

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Efektywność wymienników ciepła przy rekuperacji ciepła w wentylacji i klimatyzacji

ANDRZEJ GRZEBIELEC, ARTUR RUSOWICZ  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA,  
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ

**Słowa kluczowe:** efektywność wymiennika ciepła, rekuperacja, wentylacja, klimatyzacja

#### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono możliwości odzysku ciepła w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych z wykorzystaniem rekuperacji. Omówiono efektywności energetyczne poszczególnych rozwiązań oraz zaprezentowano sposób określenia tej efektywności. Wykonano obliczenia dla dwóch typów wymienników ciepła: rura w rurze oraz wymiennika płytowego. Wyznaczono ich efektywności eksperymentalnie.

#### The heat exchangers effectiveness in ventilation and air conditioning

**Keywords:** heat exchanger efficiency, recuperation, ventilation, air conditioning,

#### ABSTRACT

The paper presents the possibility of heat recovery in ventilation and air conditioning. There are discussed energy efficiency of individual solutions and demonstrates how to determine the effectiveness. The are shown calculations for two types of heat exchangers, duple-pipe type and plate. Their effectiveness was also determined experimentally.

## 1. WPROWADZENIE

W obecnych czasach znaczący nacisk kładzie się na efektywność energetyczną instalacji i urządzeń. W przypadku instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych stosuje się dodatkowe wymienniki ciepła tzw. rekuperatory. Odzyskują one ciepło ze strumieni powietrza wywiewanego lub nawiewanego do pomieszczeń. Zimą, gdy usuwane jest ciepłe powietrze z pomieszczeń, a zasysane z zewnątrz zimne, następuje podgrzewanie powietrza zasysanego, ciepłem pochodzącym z powietrza wywiewanego. Latem następuje sytuacja odwrotna, ciepłe powietrze zewnętrzne, chłodzone jest chłodem pochodzącym ze strumienia powietrza wywiewanego z pomieszczeń (w przypadku stosowania systemów klimatyzacji). W okresach przejściowych wiosenno-jesiennych przekazywane ciepło zależy od temperatury otoczenia. Proces doprowadzania „świeżego” powietrza jest wymagany we wszystkich typach pomieszczeń (mieszkalnych, przemysłowych, rolniczych itd.) [1, 2], więc wszędzie można przewidzieć odzysk ciepła (tzw. rekuperację). W przypadku kojarzenia dwóch strumieni powietrza można zastosować różne typy wymienników ciepła [3]:

- rura w rurze,
- pośrednie (np. z wykorzystaniem medium pośredniczącego - glikolu),
- płytowe krzyżowo-prądowe,
- obrotowe.

Proces rekuperacji można zintensyfikować rozbudowując układy wentylacyjne lub klimatyzacyjne o pompy ciepła lub rurki cieplne. Zastosowanie odzysku ciepła jest atrakcyjne energetycznie i pozwala zwiększyć efektywność energetyczną instalacji wentylacyjnej lub klimatyzacyjnej. Użytkownikowi przynosi wymierne oszczędności ekonomiczne. Ważnym elementem przy wyborze sposobu odzysku ciepła jest analiza techniczno-ekonomiczna. W tym momencie pojawiają się pierwsze trudności w znalezieniu rzetelnych informacji. Producenci, dystrybutorzy, jak również „prasa branżowa” prześcigają się w efektywnościach proponowanych rozwiązań odzysku ciepła, czasem niepoprawnie nazywając to sprawnościami wymienników ciepła [4]. O sprawnościach można mówić w urządzeniach, w których następuje transformacja jednej formy energii na drugą np. silnik spalinowy zamienia energię chemiczną

paliwa na energię mechaniczną. W przypadku wymienników ciepła mamy tylko transport ciepła z jednego medium do drugiego, bez jakiegokolwiek transformacji energii. O jakości wymienników strumieni ciepła informuje efektywność wymiennika, którą można zdefiniować jako stosunek strumienia ciepła wymienianego do maksymalnego możliwego strumienia ciepła [5, 6].

$$\dot{a} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{\text{aktualnie wymieniany strumień ciepła}}{\text{maksymalny możliwy do wymieniany strumień ciepła}} \quad (1)$$

W Tabeli 1 przedstawiono różne systemy odzysku ciepła oraz osiągnięte efektywności wymienników ciepła. Należy zwrócić uwagę na znaczne różnice pomiędzy danymi uzyskiwanymi z badań naukowych [7, 8, 9] a podawanymi w katalogach producentów [4]. Następnym ważnym elementem, który należy podkreślić, jest zmienność efektywności wymiennika w zależności od parametrów przepływających strumieni.

