

Dorian CZARNIECKI\*, Vyacheslav PISAREV\*\*, Józef DZIOPAK\*, Daniel SŁYŚ\*

## **ANALIZA TECHNICZNA I FINANSOWA INSTALACJI DO ODZYSKU CIEPŁA ZE ŚCIEKÓW W BUDYNKACH WIELORODZINNYCH**

Jednym z nowoczesnych i efektywnych sposobów dbania o energię i ochronę środowiska jest wykorzystanie ciepła ze źródeł odpadowych. Malejące zasoby paliw kopalnych i rosnące zanieczyszczenie środowiska naturalnego związane z ich stosowaniem to jedne z problemów współczesnej energetyki. Rozwiązuje się je przez rozwój technik umożliwiających pozyskiwanie i przetwarzanie energii oraz racjonalizację jej wykorzystania. Odpowiedzią na taki trend jest system odzysku ciepła ze ścieków odprowadzanych z natrysków i pralek. Celem niniejszego artykułu było porównanie instalacji umożliwiających odzysk ciepła ze ścieków szarych do zaopatrzenia budynku wielorodzinnego w ciepłą wodę użytkową, jak również analiza finansowa ich zastosowania w ustalonych uwarunkowaniach.

### 1. WSTĘP

Prognozy i ogólnoświatowe trendy wskazują, że w najbliższych latach, a i także w dalszej przyszłości, trzeba się liczyć ze znacznym wzrostem kosztów energii w stosunku do kosztów budowy, konstrukcji czy samych urządzeń, w tym grzewczych. W wyniku tego budownictwo energooszczędne i pasywne uległo w ostatnim okresie zdecydowanemu ożywieniu. Daje się zauważyć tendencje do stosowania rozwiązań energooszczędnych, które umożliwiają przede wszystkim obniżenie kosztów przygotowania ciepłej wody użytkowej, ale również ochronę środowiska naturalnego. Główną przyczyną tego podejścia są właśnie rosnące ceny tradycyjnych nośników energii oraz poprawa świadomości ekologicznej społeczeństwa.

---

\* Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Infrastruktury i Ekorozwoju, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów.

\*\* Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów.

Na skutek wprowadzenia świadectw energetycznych w Polsce, zwracana jest również uwaga na zastosowanie rozwiązań energooszczędnych w celu uzyskania lepszej oceny energetycznej budynku, co przekłada się na korzystniejszą wycenę nieruchomości. Mając to na względzie należy dać pierwszeństwo wszystkim systemom oszczędzającym energię i obniżającym koszty jej wytwarzania lub umożliwiającym jej pozyskanie w sposób tani z nowych źródeł, nawet w sytuacji, gdy obecnie koszty te wydają się nieco wyższe. W związku z powyższym coraz częściej stosuje się wymienniki oraz pompy ciepła odzyskujące zdeponowane w ściekach ciepło odpadowe, zwłaszcza jeżeli rozwiązanie to wspomaga i uzupełnia system przygotowania ciepłej wody użytkowej.

W Polsce odzysk ciepła ze ścieków szarych w instalacjach kanalizacyjnych jest spotykany niezwykle rzadko, jednakże przedstawione w literaturze [15] przykłady uzasadniają celowość zainteresowania się tą formą wykorzystania energii odpadowej niesionej przez ścieki. Przybliżono wyniki analiz zagospodarowania energii cieplnej zgromadzonej w ściekach odpływających z takich obiektów, jak: hotelowa sauna, szkolne prysznice, obiekt gastronomiczny czy budynek jednorodzinny.

Celem opracowania było porównanie różnych systemów z instalacją do odzysku ciepła ze ścieków szarych w małych i średnich budynkach wielorodzinnych w południowo-wschodniej Polsce.

## 2. WARIANTY ROZWIĄZAŃ INSTALACJI Z ODZYSKIEM CIEPŁA NA POTRZEBY PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ

### 2.1. WPROWADZENIE

Obiekty wielorodzinne charakteryzują się nierównomiernym rozłożeniem obciążenia zrzutu ścieków do kanalizacji w ciągu doby. Zależy to od liczby działających jednocześnie natrysków i urządzeń pralniczych. W związku z tym, w instalacji należy zastosować zbiornik retencyjny na ścieki, który umożliwi stały ich dopływ do układu odzysku ciepła. Z kolei przekazane ciepło do wody świeżej należy akumulować w zasobnikach ciepłej wody użytkowej. Dla odzysku ciepła ze ścieków szarych może być wykorzystana efektywna pompa ciepła. Należy zastosować filtr wstępny ścieków (łapacz włosów i włókien). W związku z powyższym układ do odzysku ciepła ze ścieków szarych może się składać z następujących elementów: zbiornika retencyjnego ścieków szarych, filtra wstępnego ścieków, pompy ścieków, wymiennika lub pompy ciepła oraz orurowania i zaworów, a także automatyki umożliwiającej współpracę z układami wodno-kanalizacyjnymi i przyłączy ścieków [1]. W budownictwie mieszkaniowym istnieje teoretycznie możliwość odzyskania części ciepła odprowadzanego w postaci ścieków. Na przykład, zasoby ciepła usuwanego z pomieszczeń wraz ze

