Agnieszka STEC¹
Sabina KORDANA²

ANALIZA *LIFE CYCLE COST* SYSTEMÓW UMÓŻLIWIAJĄCYCH OGRANICZENIE ZUŻYCIA WODY I ENERGII CIEPLNEJ W BUDYNKU JEDNORODZINNYM

Rozwój gospodarczy i postępująca urbanizacja przyczynia się do degradacji środowiska naturalnego i wyczerpywania się jego zasobów. Powoduje to potrzebę poszukiwania alternatywnych źródeł wody i energii. W związku z tym przeprowadzono badania, których celem była ocena opłacalności zastosowania różnych technologii umożliwiających zredukowanie zużycia wody z sieci wodociągowej oraz gazu ziemnego wykorzystywanego do jej podgrzewania. Analizie poddano rozwiązania instalacji uwzględniające odzysk ciepła ze ścieków za pomocą wymiennika ciepła DWHR oraz wykorzystanie ścieków szarych i wody deszczowej do spłukiwania toalet i podlewania ogrodu. W badaniach zastosowano metodologię *Life Cycle Cost*, która uwzględnia nie tylko początkowe nakłady inwestycyjne, ale również koszty eksploatacyjne ponoszone w całym okresie funkcjonowania systemu. W obliczeniach uwzględniono coroczny wzrost jednostkowych cen zakupu gazu ziemnego i wody, a także zmianę wartości pieniądza w czasie. Przeprowadzona analiza wykazała znaczny wpływ przyjętego czasu eksploatacji instalacji na otrzymane wyniki badań.

Słowa kluczowe: analiza finansowa, odzysk ciepła ze ścieków, recykling ścieków szarych, wykorzystanie wody deszczowej

1. Wprowadzenie

Zaspokojenie potrzeb higieniczno-sanitarnych człowieka nie byłoby możliwe bez stałego dostępu do wody oraz nośników energii wykorzystywanych do jej podgrzewania. Rozwojowi gospodarczemu świata, w tym także i Polski, towarzyszy ciągły wzrost zapotrzebowania na te cenne zasoby, jednakże nie

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Agnieszka Stec, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651071, e-mail: stec_aga@prz.edu.pl

² Sabina Kordana, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651071, e-mail: sk@prz.edu.pl

idzie on w parze ze zwiększaniem ich ilości dostępnej do eksploatacji. Przykładowo zasoby wodne naszego kraju szacowane są na poziomie $1600 \text{ m}^3/(\text{M}\cdot\text{rok})$ i oceniane jako jedne z najniższych w Europie [19]. Choć problem niedoboru wody nie jest tu jeszcze odczuwalny, prognozowane zmiany klimatu [47] mogą przyczynić się do obniżenia wartości wskaźnika dostępności wody w nadchodzących latach, co w konsekwencji doprowadzi do pogorszenia jakości życia przyszłych pokoleń. Również zasoby kopalnych surowców energetycznych nie pozostają niewyczerpane. Z danych zawartych w pracy [33] wynika, iż w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat uległy one znacznemu zredukowaniu, a z każdym kolejnym rokiem ich dostępność się zmniejsza. Wynika z tego potrzeba wprowadzania technologii proekologicznych, których założeniem jest ograniczenie ilości zużywanej wody oraz energii, we wszystkich sektorach gospodarki, w tym w sektorze budownictwa mieszkaniowego, który jest jednym z największych konsumentów tych dóbr.

Jednym ze sposobów, który może wpływać na ograniczenie zużycia zasobów wodnych, jest gospodarcze wykorzystanie wód opadowych. Systemy gromadzące i wykorzystujące wody opadowe (RWHS) stosowane są w wielu krajach. W zależności lokalizacji, warunków klimatycznych, rodzaju budynku, w którym zainstalowany jest ten system, oszczędność w zapotrzebowaniu na wodę wodociągową osiąga różny poziom. Systemy gospodarczego wykorzystania wody deszczowej postrzegane są przez badaczy jako jedna ze strategii umożliwiających dostosowanie się sektora gospodarki wodnej do zmieniającego się klimatu [32,38,40].

Woda deszczowa nie może być stosowana do celów spożywczych ani higienicznych. Na świecie znaleźć można jednak przykłady instalacji, w których z powodzeniem zastępuje ona wodę wodociągową zużywaną do spłukiwania toalet, mycia samochodów, prania, irygacji terenów uprawnych czy nawadniania terenów zielonych [6,12,16,21,23,30,49]. Najczęściej woda deszczowa wykorzystywana jest do spłukiwania toalet w budynkach mieszkalnych [11,13-15]. Jednak instalacje tego typu znajdują również zastosowanie w dużych obiektach sportowych [53], w obiektach uniwersyteckich [2], w supermarketach [4] i budynkach biurowych [50].

