

Maciej Besler, Maciej Skrzycki

## Analiza skuteczności odzyskiwania energii cieplnej z powietrza wywiewanego

W krajach o uwarunkowaniach klimatycznych podobnych do polskich, przy podobnym poziomie rozwoju technicznego, 30% ogólnej produkcji energii przypada na transport, tyle samo na przemysł i 40% na ogrzewanie i wentylację budynków mieszkalnych, użyteczności publicznej i przemysłowych. Udział energii w kształtowaniu mikroklimatu jest zatem znaczący, a wymagania co do jakości mikroklimatu w pomieszczeniach stale rosną (pożądana jest coraz częściej klimatyzacja, a co najmniej ochładzanie powietrza latem lub wentylacja nawiewno-wywiewna z dobrą filtracją).

Zdarza się, że w dobrze ocieplonych budynkach zapotrzebowanie na ciepło do wentylacji jest większe od zapotrzebowania na pokrycie strat ciepła. To często wymaga stosowania oryginalnych rozwiązań, innych niż dotychczas stosowane. Specyficzne muszą być rozwiązania w tzw. budynkach pasywnych lub 0-energetycznych. W tych przypadkach chodzi o całkowity zwrot (odzyskiwanie) energii włożonej podczas eksploatacji budynku. Jest to możliwe przez zastosowanie m.in. optymalnego sposobu odzyskiwania ciepła z powietrza usuwanego.

Podstawą poprawnego projektowania instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych jest stosowanie rozwiązań ekonomicznych w eksploatacji, pewnych w działaniu oraz prostych pod względem konstrukcyjnym. Znaczący wpływ na ekonomikę pracy całego układu mają przede wszystkim nakłady energetyczne, ponoszone na uzdatnianie oraz transport powietrza [4]. Do ograniczenia zużycia energii skłaniają zwłaszcza jej rosnące ceny, a także obowiązujące przepisy, które mają na względzie zwłaszcza ochronę środowiska i zachowanie zasobów naturalnych dla przyszłych pokoleń. W budynkach użyteczności publicznej i mieszkalnych oraz w wielu obiektach przemysłowych w naszym klimacie, koszty zapewnienia właściwego mikroklimatu pomieszczeń mogą przekraczać nawet 60% całkowitych kosztów utrzymania obiektu. Najwyższe są koszty ogrzewania oraz wentylacji/klimatyzacji pomieszczeń.

Wraz z rosnącą poprawą izolacyjności przegród budowlanych, z coraz skuteczniejszym wykorzystaniem zainstalowanych urządzeń energetycznych oraz odzyskiwaniem energii z usuwanego powietrza, udział kosztów energii w kosztach eksploatacji budynków będzie się zmniejszał.

W budownictwie niskoenergochłonnym, z racji stosowania bardzo dobrej izolacji, wartość ta może wynieść nawet poniżej 20% kosztów pracy normalnych instalacji wentylacyjnych lub klimatyzacyjnych, jednakże koszty inwestycyjne na budowę takiego obiektu są zazwyczaj o ponad 30% większe. W budynkach pasywnych, ze względu na bardzo małe straty ciepła przez przegrody, instalacje wentylacyjne służą jednocześnie ogrzewaniu. Trzeba więc zawsze najpierw przeanalizować opłacalność stosowania dodatkowej izolacji oraz systemu odzysku ciepła w okresie wieloletniej eksploatacji. Każdy właściciel budynku zainteresowany jest zapewnieniem korzystnego mikroklimatu w pomieszczeniach przy dużej niezawodności oraz możliwie najmniejszych nakładach eksploatacyjnych [7].

Instalacje wentylacyjne w budynkach mogą być zasilane w energię ciepłą z różnych źródeł (gaz, olej ciepłowniczy, prąd elektryczny, ciepło z sieci ciepłowniczej i inne). Orientacyjny podział kosztów w przeciętnym 20-letnim czasie użytkowania instalacji wentylacyjnych czy klimatyzacyjnych (który można znacznie wydłużyć, stosując urządzenia dobrej jakości i właściwą obsługę serwisową) przedstawia się następująco: energia – 75%, automatyka – 10%, system rozprowadzania powietrza – 10%, serwis – 5% [2]. Energia doprowadzana do powietrza w procesie jego uzdatniania, powiększona o energię zasymilowaną w pomieszczeniu, jest w tzw. systemach otwartych, gdy powietrze usuwane wywiewane jest wprost do atmosfery, najczęściej bezpowrotnie tracona. Dzisiaj coraz powszechniejsze staje się stosowanie urządzeń do odzyskiwania tej energii, co znajduje głębokie uzasadnienie. Urządzenia te mogą być zarówno regeneracyjne, gdy wykorzystują masy lub roztwory akumulujące ciepło jawne lub całkowite (wymenniki rotacyjne i nieobrotowe), jak i rekuperacyjne, gdy wymiana ciepła następuje przez powierzchnie (wymenniki płytowe, rurki ciepła).