**Tabela 1** Porównanie systemów odzysku ciepła na podstawie danych eksperymentalnych [7-9] i katalogowych [4]

**Table 1** Comparison of heat recovery based on experimental [7-9] and catalog data [4]

System odzysku ciepła	Efektywność odzysku ciepła (bez odzysku wilgoci)	Dane katalogowe producentów i dystrybutorów
Wymiennik płytowy	50-60%	70% - 90%
Rekuperacja pośrednia	40-50%	45% - 55%
Wymiennik obrotowy bez odzysku wilgoci	65-80%	70% - 95%
Wymiennik obrotowy z odzyskiem wilgoci	65-80%	powyżej 95%
Rurka cieplna	15-30%	50-60%

Następnie na przykładach domów jednorodzinnych, biur, budynków użyteczności publicznej przedstawia się roczne oszczędności energii, które prezentują się imponująco.

## 2. MODEL OBLICZENIOWY

Na ogół znana jest geometria wymiennika (średnice, długość) oraz temperatury czynników na wlocie i ich strumienie masy. Aby obliczyć ciepło wymienione, a zarazem temperatury wyjściowe

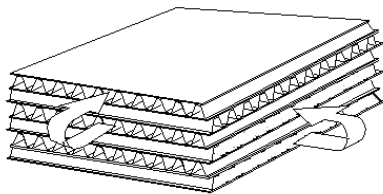


krzyżowy bez mieszania strumieni

$$(9) \quad \varepsilon = 1 - \exp\left[\frac{NTU^{0,22}}{C} \left[\exp(-C NTU^{0,78}) - 1\right]\right]$$

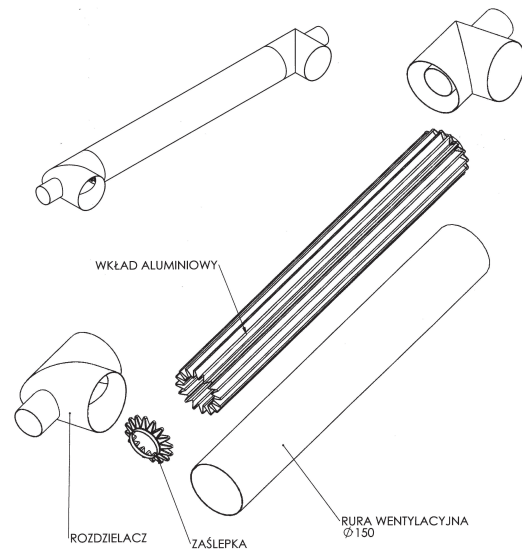
### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badaniom poddano dwa wymienniki używane w rekuperacji ciepła w instalacjach klimatyzacyjnych i wentylacyjnych. Pierwszy z nich jest stosowany w centralach klimatyzacyjnych, jako wymiennik płytowy, krzyżowy, wykonany z tworzywa sztucznego, jednoprzepływowo. Strumień powietrza zewnętrznego wpływa do wymiennika o wymiarach czołowych 90x60 cm. Powierzchnia wymiany składa się z 60 płyt o grubości 5 mm i podziałce 5 mm, występuje mieszanie strumienia. Natomiast powietrze wywiewane wpływa do wymiennika o wymiarach czołowych 115x60 cm. Grubość płyt i podziałka są takie same jak dla strumienia powietrza zewnętrznego, z tym, że nie następuje mieszanie strumienia. Schemat wymiennika przedstawiono na Rysunku 2.