W Polsce systemy gospodarczego wykorzystania wód opadowych są stosowane rzadko. Wyniki przeprowadzonych analiz nad możliwością zastosowania tych systemów w budynkach mieszkalnych przedstawiono m.in. w publikacjach [41,44].

Innym sposobem ograniczania zużycia wody przeznaczonej do spożycia, a w związku z tym i opłat ponoszonych za jej dostarczenie oraz za odprowadzanie ścieków, jest wykorzystanie ścieków szarych. Zgodnie z definicją przedstawioną w normie PN-EN 12056-1 [46], ścieki szare, w przeciwieństwie do ścieków czarnych, pozbawione są fekaliów i moczu. Odprowadzane są one każdego dnia z takich urządzeń sanitarnych, jak prysznice, umywalki, pralki czy zlewo-

zmywaki, a ich skład różni się zasadniczo od składu ścieków pochodzących ze splukiwania misek ustępowych, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Rozdział procentowy jednostkowego ładunku zanieczyszczeń (na podstawie [45])

Table 1. The percentage share of unit load of pollutants (based on [45])

Rodzaj zanieczyszczenia	Udział procentowy w poszczególnych rodzajach ścieków		
	Ścieki szare	Mocz	Kał
N	3%	87%	10%
P	10%	50%	40%
K	34%	54%	12%
ChZT	41%	12%	47%

Z przedstawionych w tabeli 1 danych dotyczących ilości zanieczyszczeń obecnych w różnych rodzajach ścieków wynika jednoznacznie, iż udział substancji odżywczych w ściekach szarych jest zdecydowanie mniejszy niż w medium określanym mianem ścieków czarnych. Charakteryzuje je jednak znaczna zawartość związków organicznych, co wymusza na potencjalnych eksploatacach instalacji wykorzystania ścieków szarych zastosowanie układów do ich podczyszczania. Dodatkowo stężenie poszczególnych substancji zanieczyszczających ścieki szare warunkowane jest tym, gdzie powstają [8]. Charakterystykę ścieków pochodzących z różnych źródeł przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyka ścieków szarych pochodzących z różnych źródeł (na podstawie [8])

Table 2. The characteristic of gray water from different sources (based on [8])

Rodzaj zanieczyszczenia	Stężenie zanieczyszczenia w ściekach szarych, mg/dm ³			
	Ścieki pochodzące z łazienki	Ścieki pochodzące z prania	Ścieki pochodzące z kuchni	Ścieki szare ogółem
zawiesina ogólna	7–207	120–280	235–720	15–112
BZT	26–300	48–380	47–1460	41–500
ChZT	100–633	725–1815	644–1380	283–549
N	3,6–17	6–21	40–74	0,6–11
P	0,1–>49	0,1–>101	68–74	0,6–>68

Stężenie zanieczyszczeń obecnych w ściekach szarych odprowadzanych z poszczególnych urządzeń sanitarnych może zmieniać się w szerokim zakresie [8], jednakże za najbardziej zanieczyszczone uznać można medium pochodzące z kuchni. Zawiera ono często oleje oraz inne niekorzystne substancje, których obecność w ściekach szarych dyskwalifikuje ich zastosowanie do splukiwania misek ustępowych czy podlewania ogrodu, co powoduje, iż zazwyczaj nie są one wykorzystywane [7]. Ścieki powstające podczas prania ubrań zawierają z kolei znaczne ilości detergentów oraz wybielaczy, a niekiedy także rozpuszczalniki, oleje i farby [7], i choć prowadzone są badania nad ich wykorzystaniem

[28,29], wciąż może ono budzić sporo kontrowersji, zwłaszcza że w ściekach odprowadzanych z pralni mogą być także obecne patogeny układu pokarmowego [36].

Z tego względu wewnętrzne systemy wykorzystania ścieków szarych projektowane są najczęściej na przepływ wynikający z ilości ścieków odprowadzanych z pryszniców, wanien oraz umywalk. Przykład takiej instalacji opisano między innymi w pracy [10]. Powstające w łazienkach ścieki szare mogą co prawda zawierać mydło, szampony, środki czystości czy włosy [35], a w przypadku gdy w gospodarstwie domowym obecne są dzieci bądź osoby starsze także śladowe ilości substancji fekalnych [37], jednakże całkowite stężenie zanieczyszczeń jest w nich stosunkowo niewielkie w porównaniu ze ściekami odprowadzanymi z innych urządzeń sanitarnych, co pozwala na ich powtórne wykorzystanie po podstawowym procesie podczyszczania.