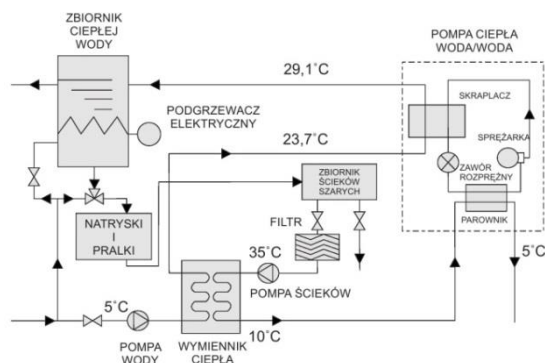
ściekami przy zużyciu c.w.u. około  $80 \text{ dm}^3/(\text{Mk}\cdot\text{d})$ , wynoszą prawie  $90 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{rok})$  [13]. Jednak wykorzystanie tych zasobów wymaga zmiany rozwiązań instalacji kanalizacyjnej, polegającej na oddzieleniu pionów kanalizacji fekalnej od kanalizacji odprowadzającej ścieki bytowe zwane ściekami szarymi (np. wanna, natryski, pralki). Instalację odzysku ciepła dla nowobudowanego budynku wielorodzinnego z uwzględnieniem różnej liczby mieszkańców przeanalizowano dla trzech wariantów:

- Wariant I - z pompą ciepła i wymiennikiem ciepła,
- Wariant II - z wymiennikiem ciepła,
- Wariant III - z pompą ciepła.

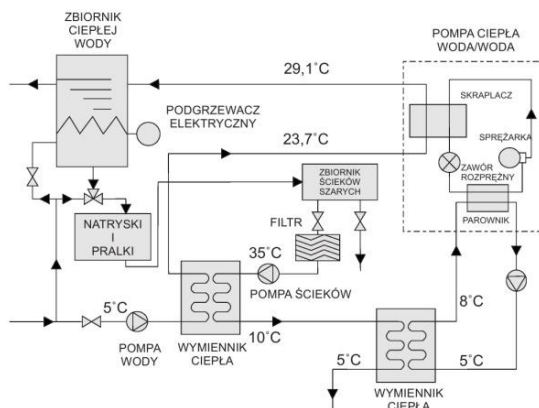
W związku ze stratami ciepła w instalacjach kanalizacyjnych można założyć, że średnia temperatura ścieków odprowadzanych z urządzeń pralniczych i natrysków, odprowadzanych dalej do zbiornika retencyjnego, wynosi  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  [15].

## 2.2. OPIS WARIANTU I

Zakłada się, że wykorzystywana do użytku jest ciepła woda zgromadzona w zbiorniku. Woda w zbiorniku ścieków szarych ma temperaturę  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Oddaje zdeponowane w nich ciepło w wymienniku ścieki/woda ochładzając się do temperatury  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , a w dalszej kolejności, w parowniku pompy ciepła, do  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jednocześnie woda świeża podgrzewana jest na wymienniku z  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $23,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , a następnie w skraplaczu pompy ciepła do  $29,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ochłodzone w ten sposób ścieki trafiają do sieci kanalizacyjnej i kierowane są do oczyszczalni. Poniżej przedstawiono schemat analizowanego układu odzysku ciepła (rys. 1). W przypadku dużej ilości domieszek w ściekach szarych rekomendowany jest system z wykorzystaniem dodatkowego wymiennika ciepła dla polepszenia warunków eksploatacji (rys. 2). Założono spadek temperatury na dodatkowym wymienniku ciepła, który przyjęto na  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , co jest charakterystyczne dla wymienników ciepła rozpatrywanego typu.



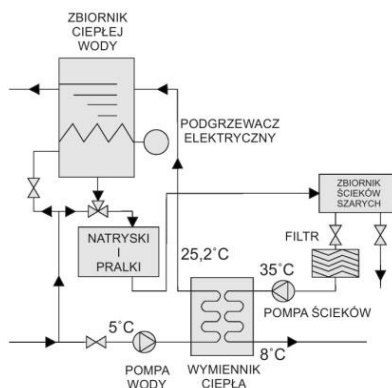
Rys. 1. Schemat systemu odzysku ciepła ze ścieków w celu podgrzewania wody użytkowej w budynku wielorodzinnym z wykorzystaniem wymiennika ciepła i pompy ciepła (wariant I) według [15]



Rys. 2. Schemat systemu odzysku ciepła ze ścieków rekomendowany w przypadku dużej ilości domieszek w ściekach szarych

### 2.3. OPIS WARIANTU II

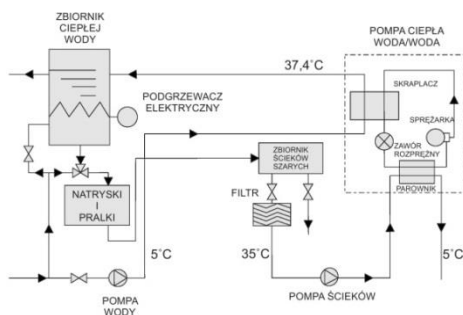
W wariantcie drugim dokonano analizy przy zastosowaniu jedynie wymiennika ciepła ścieki/woda (rys. 3) jako sposobu na odzysk ciepła. Ścieki szare o temperaturze 35 °C oddają zdeponowane w nich ciepło ochładzając się do temperatury 8 °C, co wynika z zasad wymiany ciepła w wymiennikach ciepła. Odzyskane w ten sposób ciepło umożliwia podgrzanie zimnej wody z sieci o temperaturze 5 °C na poziom 25,2 °C. Szare ścieki po przejściu przez wymiennik ciepła odprowadzone są do sieci kanalizacyjnej.