**Rysunek 2** Schemat wymiennika płytowego z przepływem krzyżowoprądowym  
**Figure 2** Schematic of a cross flow plate heat exchanger

Drugi wymiennik o konstrukcji „rura w rurze” przeznaczony jest głównie do zastosowań rekuperacji ciepła w instalacjach wentylacyjnych w małych obiektach. Długość wymiennika wynosi 1,8 m, a średnica płaszczki zewnętrznej 0,15 m. Badany wymiennik jest prototypowy, nie ma więc porównania katalogowego producenta. Konstrukcję zaprezentowano na Rysunku 3. W ramach pomiarów zmierzono wydatki przepływającego powietrza nawiewanego  $q_{v,in}$  i wywiewanego  $q_{v,out}$  oraz temperatury powietrza na wlotach i wylotach z wymienników. W przypadku wymiennika krzyżowego wydatek objętościowy powietrza był regulowany przy pomocy sterownika do pomiaru wydatku objętościowego powietrza.



**Rysunek 3** Konstrukcja analizowanego wymiennika „rura w rurze”  
**Figure 3** Construction of the analyzed double-pipe heat exchanger

W przypadku wymiennika typu rura w rurze wydatki objętościowe zostały określone na podstawie pomiaru średniej prędkości przepływu dokonanego przy pomocy anemometru. Określone zostały również wilgotności względne strumieni powietrza. W obu przypadkach nie występowała kondensacja wilgoci na ścianach wymienników. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 2. Wyniki obliczeń efektywności wymienników w oparciu o zależność (7) dla wymiennika płytowego oraz zależność (9) dla wymiennika „rura w rurze” zaprezentowano w Tabeli 3.

**Tabela 2** Wyniki pomiarów strumieni powietrza  $q_{v,in}$ ,  $q_{v,out}$  oraz temperatury  $T_{G1}$ ,  $T_{G2}$ ,  $T_{Z1}$ ,  $T_{Z2}$  dla analizowanych wymienników ciepła

**Table 2** The experimental results of air mass rate and temperature for the analyzed heat exchangers

	$q_{v,out}$	$q_{v,in}$	$T_{G1}$	$T_{G2}$	$T_{Z1}$	$T_{Z2}$
Jednostka	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Wymiennik płytowy	6300	6300	26,4	18,7	7,6	18,6
Wymiennik „rura w rurze”	76	38	18,5	14,3	2,0	10,3
	105	38	28,0	22,5	2,0	17,0
	48	39	30,0	22,5	12,5	22,0

**Tabela 3** Wyniki obliczeń mocy cieplnej  $\dot{Q}$  oraz efektywności  $e$  analizowanych wymienników ciepła  
**Table 3** The computational results of heat power  $\dot{Q}$  and efficiency  $e$  for the analyzed heat exchangers

		$C_1$	$C_2$	$C_{min}$	$\dot{Q}$	$\dot{Q}_{max}$	$e$
Jednostka		[W/K]	[W/K]	[W/K]	[W]	[W]	[-]
Wymiennik płytowy	Pomiar 1	2072	2141	2072	23550	38960	60%
Wymiennik „rura w rurze”	Pomiar 1	25,5	12,8	12,8	107	211	51%
	Pomiar 2	34,2	13,1	13,1	188	340	55%
	Pomiar 3	15,6	13,1	13,1	117	229	51%

W Tabeli nr 4 zostały natomiast zaprezentowane dane termofizyczne tablicowe, wykorzystane w obliczeniach. Dane zostały wyznaczone, jako średnie arytmetyczne dla temperatury powietrza w strumieniu. Zostało tak określone ciepło właściwe  $c_p$  oraz gęstość  $\rho$  w funkcji temperatury strumienia ciepłego  $T_g$  oraz zimnego  $T_z$ .

**Tabela 4** Dane termofizyczne wykorzystane w obliczeniach

**Table 4** Thermophysical data used in computation

		$c_p(T_g)$	$\rho(T_g)$	$c_p(T_z)$	$\rho(T_z)$
Jednostka		[kJ/kgK]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kgK]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Wymiennik płytowy	Pomiar 1	1,005	1,178	1,005	1,217
Wymiennik „rura w rurze”	Pomiar 1	1,005	1,203	1,005	1,248
	Pomiar 2	1,005	1,168	1,005	1,233
	Pomiar 3	1,005	1,164	1,005	1,200