Systemy podczyszczania ścieków szarych, których działanie opiera się na procesach fizyko-chemicznych, bazują najczęściej na filtracji oraz dezynfekcji. Niekiedy wykorzystywane są też układy przeznaczone do biologicznego oczyszczania ścieków odprowadzanych z poszczególnych urządzeń sanitarnych. W tym drugim przypadku zastosowanie znajdują przede wszystkim systemy działające na zasadzie membrany [1].

Podczyszczone ścieki szare pochodzące z gospodarstw domowych wykorzystywane są najczęściej do spłukiwania misek ustępowych oraz nawadniania ogrodu [48]. W obu sytuacjach eksploatacji tego typu systemów mogą napotkać na szereg trudności [22,31], jednakże w przypadku prawidłowego zaprojektowania i użytkowania instalacji wykorzystania ścieków szarych ryzyko wystąpienia problemów może zostać ograniczone do minimum. Dowodem słuszności tej tezy są doświadczenia z eksploatacji systemów recyklingu ścieków szarych funkcjonujących w różnych obiektach na całym świecie, czego przykłady opisane zostały w pracach [18, 27, 34].

Innym sposobem zagospodarowania ścieków szarych jest odzysk niesionego przez te ścieki ciepła [25,43]. W przypadku większych obiektów wykorzystywane są w tym celu pompy ciepła [20,26] lub wymienniki ciepła Drain Water Heat Recovery (DWHR) [51], które są z powodzeniem stosowane także w budynkach jednorodzinnych [24]. W zależności od konstrukcji, urządzenia te mogą zostać zamontowane bądź na odpływie ścieków szarych do sieci kanalizacyjnej bądź bezpośrednio przy przyborze sanitarnym, jakim najczęściej jest prysznic. Wybór konkretnego rozwiązania wymiennika ciepła oraz sposobu prowadzenia połączonych z nim przewodów instalacji wodno-kanalizacyjnej jest bardzo istotny z punktu widzenia eksploatatora systemu, gdyż może posiadać decydujący wpływ na efektywność odzysku ciepła ze ścieków szarych w kolejnych latach użytkowania instalacji, a w związku z tym także na opłacalność przedsięwzięcia [42].

Budowa oraz zasada działania różnych typów wymienników ciepła DWHR zostały szczegółowo omówione w pracy [43].

Zastosowanie opisanych technologii może przyczynić się w znacznym stopniu do ograniczenia zużycia wody i energii w instalacjach wewnętrznych budynków mieszkalnych, a w konsekwencji także do zredukowania opłat ponoszonych za zaopatrzenie budynku w wodę i za odprowadzanie ścieków, a w przypadku gdy ciepła woda użytkowa podgrzewana jest za pomocą urządzenia gazowego także za gaz ziemny. Nie ulega jednak wątpliwości, iż znaczna wysokość nakładów inwestycyjnych zniechęca potencjalnych eksploatorów scharakteryzowanych systemów. Z tego względu autorzy artykułu przeprowadzili niezależną analizę opłacalności zastosowania poszczególnych technologii, która uwzględniła zarówno wysokość nakładów inwestycyjnych, jak i kosztów eksploatacji opisanych systemów w całym cyklu ich życia.

2. Metodyka badań

W celu określenia opłacalności zastosowania analizowanych wariantów instalacji w budynku jednorodzinnym wykorzystano metodologię *Life Cycle Cost* (*LCC*). Jest to metoda wyznaczania kosztów, jako tzw. kosztów całego życia, która uwzględnia początkowe nakłady inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne ponoszone w okresie funkcjonowania obiektu. Metodologia ta umożliwia porównanie różnych wariantów inwestycyjnych i wybór wariantu najkorzystniejszego pod względem finansowym. Analiza kosztów *LCC* została przeprowadzona z wykorzystaniem zależności (1).

$$LCC = INV + \sum_{t=1}^T (1+r)^{-t} \cdot K_E \quad (1)$$

gdzie: INV – nakłady inwestycyjne, zł,
 K_E – koszty eksploatacyjne, zł,
 T – czas trwania analizy *LCC*,
 r – stała stopa dyskontowa,
 t – kolejny rok użytkowania instalacji.

Idea metodologii *Life Cycle Cost* powstała w Stanach Zjednoczonych Ameryki w latach 60-tych XX wieku. Departament Obrony Stanów Zjednoczonych wprowadził ją do praktyki przy realizacji zamówień publicznych [9].