Dotychczas, zgodnie z §151.1 rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. [6], odzyskiwanie ciepła wymagane było przy wartościach strumienia powietrza wentylującego większego od 10 tys. m<sup>3</sup>/h. Zmiana tego rozporządzenia, z 6 listopada 2008 r., nakazuje odzyskiwanie ciepła w instalacjach wentylacji mechanicznej ogólnej nawiewno-wywiewnej lub klimatyzacji komfortu już od wydajności 2 tys. m<sup>3</sup>/h. Sprawność tych urządzeń powinna wynosić co najmniej 50%. Oczywiście korzyścią z odzyskiwania energii w systemach wentylacyjnych jest mniejsza moc źródła ciepła i chłodu, a ponadto zmniejszenie kosztów urządzeń, przewodów, mniejsze zużycie energii do uzdatniania powietrza, mniejsze koszty eksploatacyjne

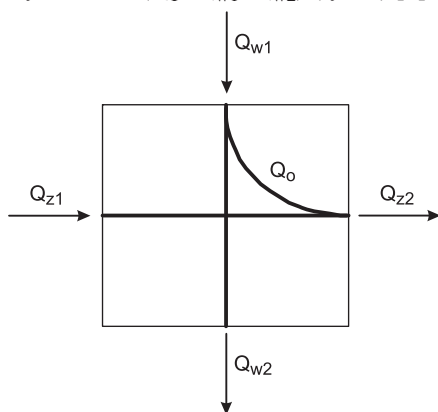
oraz zmniejszenie emisji do atmosfery substancji szkodliwych, powstających w procesach przetwarzania paliw pierwotnych. W instalacjach pełnej klimatyzacji, przy zastosowaniu regeneracyjnych wymienników ciepła, występują także korzyści wynikające z wymiany masy (nawilżanie i osuszanie powietrza) między strumieniami powietrza wywiewanego i nawiewanego. Sprawność takich urządzeń może przekraczać 80%.

Stosowanie urządzeń do odzyskiwania energii z powietrza wywiewanego w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych wiąże się z pewnymi dodatkowymi kosztami. Większe są gabaryty central wentylacyjnych (wymagają większych powierzchni maszynowni), większa jest moc silników napędzających wentylatory w centralach (wynika to także m.in. ze wzrostu oporów na wymiennikach odzyskujących ciepło oraz dodatkowych filtrach), większe koszty przeglądów oraz prac serwisowych, a także większy jest koszt sterowania pracą układów. Mogą też wystąpić dodatkowe koszty związane z koniecznością zbliżenia do siebie instalacji nawiewnej i wywiewnej [5]. Decyzja o wyborze sposobu odzyskiwania ciepła powinna być każdorazowo poprzedzona rzeczową analizą, określającą celowość zastosowania danego układu wraz z kalkulacją techniczno-ekonomiczną wykazującą, w którym systemie w danych warunkach eksploatacyjnych i klimatycznych poniesione koszty zwrócą się w najkrótszym czasie.

Celem pracy było uzasadnienie zastosowania układów do odzysku ciepła w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych w aspekcie oszczędności energii i ochrony środowiska. Zestawiono i porównano roczne koszty eksploatacyjne oraz koszty inwestycyjne takich układów. Analizę przeprowadzono przy trzech wartościach strumienia powietrza wentylującego/klimatyzującego oraz w różnych trybach pracy w cyklu całorocznym. Rozważania przeprowadzono na podstawie parametrów powietrza zewnętrznego we Wrocławiu z ostatnich dziesięciu lat oraz przy różnych rodzajach energii cieplnej.

### Skuteczność i sprawność odzyskiwania energii cieplnej

Wielkościami charakteryzującymi każde urządzenie odzyskujące ciepło są skuteczność odzysku ciepła oraz sprawność jego odzysku. Skuteczność odzysku ciepła wyrażana jest jako stosunek energii odzyskanej w danym urządzeniu ( $Q_0 = Q_{z2} - Q_{z1}$ ) do energii, jaka byłaby utracona w układzie bez jej odzyskiwania ( $Q_T = Q_{w1} - Q_{w2}$ ) (rys. 1) [3].



Rys. 1. Schemat ideowy przepływu strumieni energii w wymienniku ciepła [3]  
Fig. 1. Schematic diagram of energy flux in the heat exchanger [3]

Sprawność odzyskiwania ciepła, używana częściej ze względów praktycznych, określana jest jako stosunek różnicy parametrów powietrza zewnętrznego przed i za wymiennikiem do różnicy parametrów powietrza wywiewanego i zewnętrznego doprowadzanego do wymiennika ciepła. Należy jednak odróżnić odzyskiwanie ciepła jawnego (przy którym rozważany jest tylko przyrost temperatury powietrza) od odzyskiwania ciepła całkowitego (który uwzględnia zarówno odzysk ciepła jawnego jak i wilgoci). W związku z tym rozróżnia się sprawność temperaturową oraz tzw. sprawność entalpijną.

W przypadku odzyskiwania jedynie ciepła jawnego, sprawność temperaturowa wyrażona jest w postaci zależności:

$$\eta_t = \frac{t_{z2oz} - t_{zoz}}{t_{u1oz} - t_{zoz}} = \frac{t_{z2oc} - t_{zoc}}{t_{u1oc} - t_{zoc}} \quad (1)$$

w której:

$t_{zoz}, t_{zoc}$  – temperatura powietrza nawiewanego przed odzyskiem ciepła, kJ, kg

$t_{z2oz}, t_{z2oc}$  – temperatura powietrza nawiewanego za odzyskiem ciepła, kJ, kg

$t_{u1oz}, t_{u1oc}$  – temperatura powietrza wywiewanego przed odzyskiem ciepła, kJ, kg

Całkowita sprawność odzysku ciepła (entalpijna) określona jest zależnością:

$$\eta_c = \frac{h_{z2oz} - h_{zoz}}{h_{u1oz} - h_{zoz}} = \frac{h_{z2oc} - h_{zoc}}{h_{u1oc} - h_{zoc}} \quad (2)$$

w której:

$h_{zoz}, h_{zoc}$  – entalpia powietrza nawiewanego przed odzyskiem ciepła, kJ, kg