#### 4. POSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów dwóch różnych konstrukcji wymienników ciepła stosowanych przy rekuperacji ciepła w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Zakres otrzymanych eksperymentalnie efektywności wymienników jest zgodny z publikowanymi danymi z innych prac badawczych. Na uwagę natomiast zasługuje natomiast zmienność efektywności wymienników w zależności od strumieni i parametrów przepływającego powietrza. Efektywność wymiennika

nie jest wartością stałą, jak jest to najczęściej prezentowane w katalogach producentów i dystrybutorów. W katalogach nie są umieszczane wartości średnie, a raczej maksymalne. Powoduje to w wielu przypadkach nieporozumienia przy wykorzystaniu wymienników w konkretnych aplikacjach. Oczekiwania znacznie przewyższają realne efekty. Przykładem może być prezentowany wymiennik płytowy, dla którego producent podaje efektywność 80%, natomiast zmierzona w warunkach wiosennych jest

na poziomie 60%. Podobnie nieporozumienia budzi oszczędność energii z wykorzystaniem wymienników ciepła, gdy „zapomina się” przeanalizować dodatkowe opory przepływu w instalacji wynikające z obecności wymiennika. Dodatkowe opory generują spadki ciśnienia powietrza w instalacji, w związku z tym należy je pokonać instalując wentylatory o zapotrzebowaniu na większą moc elektryczną. W przypadku wymiennika „rura w rurze” przy mocach cieplnych wymienianych poprzez strumienie powietrza na poziomie 100-190 W, należało zastosować dwa wentylatory, każdy o mocy elektrycznej 24 W. Uwzględnienie tej wartości znacząco obniża zyski energetyczne z przyjętego rozwiązania.

Innym problemem, który może zaistnieć, a który jest pomijany przez producentów, jest wykraplanie się wilgoci. Jeżeli różnica temperatury pomiędzy jednym a drugim strumieniem będzie na tyle duża, że temperatura ciepłego strumienia spadnie poniżej temperatury punktu rosy, znacznie wykraplać się woda. W przypadku rekuperacji bez możliwości wymiany wilgoci spowoduje to zmniejszenie się efektywności wymiany ciepła. Reasumując, zgodnie z wymogami dotyczącymi podnoszenia efektywności energetycznej instalacji oraz obniżenia emisji gazów cieplarnianych, należy stosować rozwiązania przynoszące oszczędności energii. Takimi rozwiązaniami

w wentylacji i klimatyzacji są urządzenia odzyskujące ciepło. Zastosowanie rekuperacji ciepła w układach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych jest prawnie usankcjonowane. Przynosi ono wymierne korzyści, natomiast każdy przypadek wymiennika ciepła należy przeanalizować przed jego zainstalowaniem.

Niniejsza praca jest współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, poprzez realizację projektu „Program rozwoju dydaktycznego Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej”.

#### LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690).
- [2] PN-83/B-03430/Az3:2000 Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności. Strumienie powietrza niezbędne do wentylacji.
- [3] Teke I., Agra O., Atayilmaz S. O., Hakan D., Determining the best type of heat exchangers for heat recovery Applied Thermal Engineering Volume: 30, Issue: 6-7, May, 2010, pp. 577-583.
- [4] Rekuperatory. Oferta rynkowa Rynek Instalacyjny 1/2012.
- [5] Leinhard J. H. IV., Leinhard J. H. V, A Heat Transfer Textbook, Cambridge Massachusetts USA 2011
- [6] Kreith F., Boehm R.F., et. al., Heat and Mass Transfer, Mechanical Engineering Handbook Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [7] Gwidroyń A., Techniczne uwarunkowania zużycia energii cieplnej i chłodniczej w instalacjach wentylacji i klimatyzacji, Konferencja XII Zjazdu Ogrzewników Polskich „Oszczędność energii a zysk”, Warszawa 2002.
- [8] Skrzyszewski M., Określanie zapotrzebowania na ciepło do wentylacji w przypadku stosowania odzysku ciepła z powietrza wywiewanego, bez nagrzewnic powietrza, Konferencja „Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce”, Warszawa 2003.
- [9] Zator S., Energooszczędność z odzyskiem ciepła, Rynek Instalacyjny 3/2008.