Obecnie analiza kosztów *LCC* stosowana jest w różnych dziedzinach gospodarki, m.in. w energetyce, przemyśle, transporcie, budownictwie, infrastrukturze czy też technice pompowej. Wykorzystywana jest głównie jako narzędzie w procesie podejmowania decyzji i zarządzania [3,17].

3. Studium przypadku

Badania nad możliwością ograniczania zużycia wody z sieci wodociągowej oraz energii cieplnej wykorzystywanej do jej podgrzewania zostały przeprowadzone dla budynku jednorodzinnego zlokalizowanego w Rzeszowie. Jest to budynek parterowy z poddaszem użytkowym, który zamieszkuje 4 osoby. Budynek wyposażony jest w: prysznic, 2 umywalki, 2 miski ustępowe, pralkę oraz zlewozmywak.

Dobową strukturę zużycia wody w przeliczeniu na jednego mieszkańca w analizowanym obiekcie przedstawiono na rysunku 1. Wielkość zużycia wody dla poszczególnych czynności przyjęto na podstawie danych literaturowych [5].

Rys. 1. Struktura zużycia wody w analizowanym budynku jednorodzinnym (na podstawie [5])

Fig. 1. The structure of using water in analyzed building (based on [5])

Badania przeprowadzono dla różnych wariantów instalacji sanitarnych w budynku jednorodzinnym, w których wykorzystano również alternatywne źródła zasilania budynku w wodę i energię ciepłą. Poszczególne rozwiązania przedstawiono schematycznie na rysunkach. Analizę kosztów *LCC* wykonano dla następujących wariantów:

- wariant 0 – instalacja tradycyjna (rys. 2),

- wariant 1 – instalacja z wymiennikiem ciepła do odzysku energii ze ścieków odprowadzanych z prysznic (rys. 3),
- wariant 2 – instalacja z wykorzystaniem ścieków szarych do spłukiwania misek ustępowych i podlewania ogrodu (rys. 4),
- wariant 3 – instalacja z wykorzystaniem wody deszczowej do spłukiwania misek ustępowych i podlewania ogrodu (rys. 5),
- wariant 4 – instalacja z wykorzystaniem wody deszczowej i ścieków szarych do spłukiwania misek ustępowych i podlewania ogrodu oraz z wymiennikiem ciepła do odzysku energii ze ścieków odprowadzanych z prysznic (rys. 6).

Rys. 2. Schemat działania instalacji sanitarnych w budynku jednorodzinnym w Wariancie 0

Fig. 2. Scheme of functioning the sanitary installations in single-family residential building in Variant 0

W badaniach wariantów zakładających wykorzystanie gospodarcze wody deszczowej lub/i recykling ścieków szarych przyjęto następujące dane wejściowe:

- powierzchnia dachu budynku $F_D = 150 \text{ m}^2$,
- powierzchnia podlewanych ogrodu $F_{OG} = 300 \text{ m}^2$,
- dobowe zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet $Q_{WC} = 0,152 \text{ m}^3/\text{d}$,
- dobowe zapotrzebowanie na wodę do podlewania ogrodu (w okresie od 15 kwietnia do 15 września) $Q_{OG} = 0,375 \text{ m}^3/\text{d}$,

- dobowy dopływ ścieków szarych do układu zbiorników (zbiornik oczyszczający ścieki i zbiornik ścieków oczyszczonych)
 $Q_{SZ} = 0,180 \text{ m}^3/\text{d}$,
- objętość zbiornika retencyjnego na wodę deszczową $V_Z = 2,4 \text{ m}^3$.

Rys. 3. Schemat działania instalacji sanitarnych w budynku jednorodzinnym w Wariancie 1

Fig. 3. Scheme of functioning the sanitary installations in single-family residential building in Variant 1

W analizie wariantów, w których zredukowanie kosztów eksploatacyjnych wynika ze zmniejszenia zużycia gazu ziemnego wykorzystywanego do jej podgrzewania, założono następujące dane wejściowe:

- dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową $Q_{CWU} = 168 \text{ dm}^3/\text{d}$,
- temperatura ciepłej wody użytkowej $T_{CWU} = 55^\circ\text{C}$,
- temperatura wody zmieszanej $T_{WM} = 40^\circ\text{C}$,

- temperatura wody zimnej $T_{WZ} = 10^{\circ}\text{C}$,
- wypływ wody zmieszanej z poszczególnych punktów czerpalnych $Q_{WM} = 6 \text{ dm}^3/\text{min}$,
- czas trwania kąpieli pod prysznicem $p = 5,5 \text{ min}$,
- sprawność kotła gazowego dwufunkcyjnego $\eta = 0,85$,
- wartość opałowa gazu $H_G = 31 \text{ MJ/m}^3$.