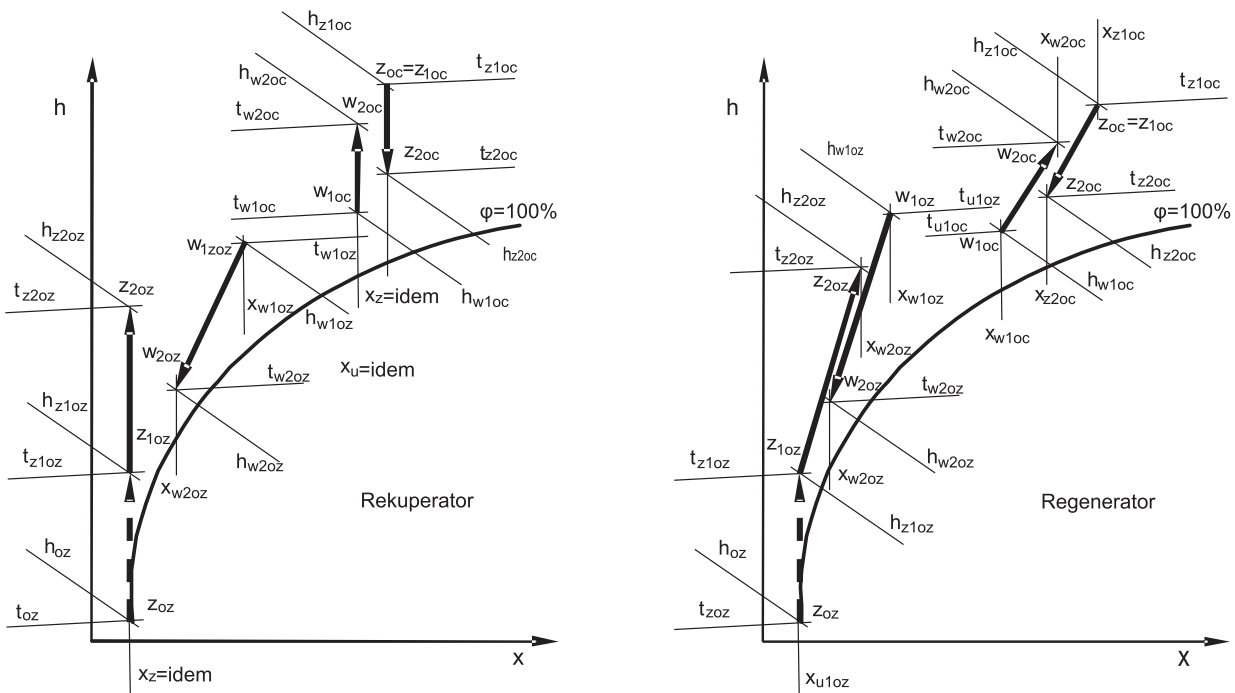
$h_{z2oz}, h_{z2oc}$  – entalpia powietrza nawiewanego za odzyskiem ciepła, kJ, kg

$h_{u1oz}, h_{u1oc}$  – entalpia powietrza wywiewanego przed odzyskiem ciepła, kJ, kg

Na rysunku 2 przedstawiono przemiany powietrza zachodzące w rekuperacyjnym i regeneracyjnym wymienniku ciepła w okresach ciepłym i zimnym.

W sezonie letnim powietrze nawiewane o temperaturze początkowej  $t_{z1oc}$  ochładza się w wymiennikach rekuperacyjnych do temperatury  $t_{z2oc}$  kosztem energii zawartej w powietrzu wywiewanym. Temperatura powietrza wywiewanego zmienia się od  $t_{w1oc}$  do  $t_{w2oc}$ . Zawartość wilgoci w strumieniach powietrza wywiewanego i zewnętrznego jest stała. W sezonie zimowym powietrze wywiewane oddaje ciepło jawne oraz ciepło utajone kondensacji. Temperatura i zawartość wilgoci ulegają zmniejszeniu, odpowiednio od  $t_{w1oz}$  i  $x_{w1oz}$  do stanu  $w_{2oz}$ . Powietrze zewnętrzne ogrzewa się od stanu początkowego  $z_{1oz}$  do stanu końcowego przemiany  $z_{2oz}$ , przy stałej zawartości wilgoci. Jeżeli temperatura końcowa powietrza wywiewanego spadnie poniżej zera, wtedy może dojść do niepożądanego zjawiska zamrażania kondensatu lub osadzania się szronu na powierzchni wymiany ciepła wymiennika.

W wymienniku regeneracyjnym zarówno w sezonie letnim, jak i zimowym dochodzi do jednoczesnej wymiany ciepła i masy. Zmianie ulegają temperatura powietrza i zawartość wilgoci. W sezonie letnim powietrze zewnętrzne, o stanie początkowym  $z_{1oc}$ , podczas kontaktu z chłodnym i suchym wypełnieniem wymiennika zmienia swój stan do



Rys. 2. Przemiany powietrza na wykresie h-x w warunkach obliczeniowych okresu zimnego i ciepłego  
 Fig. 2. Changes in the state of air represented by the h-x diagram for the computational conditions of both cold and warm seasons

punktu  $z_{2oc}$  o niższej temperaturze i zawartości wilgoci (odpowiednio  $t_{z2oc}$ ,  $x_{z2oc}$ ). Powietrze wywiewane z pomieszczenia wentylowanego/klimatyzowanego w stanie  $w_{1oc}$ , o mniejszej zawartości wilgoci i niższej temperaturze, odbiera ciepło jawne i wilgoć zaabsorbowaną z powietrza zewnętrznego przez wypełnienie wymiennika, w wyniku czego podgrzewa się i nawilża do stanu  $w_{2oc}$ . W sezonie zimowym temperatura oraz zawartość wilgoci powietrza o stanie  $w_{1oz}$  usuwanego z pomieszczenia wentylowanego/klimatyzowanego są większe od wartości parametrów powietrza zewnętrznego. W wymienniku do odzysku ciepła wypełnienie nagrzewa się i absorbuje wilgoć, dzięki temu powietrze wywiewane ochładza się i osusza do stanu  $w_{2oz}$ . Powietrze zewnętrzne o temperaturze  $t_{z1oz}$  i zawartości wilgoci  $x_{z1oz}$ , kontaktując się z ogrzany i wilgotnym wypełnieniem wymiennika, ogrzewa się i nawilża do stanu  $z_{2oz}$ .

