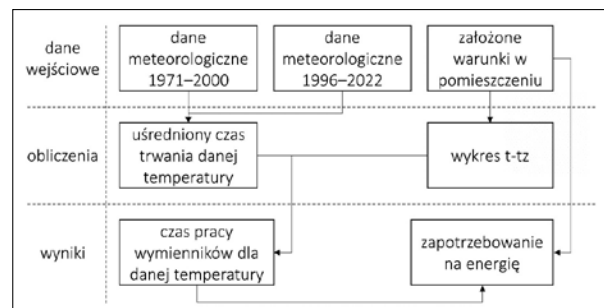
- ✓ Temperatura powietrza w pomieszczeniu w okresie zimowym i przejściowym jest na poziomie 20°C . Maksymalna temperatura powietrza w pomieszczeniu w okresie letnim jest na poziomie średniej wartości sumy chwilowej temperatury powietrza zewnętrznego oraz w pomieszczeniu w okresie zimowym i wynosi 25°C dla $t_z=30^\circ\text{C}$. Jest to zgodne z warunkami komfortu cieplnego [26].

- ✓ W okresie zimowym bilans ciepła dla pomieszczenia jest ujemny. Temperatura powietrza nawiewanego jest o $2,5^\circ\text{C}$ wyższa od temperatury powietrza w pomieszczeniu.
- ✓ Maksymalna wartość obciążenia cieplnego jawnego dla pomieszczenia występuje, gdy temperatura powietrza zewnętrznego wynosi 21°C (co jest charakterystyczne dla pomieszczeń o niewielkiej powierzchni przegród przeszklonych i znaczącej liczbie osób w pomieszczeniu).
- ✓ Maksymalny przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu, w czasie maksymalnego obciążenia cieplnego jawnego, wynosi 7 K .
- ✓ Przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest na poziomie 30°C , jest zależny od strumienia powietrza wentylującego oraz obciążenia cieplnego jawnego, wynosi 5 K .

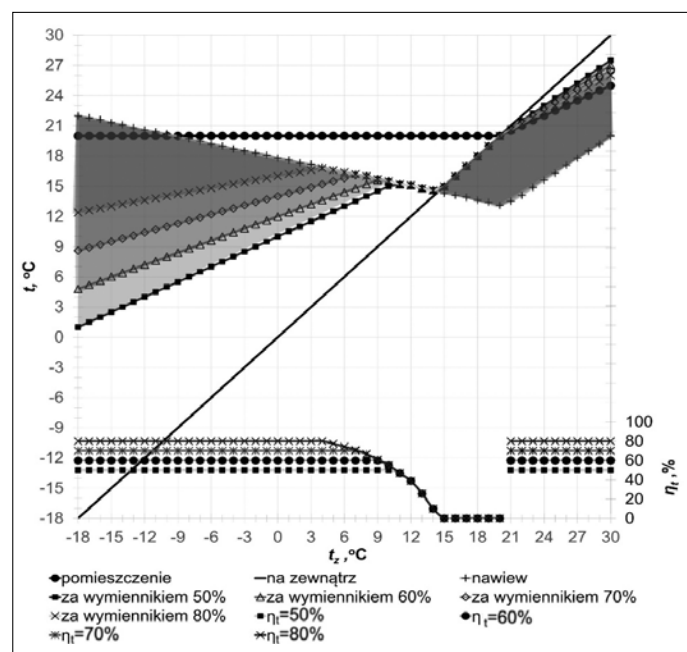
Roczny cykl pracy urządzeń wentylacyjnych z odzyskiem ciepła

Na rys. 2, na wykresie t-tz, zobrazowano roczny cykl pracy urządzeń wentylacyjnych z nagrzewnicą, chłodnicą i WOC o sprawności temperaturowej odpowiednio $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ i $\eta_t = 80\%$, w których sprawność temperaturowa wymiennika jest regulowana płynnie w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego.