Rys. 4. Schemat działania instalacji sanitarnych w budynku jednorodzinnym w Wariancie 2

Fig. 4. Scheme of functioning the sanitary installations in single-family residential building in Variant 2

Rys. 5. Schemat działania instalacji sanitarnych w budynku jednorodzinnym w Wariancie 3

Fig. 5. Scheme of functioning the sanitary installations in single-family residential building in Variant 3

4. Analiza wyników badań

4.1. Funkcjonowanie systemu odzysku ciepła ze ścieków szarych

W celu określenia oszczędności energii wykorzystywanej na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej, będących efektem zainstalowania przeciwprądowego pionowego wymiennika ciepła DWHR na odpływie ścieków szarych z prysznicą, zastosowano model obliczeniowy opracowany przez Słysia i Kordanę [42]. Ilość możliwej do odzyskania energii cieplnej oszacowano na podstawie wielkości natężenia przepływu wody i ścieków przez wymiennik w oparciu o dane producenta analizowanego urządzenia, natomiast parametry fizyczne wody dobrano z tablic [52].

Rys. 6. Schemat działania instalacji sanitarnych w budynku jednorodzinnym w Wariancie 4

Fig. 6. Scheme of functioning the sanitary installations in single-family residential building in Variant 4

W obliczeniach przyjęto, iż źródło energii do wstępnego podgrzewania wody stanowić będą jedynie ścieki odprowadzane z prysznica ze względu na równoczesność przepływu wody i ścieków przez wymiennik. Transportowana przez urządzenie woda doprowadzana będzie do pracującego przepływowo kotła dwufunkcyjnego zasilanego gazem ziemnym. Z uwagi na to, iż natężenie przepływu podgrzewanej wody może się różnić w zależności od aktualnego jej rozbioru, rozpatrzono dwa różne przypadki. Pierwszy z nich zakładał, iż przez wymiennik ciepła przepływa jedynie woda, która po podgrzaniu w kotle do odpowiedniej temperatury doprowadzona będzie do zaworu mieszającego prysznica. W drugim przypadku przyjęto natomiast, że występuje równoczesny pobór wody zmieszanej z dwóch punktów czerpalnych.

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują na potencjalnie duże możliwości oszczędności energii. Zainstalowanie wymiennika ciepła DWHR pozwala zaoszczędzić prawie 80 dm³ gazu ziemnego podczas jednej kąpieli pod prysznicem, a w przypadku gdy ciepła woda użytkowa doprowadzana jest także do innego urządzenia sanitarnego, wartość ta ulega zwiększeniu, co jest efektem wzrostu efektywności wymiennika ciepła oraz ilości odzyskanej ze ścieków energii. W analizowanym obiekcie mieszkalnym woda zmieszana wykorzystywana jest w czterech urządzeniach sanitarnych. Równoczesny pobór wody zmieszanej nawet z trzech punktów jednocześnie spowodowałby obniżenie kosztów eksploatacyjnych instalacji, jednakże wzrost przepływu wody przez wymiennik do wartości wynikłej z równoczesnej eksploatacji wszystkich urządzeń mógłby spowodować gwałtowny spadek efektywności systemu ze względu na ograniczoną jego przepustowość. W przypadku czteroosobowej rodziny można jednak przyjąć, iż taka sytuacja nie będzie występować.

W celu wyznaczenia wartości wskaźnika *LCC* założono, iż w 90% czasu użytkowania instalacji odzysku ciepła podgrzewana jest jedynie woda wykorzystywana na potrzeby kąpieli pod prysznicem, zaś w pozostałym okresie czasu występuje równoczesny pobór wody o temperaturze $T_{WM} = 40^{\circ}\text{C}$ z dwóch punktów czerpalnych.

4.2. Funkcjonowanie systemu wykorzystania ścieków szarych

W badaniach przeanalizowano możliwość oszczędzania wody w wyniku zastosowania systemu do wykorzystania ścieków szarych. Przyjęto, iż podczyszczone ścieki szare wykorzystywane będą do splukiwania misek ustępowych oraz w okresie wiosenno-letnim do podlewania ogrodu. Założono, iż do zbiornika, w którym zainstalowany jest filtr dopływać będą ścieki z prysznica i umywalk, w sumie 180 dm³/d. Ze względu na zawartość fosforanów w ściekach odpływających z pralki i możliwy ich niekorzystny wpływ na roślinność w ogrodzie, nie uwzględniono tych ścieków jako potencjalnego źródła wody w analizowanym budynku.