Do oceny ekonomiki pracy układu wentylacji/klimatyzacji, z zastosowaniem urządzeń do odzyskiwania ciepła w typowych obiektach bytowych, najbardziej interesująca jest temperatura powietrza nawiewanego za urządzeniem do odzyskiwania ciepła, ze względu na jej wpływ na wielkość obliczeniową nagrzewnicy (chłodnicy) powietrza. Należy zauważyć, że każdy typ urządzenia do odzyskiwania ciepła ma określoną sprawność.

W pewnych warunkach, przy mniejszych temperaturach powietrza zewnętrznego, poniżej temperatury punktu rosy powietrza wywiewanego, zachodzi wykraplanie wilgoci na powierzchni wymiennika po stronie powietrza wywiewanego, co ostatecznie, po osiągnięciu w wymienniku temperatury mniejszej od zera, może doprowadzić do powstawania szronu. Zjawisko to występuje silnie zwłaszcza wówczas, gdy powietrze wywiewane zawiera dużo wilgoci [5]. Oblodzenie wymiennika prowadzi do zmniejszenia wskaźnika odzyskiwania energii. Przewężone przez lód kanały w wymienniku zmniejszają strumień przepływającego powietrza i tym samym strumień wymienianego ciepła w urządzeniu. W konsekwencji temperatura powietrza nawiewanego, bezpośrednio za wymiennikiem odzyskującym ciepło, jest mniejsza. Proces ten powoduje także większe

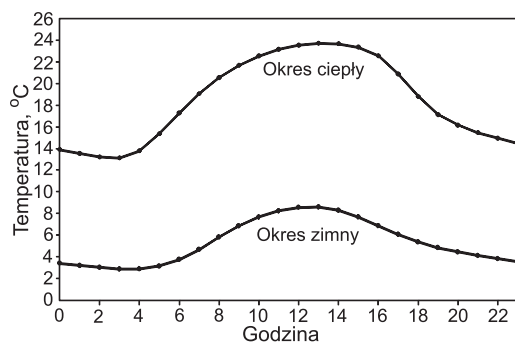
opory przepływu powietrza. Duże oblodzenie może spowodować całkowite zablokowanie przepływu powietrza przez wymiennik. Odszranianie wymienników ciepła może nastąpić poprzez okresowe wyłączenie wentylatora (co jest niekorzystne), drogą zainstalowanego obejścia wymiennika (by-pass) po stronie powietrza nawiewanego lub w wyniku zainstalowania przed wymiennikiem dodatkowej nagrzewnicy wstępnej, podgrzewającej powietrze do temperatury zabezpieczającej wymiennik przed szronieniem. Zapobieganie szronieniu wymienników regeneracyjnych uzyskuje się natomiast na drodze regulacji liczby obrotów wirnika.

### Dane klimatyczne powietrza zewnętrznego

Dane klimatyczne dotyczące Wrocławia, wykorzystane do przeprowadzenia analizy, pochodzą z dziesięciolecia 1998–2007 [10]. Temperatury powietrza zewnętrznego były mierzone w Obserwatorium Zakładu Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego w rejonie Wrocław-Biskupin. Podstawą analizy było przyjęcie podziału ciągu czasowego średnich dobowych temperatur powietrza, wygładzonego pięciodobową średnią medianową, na sześć termicznych pór roku wg klasyfikacji Romera [1]:

- zima:  $<0^{\circ}\text{C}$ ,
- przedwiośnie:  $0\div 5^{\circ}\text{C}$ ,
- wiosna:  $5\div 15^{\circ}\text{C}$ ,
- lato:  $15^{\circ}\text{C}$ ,
- jesień:  $5\div 15^{\circ}\text{C}$ ,
- przedzimie:  $0\div 5^{\circ}\text{C}$ .

Podział ten zmodyfikowano, wyróżniając jedynie dwa charakterystyczne okresy obliczeniowe w roku, tj. okres zimny, obejmujący zimą, przedwiośnie, wiosnę, jesień i przedzimie oraz okres ciepły, obejmujący lato. Przy tak przyjętych okresach wyznaczono dziesięcioletnie średnie dobowe przebiegi temperatur powietrza zewnętrznego. W każdej godzinie określono granice przedziału ufności na poziomie  $\alpha=0,01$ . Na rysunku 3 przedstawiono średnie dobowe przebiegi temperatur powietrza zewnętrznego w okresie zimnym i ciepłym.



Rys. 3. Średnie dobowe przebiegi temperatury w okresach zimnym i ciepłym w latach 1998–2007 [10]  
Fig. 3. Average daily temperature in the cold and warm seasons of 1998–2007 [10]

Odcinkami pionowymi oznaczono granice przedziału ufności w przypadku każdej godziny w ciągu doby. Okres zimny obejmował średnio 268 dni w roku. Średnie dobowe wahania temperatury w tym okresie wynosiły  $5,7^{\circ}\text{C}$ . Wartości temperatur zawierały się w granicach  $2,9\div 8,6^{\circ}\text{C}$ . Okres ciepły obejmował średnio 97 d w roku. Średnie dobowe temperatury powietrza zmieniły się w zakresie  $13,2\div 23,7^{\circ}\text{C}$ , a średnie dobowe wahania temperatury w tym okresie dochodziły  $10,5^{\circ}\text{C}$ .