Rys. 3. Schemat systemu odzysku ciepła ze ścieków w celu podgrzewania wody użytkowej w budynku wielorodzinnym z wykorzystaniem wymiennika ciepła (wariant II)

## 2.4. OPIS WARIANTU III

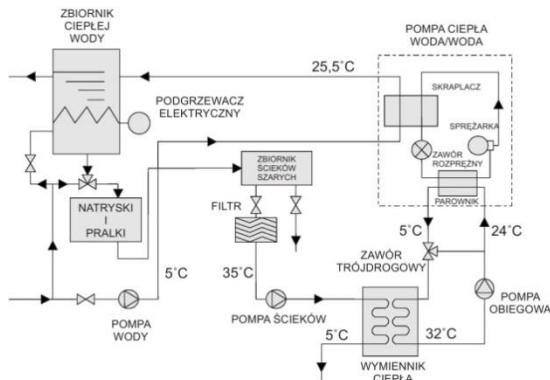
Wariant trzeci polega na zastosowaniu jedynie pompy ciepła odzyskującej ciepło odpadowe ze ścieków szarych. Podgrzewanie świeżej wody z sieci następuje w skraplaczu pompy ciepła (rys. 4). Podczas odprowadzania do kanalizacji ścieków szarych o temperaturze  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  następuje ich schłodzenie w parowniku ścieków pompy ciepła do  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jednocześnie następuje podgrzanie wody świeżej w skraplaczu pompy ciepła z  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $37,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



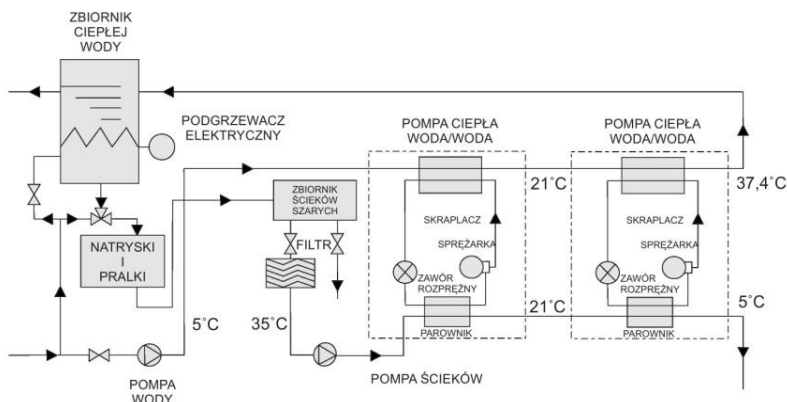
Rys. 4. Schemat systemu odzysku ciepła ze ścieków w celu podgrzewania wody użytkowej w budynku wielorodzinnym z wykorzystaniem pompy ciepła (wariant III)

W informacjach uzyskanych od producentów pomp ciepła, dostępne urządzenia posiadają ograniczony zakres temperatury dolnego nośnika ciepła. Przykładowo pompy ciepła firmy Viessmann posiadają ograniczenie do  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  [8], na co należy zwrócić uwagę i co stanowi warunek przy prowadzeniu analizy. Schemat takiego systemu przedstawiono na rysunku 5. Czynnik w obiegu pośredniczącym przepływa w przeciwnym kierunku w wymienniku parownika pompy ciepła. Wysoka temperatura czynnika w obiegu pośredniczącym w przypadku przeciwnieprądu daje możliwość jej wykorzystania do przegrzania pary czynnika chłodniczego w pompie ciepła, co jest połączone z warunkami eksploatacji sprężarek (rys. 5).

Warunki działania pompy ciepła w analizowanym wariantcie są niekorzystne na skutek dużych różnic temperatur, zarówno po stronie dolnego, jak i górnego źródła ciepła. Pompa ciepła musi ogrzać wodę z  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $37,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ochładzając przy tym ścieki z  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Interesująca może okazać się analiza techniczna i finansowa układu z zastosowaniem dwóch mniejszych pomp ciepła w miejsce jednej większej. Pompa ciepła 1 podgrzewałaby wodę z sieci z  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do temperatury  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , natomiast pompa ciepła 2 podgrzewałaby ją dalej do wymaganej temperatury, co mogłoby znacznie wpłynąć na poprawę współczynników wydajności grzewczych tych urządzeń technicznych. Schemat tego rozwiązania przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Schemat systemu z uwzględnieniem warunków eksploatacyjnych pomp ciepła według zaleceń producentów



Rys. 6. Schemat systemu odzysku ciepła ze ścieków w celu podgrzewania wody użytkowej w budynku wielorodzinnym z wykorzystaniem dwóch pomp ciepła o mniejszej mocy

### 3. OBLICZENIA WARIANTÓW INSTALACJI Z ODZYSKIEM CIEPŁA ZE ŚCIEKÓW SZARYCH

#### 3.1. DANE WYJŚCIOWE

Poniżej przedstawiono analizę techniczną i finansową różnych wariantów układów odzysku ciepła w budynku wielorodzinnym, dokonując wstępnych założeń i bazując na danych wyjściowych, którymi są:

- liczba mieszkańców budynku wielorodzinnego:  $M_1 = 40$  osób,  $M_2 = 200$  osób;
- parametry instalacji ciepłej wody użytkowej zgodnie z normą PN-92/B-01706: temperatura wody zimnej  $T_z = 5$  °C [11], woda podgrzana jest do odpowiedniej temperatury,
- dolne źródło ciepła - ścieki szare o temperaturze  $T_{śc} = 35$  °C [15];
- górne źródło ciepła - instalacja zasilająca pojemnościowy zasobnik ciepłej wody.

### 3.2. ZAPOTRZEBOWANIE NA MOC CIEPLNĄ DO PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ W BUDYNKU WIELORODZINNYM

Obliczenie zapotrzebowania na moc cieplną do przygotowania ciepłej wody użytkowej w budynku wielorodzinnym wykonano według [10]. Stanowi ona część wspólną dla trzech rozpatrywanych sposobów odzysku ciepła. W obliczeniach uwzględniono 18 godzin na użytkowanie instalacji w przedziale od 6<sup>00</sup> do 24<sup>00</sup>.