W Wariantcie 4 podczyszczone ścieki szare w ilości $152 \text{ dm}^3/\text{d}$ doprowadzone są ze zbiornika do instalacji w okresie całego roku, a ich nadmiar w okresie jesienno-zimowym kierowany jest do kanalizacji. Natomiast przez pozostałą część roku nadmiar ścieków szarych oraz dopływające z dachu wody deszczowe wykorzystywane są do podlewania ogrodu.

W analizie LCC wariantów 2 i 4 w kosztach eksploatacyjnych uwzględniono koszt wymiany filtra w wysokości 2500 zł. Zgodnie z wytycznymi producentów przyjęto, iż wymiana nastąpi po 10 latach funkcjonowania instalacji.

4.3. Funkcjonowanie systemu gospodarczego wykorzystania wody deszczowej

W celu określenia ilości wód deszczowych, które mogą zostać wykorzystane do spłukiwania toalet w badanym obiekcie i podlewania ogrodu wykorzystano model symulacyjny opracowany przez Słysia [41]. W badaniach posłużono się archiwalnymi danymi opadowymi z okresu 10 lat (2003-2012) pochodzącymi ze stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka. W okresie tym średnia roczna suma opadów wynosiła 695 mm.

Na podstawie wytycznych producentów przyjęto zbiornik retencyjny o objętości $2,4 \text{ m}^3$. Na rysunku 7 przedstawiono dla wybranego roku proces poboru zmagazynowanej w zbiorniku wody deszczowej.

Rys. 7. Zużycie wody deszczowej w instalacji sanitarnej w roku 2003

Fig. 7. Using of rainwater in sanitary installation in 2003

W okresie jesienno-zimowym dopływ wód opadowych do instalacji nie występował. Przyjęto również zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie przeciętnych norm zużycia wody [39], iż woda do podlewania ogrodu będzie wykorzystywana co drugi dzień w okresie od 15 kwietnia do 15 września w ilości $2,5 \text{ dm}^3/\text{m}^2$.

Przeprowadzone badania pokazały, iż woda deszczowa nie jest w stanie pokryć całkowitego zapotrzebowania na wodę do spłukiwania toalet i podlewania ogrodu w analizowanym budynku w okresie roku. W związku z tym konieczne było doprowadzenie wody do zbiornika z sieci wodociągowej. Proces zużycia wody z sieci wodociągowej przedstawiono na rysunku 8.

Rys. 8. Zużycie wody z sieci wodociągowej w instalacji sanitarnej w roku 2003

Fig. 8. Using of tap water in sanitary installation in 2003

Pomimo znacznej objętości zbiornika retencyjnego, która zapewniła efektywne gromadzenie w nim wody deszczowej, w pewnych okresach występowały zrzuty nadmiaru wody do systemu kanalizacyjnego. Miało to miejsce szczególnie w okresach intensywnych opadów. Proces ten dla wybranego roku pokazano na rysunku 9.

4.4. Analiza kosztów LCC

W każdym z analizowanych wariantów w obliczeniach kosztów LCC w nakładach inwestycyjnych uwzględniono koszt wykonania wewnętrznej instalacji wodociągowej i kanalizacyjnej, który wynosił 8 000 zł. Ponadto w Wariantcie 1 oprócz w/w kosztów w nakładach inwestycyjnych uwzględniono koszty instalacji odzysku ciepła ze ścieków (3 500 zł), w Wariantcie 2 koszty zainstalo-

wania systemu wykorzystania ścieków szarych (14 500 zł), a w Wariancie 3 koszty wykonania systemu gospodarczego wykorzystania wody deszczowej (11 000 zł). W Wariancie 4 w nakładach inwestycyjnych uwzględniono koszt zakupu i wykonania wspólnego systemu wykorzystania wody deszczowej i ścieków szarych, który wynosił 16 760 zł oraz koszt instalacji odzysku ciepła.

Rys. 9. Wielkość zrzutu nadmiaru wód deszczowych ze zbiornika do systemu kanalizacyjnego w roku 2003

Fig. 9. Volume of an excess of rainwater discharged from the tank to sewage system in 2003

Z kolei w kosztach eksploatacyjnych każdego z wariantów wzięto pod uwagę koszty zakupu wody z sieci wodociągowej i gazu służącego do podgrzania ciepłej wody użytkowej. W Wariancie 2, 3 i 4 uwzględniono również koszty transportu pompowego zgromadzonej w zbiorniku wody do instalacji sanitarnej w budynku.