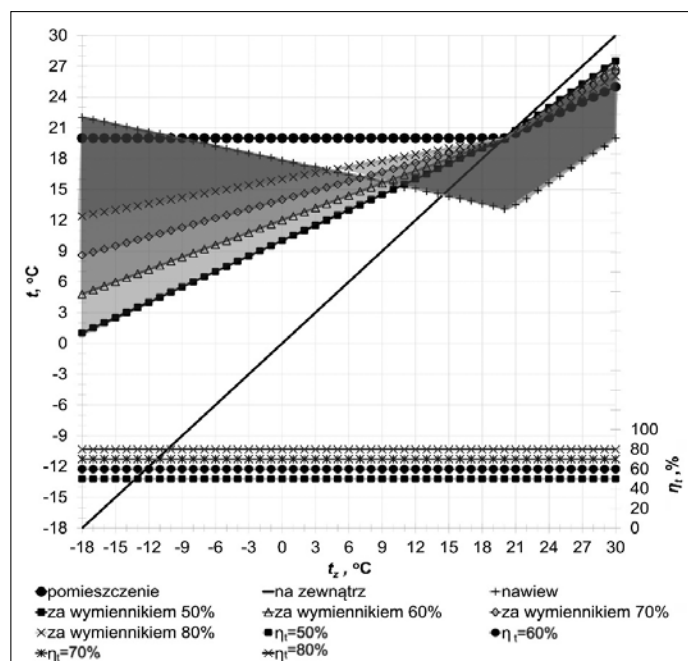
W układach z płynną regulacją działania WOC, gdy temperatura powietrza za WOC zrówna się z założoną temperaturą powietrza nawiewanego, WOC zaczyna działać z ograniczoną sprawnością, aż do całkowitego jej ograniczenia. W zamieszczonym przykładzie i dla założonych na potrzeby artykułu obciążeń cieplnych pomieszczenia, dla WOC o sprawności nominalnej $\eta_t = 50\%$ modulacja sprawności rozpoczyna się, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego wynosi 10°C , dla $\eta_t = 60\%$ – od 9°C , dla $\eta_t = 70\%$ – od 7°C , dla $\eta_t = 80\%$ – od 4°C . WOC wyłączają się, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest taka sama jak wymagana temperatura powietrza nawiewanego. Pozostają one wyłączone do momentu zrównania się temperatury powietrza zewnętrznego z temperaturą powietrza w pomieszczeniu. Moment przełączenia działania WOC na płynną regulację sprawności temperaturowej pokrywa się z czasem wyłączenia nagrzewnicy. Moment włączenia chłodnicy pokrywa się z chwilą uzyskania przez WOC sprawności zerowej, co oznacza napływ na



Rys. 1
Schemat przeprowadzonych obliczeń i analiz
Fig. 1 Scheme of the calculation and analysis performed



Rys. 2
Wykres t-tz obrazujący całoroczny cykl pracy urządzeń wentylacyjnych z wymiennikiem do odzysku ciepła z płynną regulacją sprawności temperaturowej
Fig. 2 The t-tz chart showing the year-round operation cycle of the air handling unit with a heat recovery exchanger with adjustable temperature efficiency



Rys. 3
Wykres $t-t_z$ obrazujący całoroczny cykl pracy urządzenia wentylacyjnego z wymiennikiem do odzysku ciepła bez płynnej regulacji sprawności temperaturowej
Fig 3. The $t-t_z$ diagram showing the year-round operation cycle of the air handling unit with a heat recovery exchanger with non-adjustable temperature efficiency

ogólnoświatowych problemów energetycznych zwiększone wymagania związane z energią niezbędną do utrzymania systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych są ważnym aspektem, który musi być rozważony i racjonalnie rozwiązany.

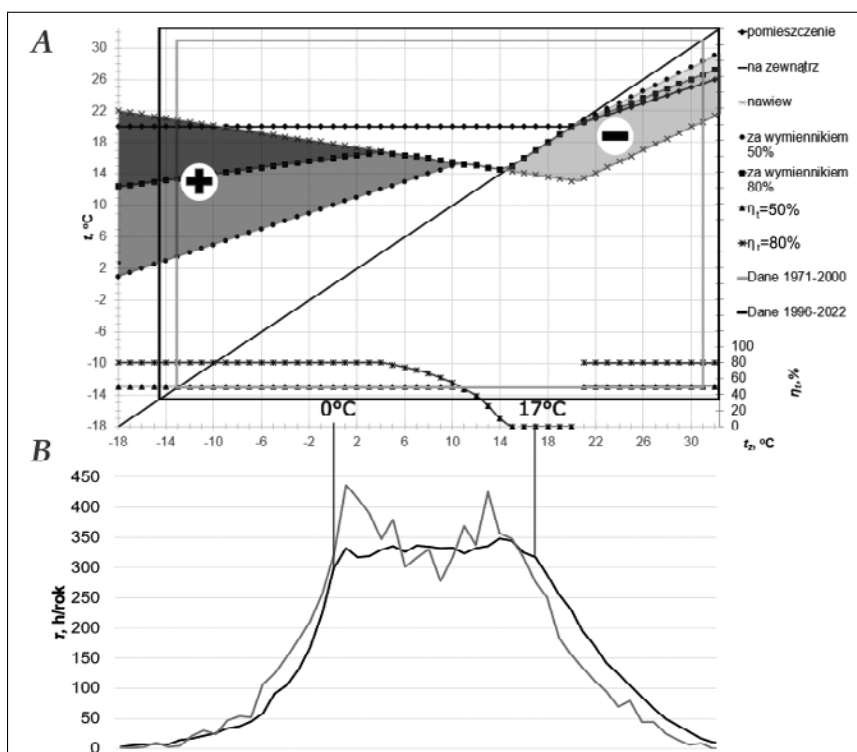
Wpływ zmian klimatu na pracę omawianych układów wentylacyjnych

Na rys. 4 i rys. 5 przedstawiono wykresy $t-t_z$ obrazujące obszar działania nagrzewnicy i chłodnicy dla skrajnych wartości sprawności WOC odpowiednio $\eta_t = 50\%$ i $\eta_t = 80\%$. Rys. 4 obrazuje pracę układu z WOC o płynnej regulacji sprawności temperaturowej. Na rys. 5 zobrazowano pracę układu z WOC pracującym w rocznym cyklu ze sprawnością nominalną. Celem porównania wpływu zmieniającego się klimatu na pracę WOC w obu porównywanych przypadkach wprowadzono

chłodnicę nieuzdatnionego termicznie powietrza zewnętrznego. Włączenie chłodnicy, dla omawianego przypadku, następuje niezależnie od przyjętej sprawności WOC i następuje, gdy temperatura powietrza zewnętrznego wynosi ok. $t_z = 14^\circ\text{C}$.