W tabeli 1 dokonano zestawienia wyników obliczeń zapotrzebowania na ciepło na cele ciepłej wody użytkowej.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń zapotrzebowania na moc cieplną do przygotowania ciepłej wody użytkowej w budynku wielorodzinnym

Zestawienie wyników zapotrzebowania na ciepło w celu przygotowania ciepłej wody użytkowej		
Liczba mieszkańców [Mk]	40	200
Średnie dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $q_{sr,d}$ [dm <sup>3</sup> /d]	4800	24000
Średnie godzinowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $q_{sr,h}$ [dm <sup>3</sup> /h]	266,7	1333,3
Średnia moc układu ciepłej wody użytkowej $Q_{sr,h}$ [kW]	13,84	68,96
Maksymalne godzinowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $q_{max,h}$ [dm <sup>3</sup> /h]	1010,79	3413,32
Maksymalna moc układu ciepłej wody użytkowej $Q_{max,h}$ [kW]	52,37	176,80
Objętość zasobnika ciepłej wody użytkowej $V_z$ [dm <sup>3</sup> ]	625	2205
Typ zasobnika ciepłej wody użytkowej	Vitocell 100-L o pojemności 750 l z grzałką elektryczną [8]	3 x Vitocell 100-L o pojemności 750 l z grzałką elektryczną [8]
Współczynnik redukcji $\psi$ [-]	0,54	0,68
Zredukowana moc układu do przygotowania ciepłej wody $Q_z$ [kW]	31,78	135,08

### 3.3. STRUMIEŃ PRZEPLYWU ŚCIEKÓW SZARYCH W BUDYNKU WIELORODZINNYM

W obliczeniach przyjęto dane przedstawione w [6], z których wynika, że na potrzeby kąpieli pod prysznicem zużywane jest w Polsce około  $40 \text{ dm}^3/(\text{Mk}\cdot\text{d})$  wody i są to dane uśrednione. W rzeczywistości na wartość tą wpływa wiele czynników, a głównymi są: region, cena wody, przyzwyczajenia mieszkańców, rodzaj stosowanej słuchawki prysznicowej czy stosowane ograniczniki wypływu wody, i zużycie to może się różnić w poszczególnych mieszkaniach. W obliczeniach uwzględniono czas użytkowania instalacji w godzinach od  $6^{00}$  do  $10^{00}$  i  $18^{00}$  do  $24^{00}$ , co stanowi 10 godzin dziennie.

Przyjęto założenie, że dziennie wykonywane będą 4 prania po dwa wsady w obiekcie 40 osobowym i 20 prań po dwa wsady w obiekcie 200 osobowym (Mk). Dla potrzeb obliczeń założono dane z [16], które zakładają że pralka przy wypełnieniu 80% zużywa średnio podczas jednego prania  $50 \text{ dm}^3$  wody.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń przepływu ścieków w budynku wielorodzinnym

Strumień objętości ścieków szarych		
Liczba mieszkańców [Mk]	40	200
Średni dobowy przepływ obliczeniowy ścieków szarych z pryszniców $q_{sr,d} [\text{dm}^3/\text{d}]$	1600	8000
Średni dobowy przepływ obliczeniowy ścieków szarych z pralek $q_{sr,d} [\text{dm}^3/\text{d}]$	400	2000
Średni godzinowy przepływ ścieków szarych $q_{sr,h} [\text{dm}^3/\text{h}]$	200	1000

### 3.4. DOBÓR WYMIENNIKA CIEPŁA

Obliczenia i dobór wymiennika ciepła ścieki/woda dokonano wykorzystując program obliczeniowy wymienników ciepła firmy Danfoss „Danfoss Hexact 1.5.7” [12], zgodnie z zaleceniami producenta. Dla powyższych parametrów strumieni przepływu wody z sieci (tab. 1) i ścieków szarych (tab. 2) oraz temperatur obu mediów dobrano wymienniki płytowe skręcane XG10-1-60 oraz XG20H-1-70 firmy Danfoss, w zależności od liczby użytkowników instalacji, a uzyskane wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3. Aby zwiększyć wydajność odzysku ciepła ze ścieków w wariantcie II przyjęto, że ścieki szare ochładzać się będą na wymienniku płytowym nie do  $10^\circ\text{C}$ , jak w przypadku wariantu I, a do  $8^\circ\text{C}$ .

### 3.5. DOBÓR POMPY CIEPŁA WODA/WODA WSPÓŁPRACUJĄCEJ ZE ŚCIEKAMI

Moc grzejną pompy ciepła  $Q_{pc}$  obliczono ze wzoru [3]:



$$Q_{pc} = \frac{24}{24-t_z} \cdot Q_z \quad (1)$$

gdzie:

$Q_z$  – obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną do przygotowania c.w.u., kW;

$t_z$  – czas wykorzystania zasobnika (postój pompy ciepła), przyjęto  $t_z = 9$  h.

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń do doboru wymiennika ciepła

Typ	Wymiennik ciepła XG10-1-60				Wymiennik ciepła XG20H-1-70			
Liczba mieszkań-ców	40				200			
Wariant obliczeń	I		II		I		II	
Obliczone parametry	Strona wody siec.	Strona ścieków szarych	Strona wody siec.	Strona ścieków szarych	Strona wody siec.	Strona ścieków szarych	Strona wody siec.	Strona ścieków szarych
Temperatura na wlocie [°C]	5	35	5	35	5	35	5	35
Temperatura na wylocie [°C]	23,6	10	25,1	8	23,7	10	25,2	8
Strumień masy [kg/h]	266,07	198,57	266,04	198,47	1328,55	994,02	1328,38	993,57
Strumień objętości [dm <sup>3</sup> /min]	4,43	3,33	4,43	3,33	22,13	16,65	22,13	16,65
Moc cieplna [kW]	5,77		6,23		28,87		31,18	
LMTD [K]	7,76		5,77		7,74		5,76	
Strumień cieplny [kW/m <sup>2</sup> ]	3,682		3,977		2,908		3,140	

Moc cieplną  $Q_d$ , którą należy pozyskać ze źródła niskotemperaturowego obliczono ze wzoru [13]:

$$Q_d = Q_{pc} \cdot \frac{\varphi-1}{\varphi} \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{pc}$  – moc grzejna pompy ciepła (moc oddawana na skraplaczu), kW;

$\varphi$  – współczynnik wydajności grzejnej pompy ciepła na podstawie obiegu Carnota (bez uwzględnienia charakterystyki silnika), który wyznacza się ze wzoru (3):

$$\varphi = COP_c \cdot \eta_{pc} \quad (3)$$

gdzie:

$COP_c$  – wydajność pompy ciepła obiegu Carnota, -;

$\eta_{pc}$  – stopień doskonałości rzeczywistego obiegu pompy ciepła, który przyjęto o  $\eta_{pc} = 0,5$  [9, 13].