### Analiza ekonomiczna skuteczności odzyskiwania ciepła

W analizie zestawiono koszty inwestycyjne i eksploatacyjne central wentylacyjnych z następującymi urządzeniami do odzyskiwania ciepła:

- krzyżowo-płytkowy wymiennik ciepła,
- rurka ciepła,
- regeneracyjny obrotowy wymiennik ciepła,
- regeneracyjny nieobrotowy wymiennik ciepła.

Koszty central z tymi urządzeniami porównano z kosztami central bez odzyskiwania ciepła oraz z recyrkulacją powietrza w 50%.

Do odzyskiwania ciepła najczęściej stosuje się krzyżowo-płytkowe wymienniki ciepła, regeneracyjne obrotowe

wymienniki ciepła oraz rurki ciepła. Układy te są dość powszechnie znane, natomiast mniej znane jest rozwiązanie z regeneracyjnym nieobrotowym wymiennikiem ciepła. Twórcy takiego wymiennika ciepła o nazwie Superblok podają, że urządzenie to może osiągać sprawność odzyskiwania ciepła dochodzącą do 95%. Urządzenie tworzą dwie kasety aluminiowe oraz system przepustnic z napędem elektrycznym w celu zmiany kierunku przepływu powietrza. Strumień ciepłego powietrza wywiewanego z pomieszczenia przepływa przez pierwszą kasetę wymiennika, podczas gdy strumień zimnego powietrza zewnętrznego jest kierowany do drugiej kasety, w której odbiera ciepło zakumulowane w pierwszej kasecie [9]. Średni cykl zmian przepływu powietrza przez poszczególne kasety wymiennika wynosi około 20 s.

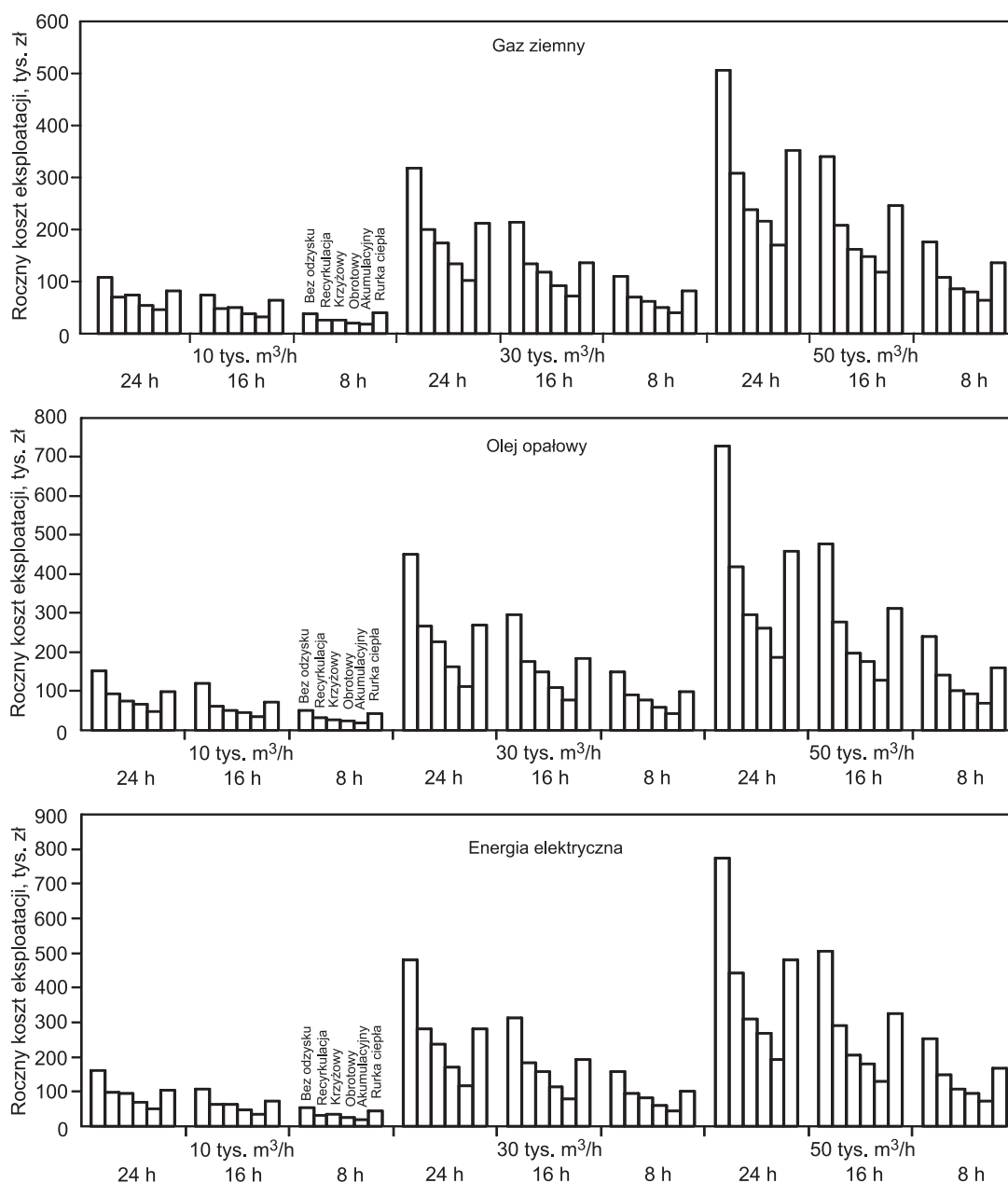
Analizę ekonomiczną przeprowadzono wg niemieckiej normy VDI 2071 [8]. Na podstawie tej metody wyznaczono poszczególne składowe kosztów w rozpatrywanych układach, tj. koszty inwestycyjne, koszty eksploatacyjne, koszty utrzymania oraz koszty energii (cieplnej, chłodniczej, elektrycznej do napędu silników wentylatorów) podczas całorocznej eksploatacji. Wszystkie przypadki rozpatrzono przyjmując następujące strumienie powietrza: 10 tys.  $\text{m}^3/\text{h}$ , 30 tys.  $\text{m}^3/\text{h}$  i 50 tys.  $\text{m}^3/\text{h}$ . Uwzględniono następujące tryby pracy instalacji:

- 24-godz. przez cały rok,
- 24-godz. przez cały rok z wyłączeniem sobót i niedziel,
- 16-godz. przez cały rok,
- 16-godz. przez cały rok z wyłączeniem sobót i niedziel,
- 8-godz. przez cały rok,
- 8-godz. przez cały rok z wyłączeniem sobót i niedziel.

Dodatkowo rozważono również skuteczność urządzeń wentylacyjnych pracujących, przez co najmniej jedną godzinę przed oraz jedną godzinę po użytkowaniu obiektu. Rozpatrzono zatem także 10-godz. pracę instalacji przez cały rok (z pracą oraz przerwą w soboty i niedziele) oraz 18-godz. pracę instalacji (z pracą oraz przerwą w soboty i niedziele). Wyniki obliczeń poszczególnych trybów pracy rozpatrywanych układów zestawiono na rysunkach 4–6. Dane wyjściowe analizy przyjęto jak w tabeli 1.

Tabela 1. Dane wyjściowe do analizy ekonomicznej urządzeń do odzyskiwania ciepła  
Table 1. Input data for economic analysis of heat recovery devices

Parametr, jednostka	Strumień powietrza $\text{m}^3/\text{h}$	Bez odzyskiwania ciepła	Urządzenie do odzyskiwania ciepła				
			recyrkulacja 50%	wymiennik krzyżowy	rurka ciepła	wymiennik obrotowy	wymiennik nieobrotowy
Sprawność odzysku ciepła, %	10000	–	50	51	61	70	94
	30000	–	50	61	58	78	94
	50000	–	50	74	52	80	92
Moc nagrzewnicy powietrza, kW	10000	141	68	67	52	42	10
	30000	422	204	158	171	88	36
	50000	704	340	188	328	136	66
Moc chłodnicy powietrza, kW	10000	50	26	47	50	47	7
	30000	150	65	143	144	143	20
	50000	250	104	243	245	243	34
Moc wentylatorów, kW	10000	4,0/4,0	4,0/4,0	5,5/4,0	5,5/4,0	4,0/4,0	5,5/5,5
	30000	11,0/11,0	11,0/11,0	11,0/11,0	15,0/11,0	11,0/11,0	11,0/11,0
	50000	15,0/15,0	15,0/15,0	18,0/18,0	18,5/18,5	18,0/18,0	18,0/18,0
Koszt centrali z pełną automatyką, zł	10000	44930	52700	70940	76040	74310	101280
	30000	99980	115150	147910	157240	155170	207750
	50000	142070	163690	210920	224370	251730	298320



Rys. 4. Roczne koszty eksploatacyjne rozpatrywanych układów  
 Fig. 4. Annual operating costs for the systems examined

Koszty inwestycyjne ( $K_k$ ) określono na podstawie wartości inwestycji oraz średniego czasu użytkowania układu w postaci:

$$K_k = K_i \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

w której:

$K_i$  – koszty inwestycyjne związane z zakupem central wentylacyjnych, zł

$i$  – stopa procentowa (na potrzeby analizy przyjęto stałą stopę procentową)

$n$  – średni czas użytkowania instalacji, lata (przyjęto  $n=20$  lat)

Koszty utrzymania instalacji ( $K_u$ ) powiązano z wyznaczonymi wcześniej kosztami inwestycyjnymi, w zależności od przyjętego czasu użytkowania instalacji wentylacyjnej lub klimatyzacyjnej (20 lat) w postaci:

$$K_u = K_i f_u \quad (4)$$

w której:

$f_u$  – współczynnik rocznego utrzymania instalacji

Koszty eksploatacyjne ( $K_{bw}$ ) przedstawiono w postaci:

$$K_{bw} = K_i f_{bw} \quad (5)$$

w której:

$f_{bw}$  – współczynnik rocznej eksploatacji

Koszty zmienne ( $K_e$ ) związane z jednostkową ceną nośników energii pierwotnej doprowadzanych do centrali wentylacyjnej/klimatyzacyjnej w ciągu roku oraz rocznego ich zużycia rozłożono odpowiednio na poszczególne media:

$$K_e = K_{wb} + K_{kb} + K_{el} \quad (6)$$

gdzie:

$K_{wb}$  – roczne koszty energii cieplnej, zł/rok

$K_{kb}$  – roczne koszty energii chłodniczej, zł/rok

$K_{el}$  – roczne koszty energii elektrycznej, zł/rok

Zatem na całkowite koszty energii składają się [7]:

– koszt energii cieplnej niezbędnej do zasilania nagrzewnic powietrza układu wentylacyjnego/klimatyzacyjnego – zużycie energii cieplnej zależne jest od liczby stopniogodzin okresu ogrzewania powietrza oraz sprawności zastosowanego układu do odzysku energii cieplnej,

– koszt energii chłodniczej niezbędnej do zasilania chłodnic powietrza układu wentylacyjnego/klimatyzacyjnego – zużycie energii chłodniczej zależne jest od liczby stopniogodzin chłodzenia powietrza oraz gramogodzin osuszania,

– koszt energii elektrycznej niezbędnej do napędu silników wentylatorów centrali wentylacyjnej/klimatyzacyjnej i innych elementów ruchowych układu.