Na rys. 3. zobrazowano pracę układu z WOC pracującego ze sprawnością nominalną w całorocznym cyklu pracy. W takim przypadku załączenie chłodnicy następuje, gdy temperatura powietrza za WOC jest wyższa od temperatury powietrza nawiewanego. Następuje to przy temperaturze powietrza zewnętrznego znacznie niższej, w porównaniu do urządzenia z WOC działającego z modulowaną sprawnością. Wpływa to na zwiększenie zapotrzebowania na energię niezbędną do ochładzania powietrza. Dla poszczególnych sprawności WOC chłodnica rozpoczyna działanie, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego wynosi 10°C dla $\eta_t = 50\%$, 9°C dla $\eta_t = 60\%$, 7°C dla $\eta_t = 70\%$, 4°C dla $\eta_t = 80\%$. Oznacza to, że dla układu z WOC o sprawności $\eta_t = 80\%$ chłodnica załącza się przy temperaturze powietrza zewnętrznego o 10 K niższej w porównaniu do układu ze zmienną sprawnością. Im większa nieregulowana sprawność temperaturowa WOC, tym niższa temperatura powietrza zewnętrznego, dla której wymagane jest załączenie chłodnicy.

Jak wynika z doświadczenia autorów artykułu, w wielu przypadkach, systemy eksploatowane w istniejących obiektach w Polsce realizują, w rocznym cyklu, działanie WOC ze stałą sprawnością temperaturową. Niestety w zapisach zawartych w [8] nie ma obowiązku regulacji sprawno-



Rys. 4 A) Wykres $t-t_z$ obrazujący roczny cykl pracy urządzenia wentylacyjnego z odzyskiem ciepła $\eta_t = 50\%$ i $\eta_t = 80\%$, która jest sterowana płynnie. B) Czas trwania temperatury powietrza zewnętrznego. Obrisy szary – dla lat 1971–2000. Obrisy czarne – dla lat 1996–2022

Fig. 4 A) $T-t_z$ diagram showing the annual operation cycle of a ventilation unit with a heat recovery exchanger ($\eta_t = 50\%$ and $\eta_t = 80\%$ operating with adjustable temperature efficiency. B) Duration of outdoor air temperature. Gray outline – for the years 1971–2000. Black outline – for the years 1996–2022

ści WOC. Zapis dotyczy tylko zwiększania udziału powietrza zewnętrznego w wentylującym, co nie dotyczy systemów z WOC.

Jak wynika z rys. 2. i rys. 3 utrzymywanie nominalnej sprawności temperaturowej WOC przez cały rok wpływa na znaczące wydłużenie działania chłodnicy. W świetle zachodzących zmian klimatu [27] oraz

dwa zakresy temperatury powietrza zewnętrznego. Pierwszy zakres (zobrazowany kolorem szarym na wykresach rys. 4 i rys. 5) dotyczy temperatury powietrza zewnętrznego określonej dla lat 1971–2000 [18]. Drugi zakres (zobrazowany kolorem czarnym) dotyczy średniej wartości temperatury powietrza zewnętrznego określonej

przez autorów dla lat 1996–2022 dla miasta Wrocław (stacja 351160424) [19]. Wykresy rys. 4 i rys. 5 uzupełniono o czas trwania temperatury powietrza zewnętrznego, który jest niezbędny do wykonania obliczeń dotyczących energii niezbędnej do ogrzewania i ochładzania powietrza.