Założono, iż w analizowanym budynku nie jest zainstalowany dodatkowy wodomierz do pomiaru bezpowrotnie zużytej wody.

Przy obliczeniach wykorzystano następujące dane:

- cena zakupu 1 m³ wody wodociągowej roku 0 $c_w = 7,69$ zł/m³,
- cena zakupu 1 m³ gazu w roku 0 $c_g = 2,03$ zł/m³,
- cena zakupu energii elektrycznej w roku 0 $c_e = 0,58$ zł/kWh,
- coroczny wzrost ceny zakupu wody wodociągowej $r_w = 8\%$,
- coroczny wzrost ceny zakupu gazu $r_g = 3\%$,
- coroczny wzrost ceny zakupu energii elektrycznej $r_e = 4\%$,
- stopa dyskontowa $r = 5\%$.

Analizę *Life Cycle Cost* przeprowadzono dla dwóch okresów funkcjonowania instalacji w badanym budynku: $T = 15$ lat i $T = 20$ lat. W tabeli 3 przedsta-

wiono szczegółowe wyniki badań. Z kolei na rysunku 10 pokazano wartość kosztów *LCC* dla analizowanych wariantów inwestycyjnych w zależności od przyjętego okresu funkcjonowania obiektu. Najmniejsze koszty *LCC* dla $T = 15$ lat uzyskano dla wariantu 0, czyli rozwiązania instalacji w sposób tradycyjny. Jednak przy wydłużeniu okresu analizy do 20 lat okazało się, iż najkorzystniejszym finansowo wariantem jest rozwiązanie z zastosowaniem instalacji wykorzystania wód deszczowych (wariant 4). Wynika to z oszczędności wody zużywanej do spłukiwania toalet i podlewania ogrodu w okresie 20 lat. Rozwiązaniem korzystniejszym od tradycyjnego okazał się w takim przypadku także wariant 1 polegający na montażu systemu odzysku ciepła na odpływie ścieków z prysznicą, co jest efektem zredukowania zużycia gazu ziemnego na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej w analizowanym budynku.

Tabela 3. Zestawienie kosztów dla analizowanych wariantów inwestycyjnych

Table 3. Summary of costs for each alternative

Wariant	Okres analizy $T = 15$ lat			Okres analizy $T = 20$ lat		
	<i>INV</i> , zł	<i>K_E</i> , zł	<i>LCC</i> , zł	<i>INV</i> , zł	<i>K_E</i> , zł	<i>LCC</i> , zł
0	8 000	44 744,55	52 744,55	8 000	62 506,58	70 506,58
1	11 500	41 661,05	53 161,05	11 500	58 577,73	70 077,73
2	22 500	39 101,83	61 601,83	22 500	49 914,83	72 414,83
3	19 000	37 935,25	56 935,25	19 000	49 049,62	68 049,62
4	28 260	31 042,36	59 302,36	28 260	42 690,56	70 950,56

Rys. 10. Wartość kosztów *Life Cycle Cost* dla analizowanych wariantów inwestycyjnych

Fig. 10. The Life Cycle Cost for each alternative

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują ponadto, iż także opłacalność zastosowania pozostałych systemów w odniesieniu do wariantu podstawowego rośnie wraz z wydłużeniem okresu analizy. Przy założeniu czasu trwania analizy $T = 15$ lat wysokość wskaźnika *LCC* wyznaczona dla wariantu najbardziej niekorzystnego (wariant 2) jest prawie 17% wyższa niż dla tradycyjnego rozwiązania instalacji wodno-kanalizacyjnej. Wydłużenie tego okresu o kolejne 5 lat powoduje natomiast, że różnica ta wynosi niespełna 3%.

Przeprowadzone badania wykazały, iż początkowe nakłady inwestycyjne w zależności od rozpatrywanego wariantu wynoszą od 15,2 do 47,7 % wartości całkowitych kosztów *LCC* dla okresu analizy $T = 15$ lat i od 11,3 do 39,8 % dla okresu analizy $T = 20$ lat. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Rys. 11. Procentowa wartość poszczególnych kosztów w całkowitych kosztach *LCC* dla okresu analizy $T = 15$ lat

Fig. 11. The percentage of individual costs in the total *LCC* for $T = 15$ years

Najwyższe nakłady inwestycyjne w odniesieniu do potencjalnych oszczędności należy ponieść w przypadku zastosowania wariantów zakładających recykling ścieków szarych, to jest wariantu 2 i 4, co jest związane z koniecznością podczyszczania ścieków doprowadzanych do zbiornika. Znajduje to odzwierciedlenie w całkowitych kosztach cyklu życia opisanych systemów, gdyż zarówno po 15, jak i po 20 latach eksploatacji instalacji wodno-kanalizacyjnej w analizowanym budynku warianty te charakteryzuje najwyższa wartość wskaźnika *LCC*.