Koszty związane z przygotowaniem energii cieplnej porównano ponadto w zależności od zastosowanego rodzaju paliwa. Pod uwagę brane były koszty wytworzenia ciepła z gazu ziemnego, propanu, oleju opałowego, energii elektrycznej oraz ciepła z przedsiębiorstwa energetyki cieplnej.

## Wyniki analizy

Roczne koszty eksploatacyjne rozpatrywanych układów, przy zastosowaniu gazu ziemnego, oleju opałowego i energii elektrycznej do wytwarzania ciepła, przedstawiono na rysunku 4.

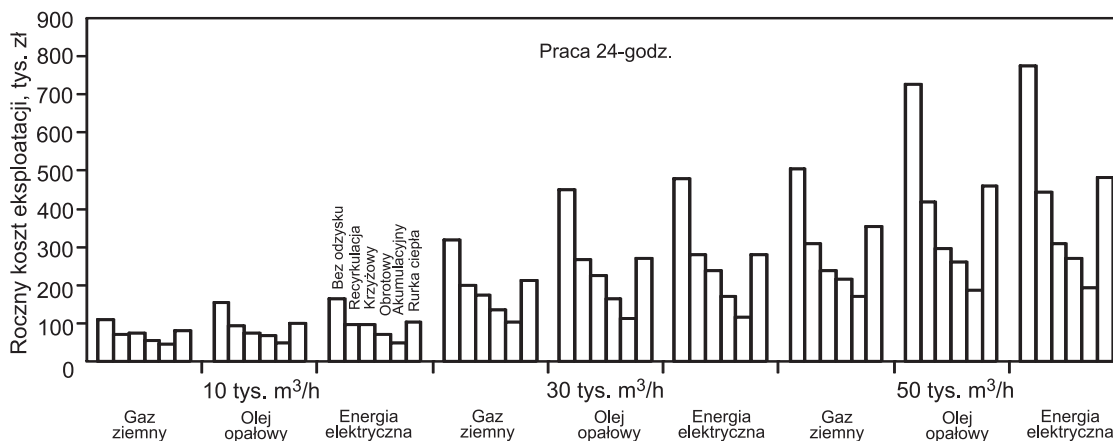
Stwierdzono, że w przypadku zastosowania gazu ziemnego największe koszty eksploatacyjne wystąpiły w układzie

z rurką ciepła. Wpływ na to miał fakt, iż osiągając w miarę dużą sprawność, przy dosyć dużych kosztach inwestycyjnych, urządzenie to niestety nie było technologicznie przystosowane do odzyskiwania chłodu z powietrza wywiewanego w okresie ciepłym, zatem koszty eksploatacyjne tego układu są sztucznie zawyżone. Największe korzyści wystąpiły przy zastosowaniu układu z regeneracyjnym nieobrotowym wymiennikiem ciepła. Dla inwestora duży wpływ na podjęcie decyzji o wyborze urządzenia ma koszt centrali z tego typu wymiennikiem, który w tym przypadku był najwyższy spośród wszystkich rozpatrywanych układów. Podkreślić jednak należy bardzo małe koszty eksploatacyjne oraz dosyć krótki czas zwrotu kosztów.

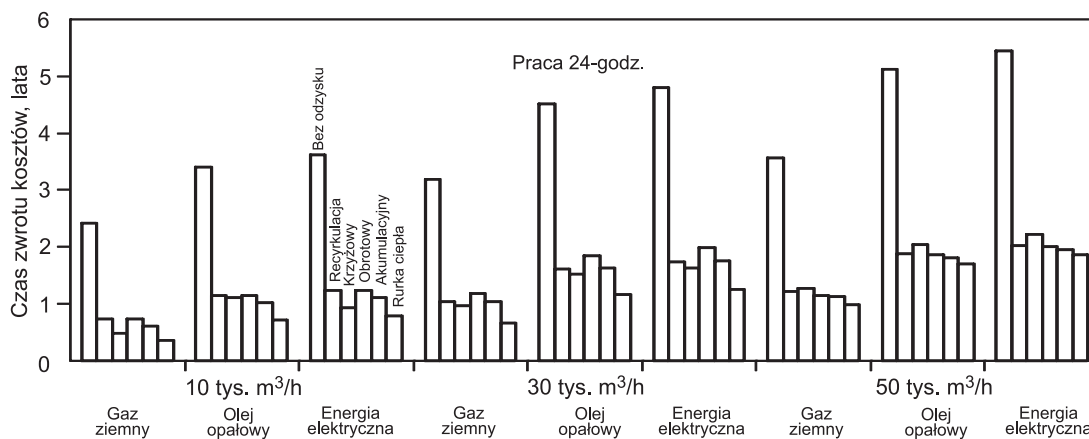
Najmniejsze koszty eksploatacyjne przy zastosowaniu oleju opałowego do wytwarzania ciepła wystąpiły w układzie z regeneracyjnym nieobrotowym wymiennikiem ciepła. Korzystne były także w przypadku krzyżowopłytkowego wymiennika ciepła oraz obrotowego wymiennika ciepła.

W przypadku zastosowania energii elektrycznej, rurka ciepła charakteryzowała się dużymi kosztami eksploatacyjnymi, w porównaniu do pozostałych układów.

Na rysunku 5 zobrazowano różnice w rocznych kosztach eksploatacyjnych rozpatrywanych układów przy 24-godz. pracy w przypadku trzech wybranych paliw (gaz ziemny, olej opałowy oraz energia elektryczna). Najmniejsze koszty eksploatacyjne wystąpiły przy zastosowaniu gazu ziemnego. Odpowiednio większe były przy zastosowaniu oleju opałowego (o ok. 39%) i jeszcze nieco większe (o 44%) przy wykorzystaniu energii elektrycznej.