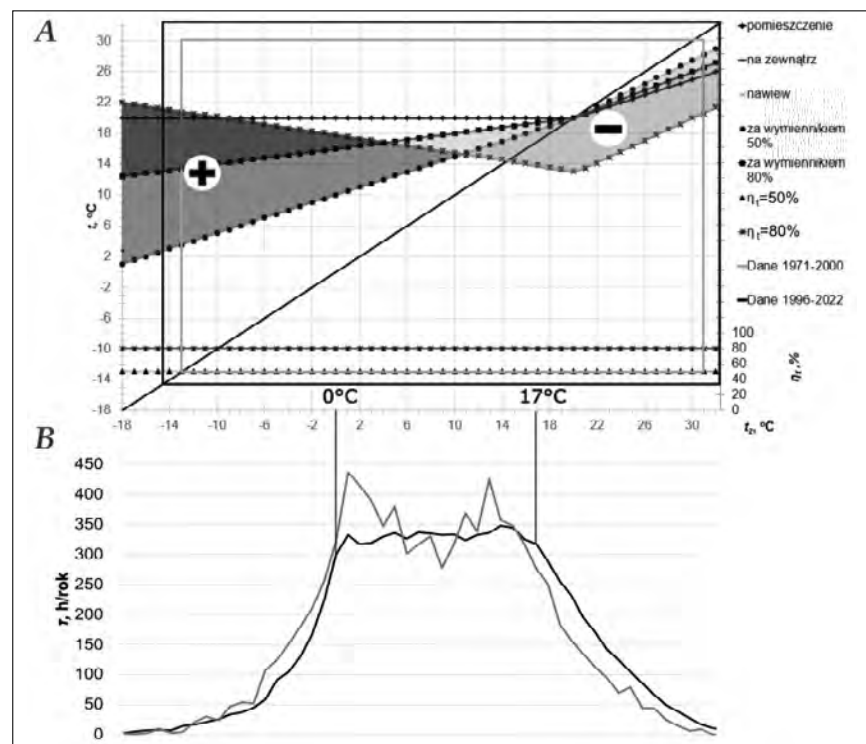
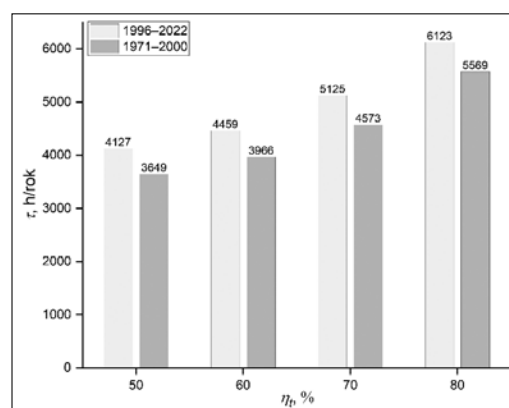
Zamieszczone na rys. 4 i rys. 5 wykresy oprócz rocznego cyklu pracy urządzenia obrazują także zmiany klimatyczne, jakie zaszły w ostatnim 30-leciu. Widoczne jest wyraźne rozszerzenie pola zakresu temperatury powietrza zewnętrznego dla lat 1996–2022 (kolor czarny) w porównaniu do pola zaznaczonego dla parametrów z lat 1971–2000 (kolor szary). Na wykresach zaznaczono także obszar działania nagrzewnicy oraz obszar działania chłodnicy. Na wykresie przedstawiającym czas trwania temperatury powietrza zewnętrznego zaznaczono przedział od 0°C do 17°C, w którym czas trwania poszczególniej temperatury wynosi ponad 300 h w roku. Warto zaznaczyć, że spora część tego zakresu pokrywa się z obszarem, w którym należy zastosować zmianę sprawności WOC. Dla WOC o sprawności temperaturowej $\eta_t = 80\%$ wykorzystanie potencjału chłodniczego powietrza zewnętrznego, który umożliwia brak konieczności uruchamiania chłodnicy, następuje w zakresie temperatury powietrza zewnętrznego od 4°C

do 20°C. Dla wymiennika ciepła o sprawności temperaturowej $\eta_t = 50\%$ w zakresie od 11°C do 20°C. W obu przypadkach uruchomienie chłodnicy następuje przy temperaturze powietrza zewnętrznego na poziomie 20°C. Dla układów pracujących bez płynnej regulacji sprawnością odzysku ciepła, których pracę zobrazowano na rys. 5A, chłodnica musi być uruchomiona odpowiednio dla $\eta_t = 80\%$ przy $t_z = 4^\circ\text{C}$, dla $\eta_t = 50\%$ przy $t_z = 11^\circ\text{C}$.

Zmiany temperatury powietrza zewnętrznego, zarówno w okresie letnim, jak i zimowym oraz wydłużenie czasu trwania temperatury powietrza zewnętrznego powyżej 18°C wpływają bezpośrednio na zwiększone zapotrzebowanie na energię niezbędną do ochładzania powietrza.

Rys. 6. Roczny czas działania chłodnicy w układzie z utrzymywaną nominalną sprawnością temperaturową wymiennika do odzysku ciepła wynoszącą $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ i $\eta_t = 80\%$ dla parametrów powietrza zewnętrznego wyznaczonych dla lat 1971–2000 i 1996–2022

Fig. 6. Cooler operation time in a ventilation system with nominal heat recovery exchanger temperature efficiency $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ and $\eta_t = 80\%$ for outdoor air conditions determined for climate data for the years 1971–2000 and 1996–2022



Rys. 5 A) Wykres t-tz obrazujący roczny cykl pracy urządzenia wentylacyjnego z odzyskiem ciepła $\eta_t = 50\%$ i $\eta_t = 80\%$, która jest utrzymywana na stałym poziomie. B) Czas trwania temperatury powietrza zewnętrznego. Obrys szary – dla lat 1971–2000. Obrys czarny – dla lat 1996–2022

Fig. 5 A) T-tz diagram showing the annual operation cycle of a ventilation unit with a heat recovery exchanger $\eta_t = 50\%$ and $\eta_t = 80\%$ operating with non-adjustable temperature efficiency. B) Duration of outdoor air temperature. Gray outline – for the years 1971–2000. Black outline – for the years 1996–2022

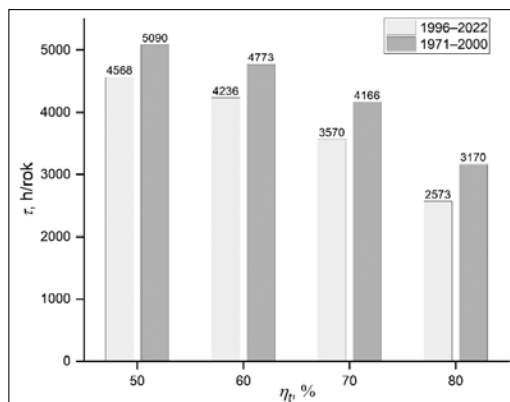
Energia niezbędna do ogrzewania i ochładzania powietrza

Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono roczny czas działania chłodnicy i nagrzewnicy dla warunków działania WOC z nieregulowaną sprawnością. Wyniki przedstawiono dla układów wentylacyjnych pracujących z WOC o nominalnej sprawności temperaturowej wynoszącej odpowiednio $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ i $\eta_t = 80\%$. Uzyskane wyniki analizy wskazują na wydłużenie czasu działania chłodnicy dla lat 1996–2022 [19] względem okresu 1971–2000 [18]. Najdłuższy czas działania chłodnicy, aż 6123 h, zaobserwowano dla urządzenia z najwyższą sprawnością temperaturową ($\eta_t = 80\%$). W porównaniu

do obliczeń prowadzonych na podstawie danych z lat 1971–2000 [18] działanie to wydłużyło się o 554 h, czyli o 9%. W przypadku sprawności temperaturowej wymiennika przyjętej na poziomie $\eta_t = 50\%$ czas działania chłodnicy wydłużył się o 478 h, co stanowi 13% wzrostu w kontekście danych z ubiegłego wieku.

W porównaniu do danych klimatycznych z poprzedniego stulecia [18] realny czas działania nagrzewnicy uległ skróceniu. Jest to spowodowane wzrostem średnich wartości temperatury powietrza zewnętrznego w miesiącach zimowych oraz skrócenie czasu występowania niskich temperatur. W przypadku WOC o sprawności temperaturowej $\eta_t = 80\%$ nagrzewnica działa 2573 h, czyli o 597 h krócej (19%). Czas działania nagrzewnicy w konfiguracji z WOC o sprawności $\eta_t = 50\%$ wynosi 4568 h i jest o 522 h (10%) krótszy w odniesieniu do lat 1971–2000.

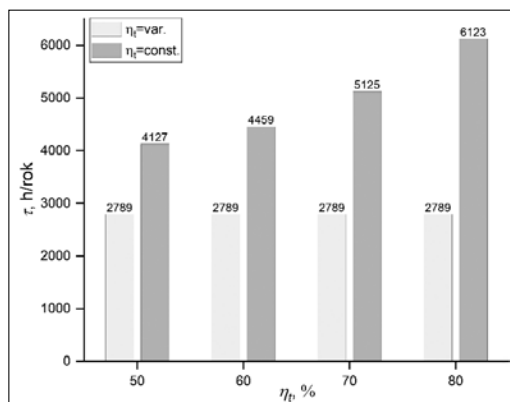
Na rys. 8 przedstawiono porównanie rocznego czasu działania chłodnicy dla układów ze zmienną i stałą sprawnością temperaturową WOC dla danych klimatycznych z ostatnich 27 lat (1996–2022) [19]. W układach z płynną regulacją sprawności WOC czas działania chłodnicy nie zależy od wartości sprawności



Rys. 7.

Roczny czas działania nagrzewnicy w układzie z utrzymywaną quasi-stałą sprawnością temperaturową wymiennika do odzysku ciepła wynoszącą odpowiednio $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ i $\eta_t = 80\%$ dla parametrów powietrza zewnętrznego wyznaczonych dla lat 1971–2000 i 1996–2022

Fig. 7. Heater operation time in a ventilation system with a quasi-constant heat recovery exchanger temperature efficiency $\eta_t = 50\%$, $\eta_t = 60\%$, $\eta_t = 70\%$ and $\eta_t = 80\%$ for climate data for the years 1971–2000 and 1996–2022



Rys. 8

Porównanie rocznego czasu działania chłodnicy dla układów ze zmienną i stałą sprawnością temperaturową wymiennika do odzysku ciepła dla danych klimatycznych z okresu 1996–2022

Fig. 8 Comparison of the cooler's annual operating time for systems with adjustable and non-adjustable temperature efficiency of the heat recovery exchanger, for climate data from the period 1996–2022

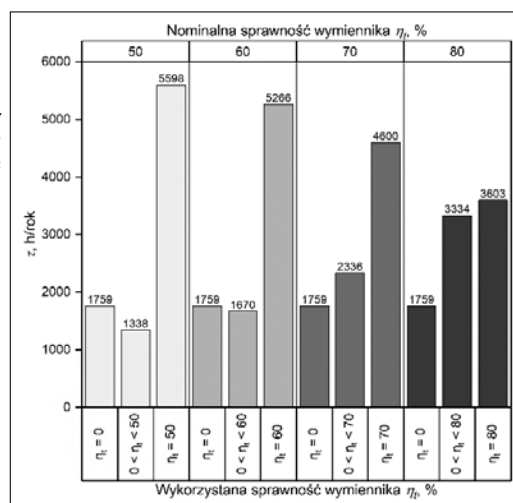
temperaturowej i wynosi 2789 h. Jest to czas odpowiednio o 32%, 37%, 46% oraz 54% krótszy od czasu określonego dla układów ze stałą sprawnością. Warto zwrócić uwagę na fakt, że im wyższa sprawność temperaturowa WOC, tym dłuższy czas działania chłodnicy.