Natomiast wydajność pompy ciepła można ustalić ze wzoru (4):

$$COP_c = \frac{T_c}{T_c - T_e} \quad (4)$$

gdzie:

$T_c$  – temperatura skraplania, °C;

$T_e$  – temperatura odparowania, °C.

Określenie mocy dolnego źródła ciepła dla obliczonego strumienia przepływu ścieków szarych, które ustalono jako  $q_{śc} = 200 \text{ dm}^3/\text{h}$  dla budynku wielorodzinnego zamieszkanego przez 40 osób i  $1000 \text{ dm}^3/\text{h}$  dla obiektu przeznaczanego dla 200 osób wyznaczono ze wzoru:

$$Q_d = \frac{q_{srh}}{3600} \cdot c_{śc} \cdot \rho_{śc} \cdot (T_c - T_z) \quad (5)$$

gdzie:

$q_{srh}$  – średni godzinowy przepływ ścieków szarych,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$c_{śc}$  – ciepło właściwe ścieków szarych,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;

$\rho_{śc}$  – gęstość ścieków szarych,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$T_c$  – temperatura na wejściu do parownika, °C;

$T_z$  – temperatura na wyjściu z parownika, °C.

Rzeczywistą moc grzewczą dla obliczonego strumienia ścieków można określić przekształcając wzór (2) w zależność:

$$Q_{pc} = Q_d \cdot \frac{\varphi}{\varphi - 1} \quad (6)$$

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 4 można zauważyć, że przy takich warunkach eksploatacji zastosowanie pompy ciepła (wariant I dla 40 osób) jest nierealne, ponieważ nie produkuje się pomp ciepła woda/woda o tak małej wydajności. Dobrany płytowy wymiennik ciepła odbiera całe ciepło ze ścieków szarych. Pompa ciepła jest wobec powyższych obliczeń niepotrzebna dla tak małego przepływu ścieków szarych.

Przekształcając wzór (5) można obliczyć wymagany strumień objętości ścieków w celu całkowitego pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową:

$$q_{sr\ h} = \frac{Q_d}{c_{śc} \cdot \rho_{śc} \cdot (T_c - T_z)} \cdot 3600 \quad (7)$$

Wyniki obliczeń doboru pomp ciepła dla poszczególnych wariantów zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie wyników obliczeń doboru pomp ciepła zgodnie z [13]

Zestawienie obliczeń doboru pompy ciepła				
Liczba mieszkańców [Mk]	40		200	
Wariant obliczeniowy	I	III	I	III
Obliczeniowa moc grzewcza pompy ciepła [kW]	29,71	50,85	125,92	216,13
Obliczeniowy współczynnik wydajności grzewczej $\varphi$ [kW]	3,26			
Obliczeniowa moc dolnego źródła $Q_d$ [kW]	20,60	35,25	87,29	149,83
Wymagane natężenia przepływów ścieków [m <sup>3</sup> /h]	3,56	1,02	15,07	4,32
Rzeczywista moc dolnego źródła dla przepływu ścieków szarych $Q_d$ [kW]	1,16	6,93	5,79	34,64
Rzeczywista moc grzewcza pompy ciepła dla przepływu ścieków szarych $Q_{pc}$ [kW]	1,67	10,00	8,35	49,97
Rzeczywista temperatura do jakiej możliwe jest podgrzanie c.w.u. $T_c$ [°C]	29,0	37,3	29,1	37,4
Rzeczywisty współczynnik efektywności grzewczej na podstawie obiegu Carnota $\varphi$	6,29	4,80	6,27	4,79

Z danych zamieszczonych w tabeli 4, strumienie ścieków rzędu 3,56 m<sup>3</sup>/h i 1,0 m<sup>3</sup>/h - w przypadku obiektu zamieszkanego przez 40 osób oraz dla 15,07 m<sup>3</sup>/h i 4,32 m<sup>3</sup>/h - w obiekcie przeznaczonym dla 200 osób, nie są możliwe do uzyskania w analizowanych budynkach wielorodzinnych. Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie ścieków z kilku budynków jako źródła niskotemperaturowego dla potrzeb pompy ciepła zainstalowanej w jednym z nich. W innym przypadku pompa ciepła pokryje zapotrzebowanie na ciepłą wodę tylko w ograniczonym stopniu, które można ustalić z wzoru:

$$Q_{pc} = \frac{q_{sr\ h}}{3600} \cdot c_w \cdot \rho \cdot (T_c - T_z) \quad (8)$$

gdzie:

$q_{sr\ h}$  – średni godzinowy przepływ zimnej wody, dm<sup>3</sup>/h;

$c_w$  – ciepło właściwe wody, kJ/(kg·K);

$\rho$  – gęstość wody, kg/m<sup>3</sup>;

$T_c$  – temperatura na wyjściu ze skraplacza, °C;

$T_z$  – temperatura na wejściu do skraplacza, °C.