Rys. 5. Roczne koszty eksploatacyjne rozpatrywanych układów przy 24-godz. pracy instalacji  
Fig. 5. Annual operating costs for the systems examined (24-hour operation)



Rys. 6. Czas zwrotu kosztów przy 24-godz. pracy rozpatrywanych układów  
Fig. 6. Time of returns from investments for the systems examined (24-hour operation)

Na rysunku 6 zestawiono orientacyjny czas zwrotu kosztów w przypadku wszystkich rozpatrywanych układów. Układy z urządzeniami do odzyskiwania ciepła porównywane były z układem bez odzyskiwania ciepła oraz z układem z recyrkulacją powietrza. Wykazano, że zastosowanie układów do odzyskiwania ciepła w systemach wentylacyjnych/klimatyzacyjnych niesie ze sobą wiele korzyści, zwłaszcza finansowych.

## Wnioski

◆ Największą skuteczność odzyskiwania energii cieplnej z powietrza wywiewanego można uzyskać stosując regeneracyjny nieobrotowy wymiennik ciepła, a w dalszej kolejności – regeneracyjny obrotowy wymiennik ciepła i krzyżowy wymiennik ciepła. Zastosowanie elementów ruchomych do odzysku ciepła powoduje nieco większe koszty eksploatacyjne oraz stwarza możliwość awaryjności. Pomimo największych kosztów inwestycyjnych oraz stosunkowo dużych kosztów eksploatacyjnych, regeneracyjny nieobrotowy wymiennik ciepła jest urządzeniem dającym największe korzyści finansowe.

◆ Rurka ciepła, mimo dosyć dużej sprawności i niewielkich kosztów inwestycyjnych, okazała się najmniej skuteczna pod względem eksploatacyjnym. Jest to urządzenie o specyficznym działaniu, nadające się do obiektów, w których odzyskiwane jest tylko ciepło (np. baseny kąpielowe, łaźnie).

◆ Stosowanie gazu ziemnego do wytworzenia ciepła jest współcześnie spośród innych paliw najbardziej korzystne (pod względem finansowym i ochrony środowiska).

Im dłuższy jest czas pracy instalacji w ciągu doby lub więcej dni pracy instalacji w ciągu roku, tym krótszy jest czas zwrotu kosztów inwestycyjnych.

◆ W każdym z rozpatrywanych przypadków stosowanie urządzeń odzyskujących energię z powietrza wywiewanego należy ocenić jako korzystne z punktu widzenia całkowitych kosztów eksploatacji instalacji wentylacyjnych.

## LITERATURA

1. M. DUBICKA, J. PYKA: Warunki meteorologiczne we Wrocławiu w 1974 r. w świetle wieloletnich danych klimatologicznych, A UW No. 738. *Biul. Meteorol.* 1974, nr 29 (4).
2. W. LEVEN: Energooszczędność i ekonomiczność systemów klimatyzacyjnych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 2000, nr 6, ss. 21–23.
3. A. PELECH.: Wentylacja i klimatyzacja – podstawy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
4. E. PRZYDRÓŻNY: Wentylacja. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.
5. H. RECKNAGEL, E. SPRENGER, E.R. SCHRAMEK: Ogrzewanie, klimatyzacja, c.w.u., chłodnictwo. Omni Scala, Wrocław 2008.
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU nr 75 poz. 690) oraz rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 6 listopada 2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU nr 201, poz. 1238).
7. E. SZCZECHOWIAK i in.: Energooszczędne układy zaopatrzenia budynków w ciepło. *Envirotech*, Poznań 1994.
8. VDI 2071:1997-12 Wärmerückgewinnung in Raumlufthechnischen Anlagen (norma niemiecka).
9. Dane katalogowe firmy Clima Produkt (praca niepublikowana)
10. Wyniki pomiarów meteorologicznych. Uniwersytet Wrocławski, Katedra Meteorologii i Klimatologii, Wrocław 2008 (praca niepublikowana).

**Besler, M., Skrzycki, M. Analyzing the Operating Efficiency of Heat Energy Recovery from Outlet Air. *Ochrona Środowiska* 2009, Vol. 31, No. 1, pp. 41–47.**

**Abstract:** The advantages of heat recovery from the outlet air in ventilation and air conditioning systems were analyzed in terms of energy savings and related benefits. The paper also includes theoretical explanations for the basic phenomena and processes dealt with in heat recovery, and describes (in the form of charts) the changes that occur in the state of the air during heat and mass transfer processes in heat exchangers. The study covered the time span of 1998 to 2007, where each year was divided into two thermal seasons: the cold season (temperatures  $\leq 15^\circ\text{C}$ ) and the warm season (temperatures  $> 15^\circ\text{C}$ ). Using the real parameter values obtained from many years' external air measurements conducted in the city of Wrocław, the operating efficiencies were compared for

the following devices: rotary heat exchangers, cross-flow heat exchangers, regenerative nonrotary heat exchangers and heat pipes. The operation of the devices was compared with the operation of a system with no heat recovery. The devices were analyzed according to the parameters of the system's operation throughout the year, as well as according to the type of the fuel used for generating the heat supplied to the system. The comparison of the costs of the original energy consumed and the capital costs for the devices of the ventilation/air-conditioning systems examined has revealed that in every instance the application of devices providing energy recovery from outlet air has to be regarded as advantageous in terms of the overall operating costs of the ventilation systems.

**Keywords:** Energy recovery, ventilation/air-conditioning system, heat exchanger, heat and mass transfer.