Na rys. 9 i rys. 10 przedstawiono czas działania WOC w zależności od chwilowej sprawności temperaturowej dla danych klimatycznych z lat 1971–2000 [18] i 1996–2022 [19]. Na podstawie wykresu dla lat 1996–2022 zauważyć można, że wraz ze wzrostem nominalnej sprawności WOC skraca się czas jego działania ze sprawnością nominalną. Dla wymienników o sprawności $\eta_t = 50\%$ czas ten wynosi 5598 h, a dla $\eta_t = 80\%$ czas ten

Rys. 10

Praca wymiennika do odzysku ciepła i jego średni czas działania dla danych klimatycznych z lat 1996–2022

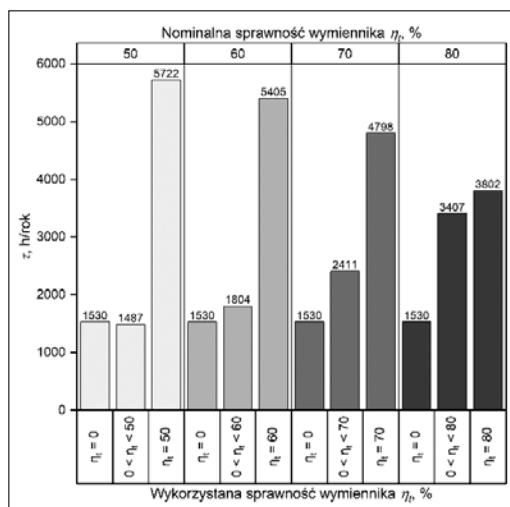
Fig. 10 Operation of the heat recovery exchanger and its average operating time for climate data in the years 1996–2022



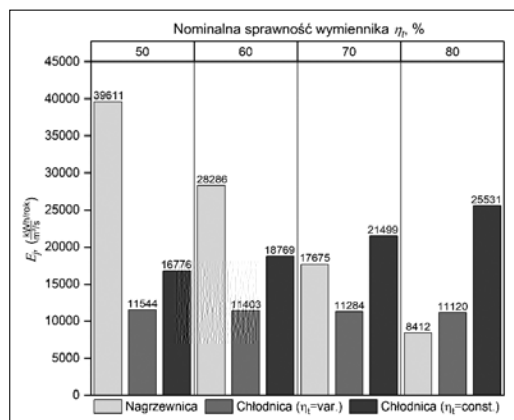
Rys. 9

Czas działania wymiennika do odzysku ciepła w zależności od chwilowej sprawności temperaturowej dla danych klimatycznych z lat 1971–2000

Fig. 9 Annual operation time of the heat recovery exchanger depending on the instantaneous temperature efficiency for climate data from the years 1971–2000



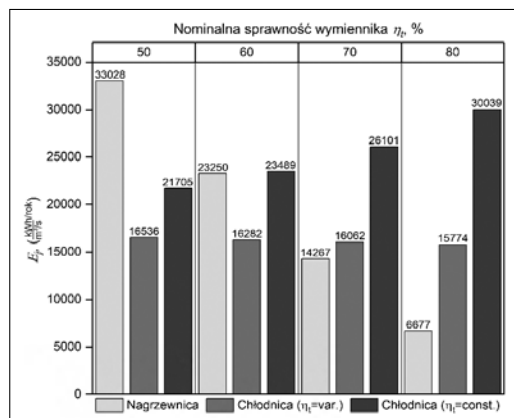
zbędna do ochłodzenia $1 \text{ m}^3/\text{s}$ powietrza jest na podobnym poziomie dla każdego przypadku i wynosi: 11544 kWh/rok dla $\eta_t = 50\%$, 11403 kWh/rok dla $\eta_t = 60\%$, 11284 kWh/rok dla $\eta_t = 70\%$ i 11120 kWh/rok dla $\eta_t = 80\%$. Dla nagrzewnicy zależność jest odwrotna. Przy najwyższej nominalnej sprawności WOC $\eta_t = 80\%$ roczna energia potrzebna do ogrzania $1 \text{ m}^3/\text{s}$ powietrza jest na poziomie 8635 kWh/rok, a w przypadku $\eta_t = 50\%$ jest to aż 40114 kWh/rok. Takie same zależności widać na rys. 12. Wzrost nominalnej sprawności urządzenia do odzysku ciepła z $\eta_t = 50\%$ do $\eta_t = 80\%$, przy braku sterowania sprawnością WOC skutkuje zwiększeniem energii niezbędnej do



Rys. 11

Roczna energia niezbędna do ogrzania oraz ochłodzenia powietrza określona dla układu wentylacyjnego z płynną regulacją ($\eta_t=var$) oraz bez regulacji ($\eta_t=const.$) sprawności temperaturowej wymiennika do odzysku ciepła obliczona dla danych klimatycznych z lat 1971–2000

Fig. 11 Annual energy demand needed to heat and cool the air specified for a ventilation system with adjustable ($\eta_t=var$) and non-adjustable ($\eta_t=const.$) temperature efficiency of the heat recovery exchanger, calculated for climate data for the years 1971–2000