Przekształcenie wzoru (8) pozwala określić temperaturę do jakiej możliwe jest podgrzanie zimnej wody sieciowej przy obliczonych parametrach strumienia ścieków:

$$T_c = \frac{Q_{pc}}{\frac{q_{sr,h}}{3600} \cdot c_w \cdot \rho} + T_z \quad (9)$$

Rzeczywiste współczynniki wydajności grzewczej  $\varphi$  obliczono ze wzorów (3) i (4).

#### 4. OCENA EFEKTYWNOŚCI FINANSOWEJ INWESTYCJI

W celu oceny efektywności finansowej zastosowania omówionych wariantów odzysku ciepła ze ścieków przeprowadzono analizę finansową zgodnie z metodą z [15]. W tabeli 5 zestawiono wyniki obliczeń zapotrzebowania na ciepło dla celów przygotowania ciepłej wody użytkowej, przy wykorzystaniu odzysku ciepła ze ścieków szarych.

Tabela 5. Zestawienie wyników zapotrzebowania na ciepło dla celów przygotowania ciepłej wody użytkowej dla budynku wielorodzinnego przy wykorzystaniu odzysku ciepła ze ścieków

Liczba mieszkańców [Mk]	40		200		
Wariant	II	III	I	II	III
Średnie dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $q_{sr,d}$ [dm <sup>3</sup> /d]	4800		24000		
Średnie godzinowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $q_{sr,h}$ [dm <sup>3</sup> /h]	266,7		1333,33		
Średnia moc układu ciepłej wody użytkowej $Q_{sr,h}$ [kW]	7,63	3,89	32,00	38,01	19,25
Maksymalne godzinowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $q_{max,h}$ [dm <sup>3</sup> /h]	1010,79		3413,32		
Maksymalna moc układu ciepłej wody użytkowej $Q_{max,h}$ [kW]	28,85	14,70	81,83	97,2	49,24
Objętość zasobnika ciepłej wody użytkowej $V_z$ [dm <sup>3</sup> ]	625		2205		
Typ zasobnika ciepłej wody użytkowej	Vitocell 100-L o pojemności 750 l z grzałką elektryczną [8]		3 x Vitocell 100-L o pojemności 750 l z grzałką elektryczną [8]		
Współczynnik redukcji $\psi$ [-]	0,54		0,68		
Zredukowana moc układu do przygotowania ciepłej wody $Q_z$ [kW]	17,50	8,92	62,52	74,27	37,62

Z przedstawionych powyżej wyników obliczeń wynika, że dzięki zainstalowaniu systemu do odzysku ciepła ze ścieków szarych możliwe jest znaczne obniżenie zredu-

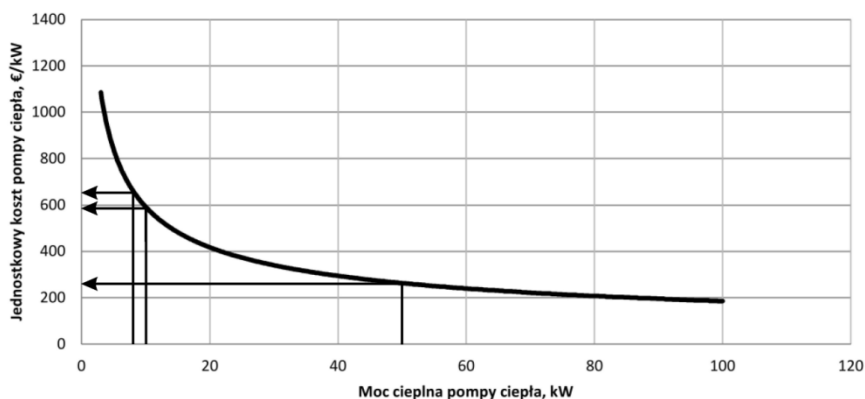
kowej mocy układu do podgrzewania ciepłej wody. W tabeli 6 przedstawiono porównanie mocy układów bez i z systemem odzysku ciepła.

Tabela 6. Porównanie mocy układów do przygotowywania ciepłej wody użytkowej

Liczba mieszkańców [Mk]	40		200		
	II	III	I	II	III
Wariant					
Zredukowana moc układu do przygotowania ciepłej wody bez odzysku ciepła $Q_z$ [kW]	31,78		135,08		
Zredukowana moc układu do przygotowania ciepłej wody z odzyskiem ciepła $Q_z$ [kW]	17,50	8,92	62,52	74,27	37,62
Obniżka mocy [kW]	14,28	22,86	72,56	60,81	97,46

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 6 można zauważyć, że największa obniżka mocy do przygotowywania ciepłej wody użytkowej występuje w przypadku zastosowania wariantu III instalacji odzysku ciepła ze ścieków szarych czyli pompy ciepła.

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy wykres jednostkowych kosztów pompy ciepła w zależności od mocy cieplnej urządzenia. Na jego podstawie określono koszty inwestycyjne pomp ciepła.



Rys. 7. Jednostkowy koszt pompy ciepła w zależności od mocy cieplnej urządzenia według [7]

W tabeli 7 zamieszczono koszty poszczególnych elementów układu składających się na całkowite koszty inwestycyjne. Założono, że koszt osprzętu i materiałów dla instalacji wynosi 20% według propozycji [9], armatury kontrolno-pomiarowej i układów sterujących - 40%, natomiast koszt montażu - 60% całkowitych kosztów zakupu środków trwałych wchodzących w skład systemu do odzysku ciepła, według własnych opracowań materiałów [14]. Przyjęto, że koszt filtra ścieków szarych wynosi 1000 zł. W informacjach uzyskanych w firmach budowlanych i biurach projektowych koszt prac budowlanych, ziemnych i architektonicznych wynosi 30%, koszt

nadzoru robót i konsultacji 40% całkowitych kosztów zakupu środków trwałych, natomiast koszt projektu wynosi orientacyjnie 50000 zł - w budynku zamieszkanym przez 40 osób i 250000 zł - w budynku przeznaczonym dla 200 osób ze względu na indywidualność. Założono również koszty uruchomienia i wydatków nieprzewidywanych, kolejno 12% i 20% całkowitych nakładów inwestycyjnych według propozycji [14].