Rys. 12

Roczna energia niezbędna do ogrzania oraz ochłodzenia powietrza określona dla układu wentylacyjnego z płynną regulacją ($\eta_t=var$) oraz bez regulacji ($\eta_t=const.$) sprawności temperaturowej wymiennika do odzysku ciepła obliczona dla danych klimatycznych z lat 1996–2022

Fig. 12 Annual energy demand needed to heat and cool the air specified for a ventilation system with adjustable ($\eta_t=var$) and non-adjustable ($\eta_t=const.$) temperature efficiency of the heat recovery exchanger, calculated for climate data for the years 1996–2022

ochładzania 1 m³/s powietrza w chłodnicy z wymaganych 21705 kWh/rok określonych dla $\eta_t = 50\%$ do 30039 kWh/rok. Nagrzewnica w systemie z WOC o najniższej sprawności $\eta_t = 50\%$ zużywa najwięcej energii, bo aż 33028 kWh/rok, do ogrzania 1 m³/s, w przypadku $\eta_t = 80\%$ wartość zużywanej energii jest znacząco mniejsza i wynosi 6677 kWh/rok. Na rys. 11 i rys. 12 widoczny jest trend wzrostu zapotrzebowania na energię niezbędną do chłodzenia oraz malejącego zapotrzebowania na energię niezbędną do ogrzewania powietrza w zależności od nominalnej sprawności WOC.

Wnioski

1. Wzrost średnich wartości maksymalnej temperatury powietrza zewnętrznego, w okresie letnim (czerwiec-sierpień) w ciągu ostatnich 27 lat o około 5°C względem danych z PN-EN 12831-1:2017-08, PN-76/B-03420 oraz z okresu 1971–2000 skutkuje znacznym wydłużeniem czasu pracy systemów chłodniczych i klimatyzacyjnych.
2. Obserwowany w ostatnich dekadach wzrost średnich temperatur powietrza zewnętrznego przekłada się na dłuższy czas działania chłodnicy oraz krótszy czas działania nagrzewnicy dla systemów z WOC o nieregulowanej sprawności temperaturowej $\eta_t = const.$

3. W warunkach klimatycznych Polski wymienniki do odzysku ciepła muszą mieć utrzymywaną regulowaną sprawność temperaturową.
4. Regulacja sprawności WOC powinna mieć miejsce w okresie przejściowym oraz wtedy, kiedy ograniczenie sprawności wpływa na możliwość ograniczenia działania chłodnicy. Zastosowanie systemu regulacji sprawności wymiennika do odzysku ciepła pozwala na kilkukrotną redukcję czasu działania chłodnicy w cyklu rocznym, a tym samym znaczące ograniczenie energii niezbędnej do ochładzania powietrza.
5. Zastosowanie WOC o regulowanej sprawności skutkuje skróceniem czasu działania ze sprawnością nominalną i wydłużeniem ich działania w zakresie sprawności pomiędzy wyłączeniem a sprawnością nominalną.
6. Dla ostatnich 27 lat czas trwania temperatury powietrza zewnętrznego od 0°C do 17°C jest dla każdej z wartości określony na ponad 300 h i stanowi 68% wszystkich godzin w roku kalendarzowym.
7. Dla aktualnych danych klimatycznych z lat 1996–2022 brak sterowania sprawnością odzysku ciepła powoduje wzrost zapotrzebowania na energię niezbędną do ochłodzenia powietrza uzdatnianego od 31% do 90% w za-

leżności od wartości nominalnej sprawności temperaturowej.

8. Porównanie dla lat 1971–2000 w odniesieniu do okresu 1996–2022, jednostkowego zapotrzebowania na energię wykazało: 17–21% zmniejszenie zapotrzebowania na cele ogrzewania, zwiększenie odpowiednio o 43% oraz o 18–30% zapotrzebowania na cele chłodzenia w systemie z regulacją sprawności WOC oraz bez regulacji sprawności WOC.

Podsumowanie

Przedstawiona w artykule analiza dotyczyła wpływu zmian klimatu na działanie WOC. Omówiono pracę układów wentylacyjnych z WOC z regulowaną oraz stałą sprawnością temperaturową. Jak wykazano na rys. 4 i rys. 5 w Polsce stopniowo zachodzą znaczące zmiany klimatu, które nie pozostają bez wpływu na prawidłową pracę układów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Dostępne dane klimatyczne dla lat 1971–2022 ujawniają wzrost średniej rocznej temperatury powietrza zewnętrznego, która w roku 1995 roku wnosila 6,9°C, w 2005 roku 7°C, natomiast w 2015 roku była na poziomie 8,9°C, a w 2022 wyniosła 8,7°C. Wzrost temperatury powietrza zewnętrznego zarówno dla okresu zimowego, jak i letniego przekłada się wprost na zwiększenie liczby godzin w roku, w których wymagane jest chłodzenie powietrza nawiewanego. W artykule wykazano, że ze względu na wzrost temperatury powietrza zewnętrznego obowiązkowo powinno być stosowanie WOC z płynnie sterowaną sprawnością dostosowaną do chwilowych warunków powietrza zewnętrznego oraz wymagań dotyczących temperatury powietrza nawiewanego.

LITERATURA:

- [1] Larsen MAD, Petrović S, Radoszynski AM, McKenna R, Balyk O. Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe. *Energy Build.* 2020;226:110397. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110397
- [2] Fan M, Fu Z, Wang J, et al. A review of different ventilation modes on thermal comfort, air quality and virus spread control. *Build Environ.* 2022;212:108831. doi:10.1016/j.buildenv.2022.108831
- [3] Ciuman P, Palmowska A, Palian P, et al. Investigation of thermal and humidity conditions and air quality in the university computer laboratory. *Instal.* 2022;12:26-32. doi:10.36119/15.2022.12.5
- [4] Khalil S, Ghali K, Ghaddar N, Itani M. Hybrid mixed ventilation system aided with personalised ventilation to attain comfort and save energy. *International Journal of Sustainable Energy.* 2020;39(10):964-981. doi:10.1080/14786451.2020.1781853

- [5] Cepiński W, Szałański P, Misiński J. Organizacja wymiany powietrza w pomieszczeniach bytowych w czasach zarazy. *Instal.* 2022;12:33-40. doi:10.36119/15.2022.12.6
- [6] Cepiński W, Szałański P, Misiński J. Redukcja rozprzestrzeniania koronawirusa SARS-CoV-2 i choroby COVID-19 poprzez instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne. *Instal.* 2020;6:28-36. doi:10.36119/15.2020.6.3
- [7] Lipska B. Centrale wentylacyjno-klimatyzacyjne. Energooszczędność. *Inżynier Budownictwa*, 2020.
- [8] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z Dnia 12 Kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.*
- [9] Przydrożny E, Szczęśniak S. Wpływ recyrkulacji powietrza wywiewanego na działanie central wentylacyjnych z odzyskiem ciepła z powietrza wywiewanego. *Instal.* 2021;4:24-29. doi:10.36119/15.2021.4.3
- [10] Jakubiak M, Porowski M. Sterowanie energo-optimalne systemami HVAC z recyrkulacją i odzyskiem ciepła w pomieszczeniach czystych. *Instal.* 2021;7-8:20-24. doi:10.36119/15.2021.7-8.3
- [11] Walaszczyk J. Możliwości optymalizacji sterowania pracą prostego układu wentylacyjnego obsługującego pojedyncze pomieszczenie. *Instal.* 2021;11:30-39. doi:10.36119/15.2021.11.4
- [12] Kostka M. Wymagania ekoprojektu dla systemów wentylacyjnych. *Rynek Instalacyjny.* 2016;5:47-52.
- [13] Amanowicz Ł, Ratajczak K. Stosowanie odzysku ciepła, OZE oraz zdecentralizowanych systemów wentylacyjnych w kontekście wymagań WT 2021. *Rynek Instalacyjny.* 2021;7-8:81-87.
- [14] Amanowicz Ł, Ratajczak K. Praktyczne aspekty projektowania energooszczędnych systemów wentylacyjnych. *Rynek Instalacyjny.* 2021;Nr 6:46-52.
- [15] Janusz S, Szudarek M, Rudniak L, Borcuch M. Analiza parametrów cieplno-przepływowych lamelowego wymiennika ciepła z wykorzystaniem pełnowymiarowego modelu CFD i jego weryfikacji eksperymentalnej. *Instal.* 2022;6:29-34. doi:10.36119/15.2022.6.4
- [16] Kundzewicz Z.W. Zmiany klimatu, ich przyczyny i skutki-observacje i projekcje. *Landform Analysis.* 2011;15:39-49.
- [17] Pełech A, Szczęśniak S. *Wentylacja i Klimatyzacja : Zadania z Rozwiązaniami i Komentarzami.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2012.
- [18] „<https://www.gov.pl/web/archiwum-inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow>.”, 2019. (dostęp 01 marzec 2023).
- [19] „Historyczne dane pomiarowe – Dane meteorologiczne”. <https://meteomodel.pl/dane/> historyczne-dane-pomiarowe/ (dostęp 23 styczeń 2023).
- [20] PN-EN 12831-1:2017-08 *Charakterystyka energetyczna budynków – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego–Część 1: Obciążenie cieplne*
- [21] PN-76/B-03420 *Wentylacja i klimatyzacja – Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego*
- [22] PN-82/B-02403 *Ogrzewnictwo – Temperatury obliczeniowe zewnętrzne*
- [23] Jedlikowski A. Wymienniki ciepła – budowa i sprawność. *Inżynier Budownictwa.* listopad 13, 2020.
- [24] Besler M, Skrzycki M. Badania sprawności odzysku ciepła w wentylacji. *Rynek Instalacyjny.* 2013;3:26-29.
- [25] Zajac A, Barańska P. Analiza temperatur powietrza zewnętrznego dla systemu klimatyzacji w hotelu. *Instal.* 2020;9:38-43. doi:10.36119/15.2020.9.6
- [26] A. Pełech, *Wentylacja i klimatyzacja. Podstawy.* Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2013.
- [27] Narowski P. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego i strefy klimatyczne Polski do obliczania mocy w systemach chłodzenia, wentylacji i klimatyzacji budynków. *Instal.* 2020;12:21-30. doi:10.36119/15.2020.12.3