Tabela 7. Zestawienie kosztów inwestycyjnych systemów odzysku ciepła

Liczba mieszkańców [Mk]	40		200		
Wariant	II	III	I	II	III
Płytowy wymiennik ciepła [zł]	4750,08 [3]	-	14800,41 [3]	14800,41 [3]	-
Pompa ciepła [zł]	-	24810,94	21770,55	-	52954,53
Pompa ścieków szarych MAGNA3 [zł]	4575,78 [2]				
Zasobnik ciepłej wody użytkowej z podgrzewaczem elektrycznym [zł]	17264 [8]		51792 [8]		
Filtr [zł]	1000				
Zbiornik akumulacyjny ścieków szarych [zł]	1200 [4]		3333 [4]		
Koszt osprzętu i materiałów dla instalacji układu odzysku ciepła [zł]	5757,97	9770,14	19454,35	15100,24	22731,06
Koszt montażu urządzeń [zł]	17273,92	29310,43	58363,04	45300,71	68193,19
Aparatura kontrolno-pomiarowa i układy sterujące [zł]	11515,94	19540,29	38908,70	30200,48	45462,12
Prace budowlane, ziemne i architektoniczne [zł]	8636,96	14655,22	29181,52	22650,36	34096,59
Koszty nadzoru robót i konsultacji [zł]	11515,94	19540,29	38908,70	30200,48	45462,12
Koszty projektu [zł]	50000	50000	250000	250000	250000
Koszty uruchomienia [zł]	13618,87	23000,05	63850,57	56274,42	63552,05
Wydatki nieprzewidywane [zł]	22698,12	38333,42	106417,61	93790,69	105920,08
Koszt sumaryczny $\Sigma$ [zł]	169807,58	253000,56	702356,23	619018,57	699072,52

Pobór mocy elektrycznej przez pompę ścieków szarych wynosi 27,4 - w budynku zamieszkanym przez 40 osób i 32,3 W - w budynku przeznaczonym dla 200 osób. Realizacja analizowanego przedsięwzięcia zapewni oszczędności wynikające ze zmniejszenia zapotrzebowania na energię w celu przygotowania ciepłej wody użytkowej, a co za tym idzie nastąpi zredukowanie opłat za pobór energii elektrycznej.

Czas eksploatacji opisanego systemu, który odpowiada czasowi bezawaryjnej pracy sprężarek pomp ciepła przyjęto na 25 lat, zgodnie z zaleceniami producentów. Do

obliczeń przyjęto aktualną cenę energii elektrycznej w taryfie G11, która w Rzeszowie wynosi 0,59 zł/kWh [5]. Natomiast obliczenia wartości zaktualizowanej netto przedsięwzięcia przeprowadzono przy założeniu wartości stopy dyskontowej na poziomie 8%. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Zestawienie wyników analizy efektywności finansowej analizowanej inwestycji

Liczba mieszkańców [Mk]	40		200		
Wariant	II	III	I	II	III
Koszt energii elektrycznej zużytej przez system odzysku ciepła [zł/rok]	59,01	4544,75	2933,71	69,56	22530,56
Koszt odzyskanego ciepła [zł/rok]	30751,98	49229,01	156257,96	130954,34	209880,11
Zaoszczędzona kwota [zł/rok]	30692,97	44684,26	153324,25	130884,78	187349,55
NPV [zł]	157833,01	223993,91	934345,82	778147,16	1300842,00
IRR [%]	17,77	17,34	121,25	133,35	126,80
Prosty okres zwrotu inwestycji [lata]	5,53	5,66	4,58	4,73	3,73

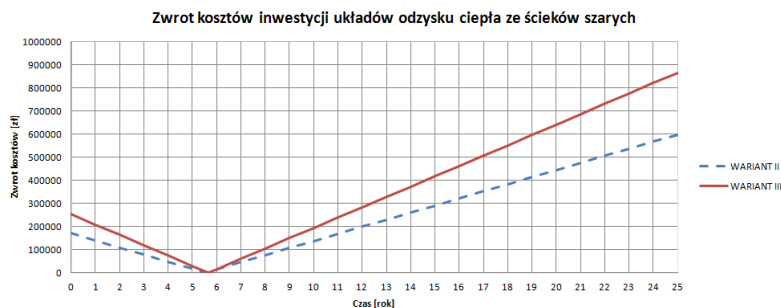
Wartość zaktualizowana netto analizowanego wariantu NPV, wewnętrzna stopa zwrotu IRR oraz prosty okres zwrotu wyznaczono na podstawie [15], przy założonej wartości stopy dyskontowej  $r = 8\%$ . Otrzymane wyniki obliczeń wykazały, że prognozowane zdyskontowane wpływy z realizacji projektu przewyższają swą wartością nakłady inwestycyjne. Potwierdza to finansową zasadność realizacji inwestycji. Również otrzymane wartości IRR świadczą o tym, że inwestycja powinna zostać zrealizowana, gdyż przewyższa ona przyjętą do obliczeń stopę dyskontową.

Okres zwrotu inwestycji dla rozpatrywanych wariantów systemów odzysku ciepła jest stosunkowo szybki i wynosi on poniżej 6 lat - w budynku zamieszkanym przez 40 osób (rys. 8) i 5 lat - w budynku przeznaczonym dla 200 osób (rys. 9). Jednak wariant III, polegający na zastosowaniu pompy ciepła, pozwala po kolejnych 6 latach zaoszczędzić o 39% większą kwotę w stosunku do wariantu II - w budynku zamieszkanym przez 40 osób, natomiast w obiekcie przeznaczonym dla 200 osób - kwotę większą o 16% w stosunku do wariantu I i o 43% w porównaniu do wariantu II.

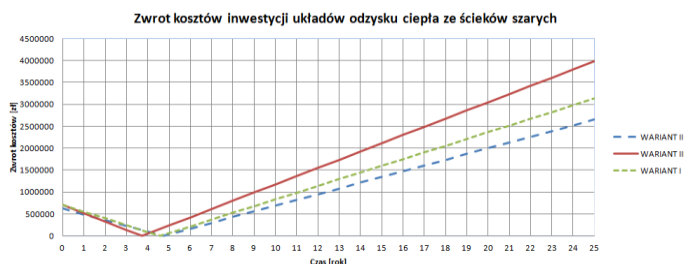
## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Układ odzysku ciepła z wymiennikiem płytowym, pompą ciepła jak również z dwoma tymi urządzeniami jednocześnie, to inwestycja, w której finansowanie i zwrot poniesionych kosztów na termomodernizację instalacji następuje ze środków uzyskanych z ciepła odzyskanego ze ścieków. Zastosowanie systemów odzysku ciepła w obiektach wielorodzinnych może nie pokryje całkowitego zapotrzebowania na cie-

płą wodę użytkową, ale przyniesie znaczne oszczędności w zakresie podgrzewania wody wodociągowej przy wykorzystaniu ciepła odpadowego. Należy podkreślić, że płytowy wymiennik ciepła jest stosunkowo tani i prosty w montażu, i może przynieść znaczne oszczędności energii.



Rys. 8. Zwrot kosztów inwestycji układów odzysku ciepła w budynku wielorodzinnym o liczbie mieszkańców 40 osób



Rys. 9. Zwrot kosztów inwestycji układów odzysku ciepła w budynku wielorodzinnym o liczbie mieszkańców 200 osób

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki obliczeń efektywności finansowej zastosowania systemu odzysku ciepła w budynkach wielorodzinnych uzasadniają celowość ich użycia w celu redukcji ilości zużywanej energii. Czas zwrotu inwestycji w instalację odzysku ciepła ze ścieków jest bardzo krótki, bowiem wynosi on mniej niż 6 lat funkcjonowania układu. Najszybciej zwrócą się koszty zastosowania pompy ciepła w budynku przeznaczonym dla 200 osób, bo już po 3 latach i 9 miesiącach. Wykazano, że najbardziej efektywny pod względem energetycznym i ekonomicznym jest wariant III, w którym zastosowano samą pompę ciepła. Porównując ustalone dane należy zaznaczyć, że im większy jest strumień objętościowy ścieków szarych, tym system odzysku ciepła działa efektywniej.

Odzysk ciepła ze ścieków szarych przy użyciu pompy ciepła jest technicznie możliwy i ma sens głównie tam, gdzie usuwane są odpowiednio duże strumienie tych ścieków. Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie ścieków z kilku bu-



dynków jako źródła niskotemperaturowego dla potrzeb pompy ciepła zainstalowanej w jednym z nich.

#### LITERATURA

- [1] BOROWIECKI M, KOLASZEWSKI A, WIĘCEK K., *Odzysk ciepła ze ścieków w pralniach przemysłowych*, Rynek Instalacyjny, 2012, Nr. 10, 80-83.
- [2] *Cennik pomp firmy Grundfos*, 2013, [www.pl.grundfos.com](http://www.pl.grundfos.com).
- [3] *Cennik wymienników ciepła firmy Danfoss*, 2013, <http://www.danfoss.com/poland>.
- [4] *Cennik zbiorników akumulacyjnych*, [www.bojlery.pl](http://www.bojlery.pl).
- [5] *Ceny prądu w Polsce* [dostęp 17 listopada 2013]. Dostępny w Internecie: <http://zaklad.energetyczny.w.interia.pl>.
- [6] CHUDZICKI J., SOSNOWSKI S., *Instalacje wodociągowe: projektowanie, wykonanie, eksploatacja*, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki”, Warszawa 2011.
- [7] GROCHAL B. J., *Pompy ciepła małe i duże, racjonalizacja użytkowania energii* [dostęp 17 listopada 2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.ozewortal.pl>.
- [8] *Katalog firmy Viessmann*, [www.viessmann.pl](http://www.viessmann.pl).
- [9] KUSTO Z., *Uwarunkowania ekonomicznej efektywności pomp ciepła*, IMP PAN, Gdańsk 2006.
- [10] PISAREV V., *Projektowanie instalacji grzewczych z pompami ciepła*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [11] PN-92/B-01706: *Instalacje wodociągowe – wymagania w projektowaniu*.
- [12] Program Danfoss Hexact (1.5.7b) do doboru wymienników ciepła firmy Danfoss, wersja elektryczna.
- [13] RUBIK M., *Pompy ciepła. Poradnik*, Ośrodek Informacji: „Technika instalacyjna w budownictwie” Warszawa 2000.
- [14] SKOREK J., *Ocena efektywności energetycznej i ekonomicznej gazowych układów ko generacyjnych małej mocy*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [15] SŁYŚ D., KORDANA S., *Odzysk ciepła odpadowego w instalacjach i systemach kanalizacyjnych*, Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”, Krosno 2013.
- [16] *Water saving products. Water efficient washing machines* [dostęp 17 listopada 2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.which.co.uk>.

#### TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE WASTEWATER HEAT RECOVERY SYSTEM IN A APARTMENT BUILDING

This thesis contains issues related to the applying heat recovery systems with greywater in multifamily buildings. The author presented the principle of a heat recovery system using the heat pump, heat exchanger and also both devices simultaneously. A comparison of the discussed systems with others, without the use of heat recovery, together with the underlying financial and technical analysis of their application has been done.