Rys. 12. Procentowa wartość poszczególnych kosztów w całkowitych kosztach *LCC* dla okresu analizy $T = 20$ lat

Fig. 12. The percentage of individual costs in the total *LCC* for $T = 20$ years

5. Podsumowanie

Stosowane coraz częściej systemy umożliwiające ograniczanie zużycia wody i energii cieplnej przynoszą wiele korzyści dla środowiska naturalnego oraz zrównoważonego rozwoju miast. W czasach, w których w wielu krajach na świecie występuje wodny deficyt, poszukiwanie alternatywnych źródeł wody nabiera coraz większego znaczenia. Liczne prognozy pokazują, iż w ciągu najbliższych dekad światowe zapasy słodkiej wody będą się kurczyć, podczas gdy zapotrzebowanie na nią drastycznie wzrośnie. Zmiany klimatu, rosnące zapotrzebowanie na żywność i energię czy potrzeby sanitarne stale rosnącej populacji to czynniki mające wpływ na szybkie wyczerpywanie się zasobów i degradację środowiska naturalnego.

Przeprowadzone badania pokazały, iż ścieki szare oraz wody deszczowe mogą stanowić cenne źródło wody w analizowanym budynku jednorodzinnym, i tym samym są w stanie ograniczyć zużycie wody z sieci wodociągowej. Ponadto zastosowanie systemu odzysku ciepła ze ścieków umożliwia zmniejszenie ilości gazu wykorzystywanego do przygotowania ciepłej wody w badanym obiekcie.

Wykonana analiza *Life Cycle Cost* wybranych rozwiązań instalacji wodno--kanalizacyjnej w budynku jednorodzinnym wykazała, że stosowanie tych systemów nie jest obecnie w naszym kraju opłacalne. Na poprawę efektywności fi-

nansowej ich wykorzystania mogłoby mieć wpływ dofinansowanie z budżetu państwa oraz ze środków Unii Europejskiej, tak jak ma to miejsce w innych krajach. Dodatkowo zmiana polskiego ustawodawstwa, które obecnie nie precyzuje jasnych zaleceń dotyczących zarządzania wodami opadowymi, byłaby impulsem, który zachęciłby społeczeństwo do stosowania opisanych technologii w instalacjach wewnętrznych budynków.

Literatura

- [1] Allen L., Christian-Smith J., Palaniappan M.: Overview of Greywater Reuse: The Potential of Greywater Systems to Aid Sustainable Water Management, Pacific Institute, Oakland 2010.
- [2] Appan A.: A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water*, vol. 1, 1999, s. 317-321.
- [3] Bakis N., Kagioglou M., Aouad G., Amaratunga D., Kishk M., Al-Hajj A.: An Integrated Environment for Life Cycle Costing in Construction, [in:] 20th CIB Conference: IT in Construction, New Zealand, 2003.
- [4] Chilton J., Maidment G., Marriott D., Francis A., Tobias G.: Case study of rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water*, vol. 1, 1999, s. 345-354.
- [5] Chudzicki J., Sosnowski S.: Instalacje wodociągowe: projektowanie, wykonanie, eksploatacja, Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2009.
- [6] Coombes P.: Rainwater Tanks Revisited: New opportunities for urban water cycle management, The University of Newcastle, Australia 2003.
- [7] Cristowa-Boal D., Eden R.E., McFarlane S.: An investigation into greywater reuse for urban residential properties, *Desalination*, vol. 106, 1996, s. 391-397.
- [8] Donner E., Eriksson E., Revitt D.M., Scholes L., Holten Lützhøft H.C., Ledin A.: Presence and fate of priority substances in domestic greywater treatment and reuse systems, *Science of the Total Environment*, vol. 408, 2010, s. 2444-2451.
- [9] Epstein M.: Measuring Corporate Environmental Performance, McGraw-Hill, Chicago, IL 1996.
- [10] Eriksson E., Andersen H.R., Madsen T.S., Ledin A.: Greywater pollution variability and loadings, *Ecological Engineering*, vol. 35, 2009, s. 661-669.
- [11] Fewkes A.: Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach, *Urban Water*, vol. 1, 2000, s. 323-333.
- [12] Furumai H.: Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use, *A/B/C*, vol. 33, 2008, s. 340-346.
- [13] Ghisi E.: Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil, *Building and Environment*, vol. 41, 2006, s. 1544-1550.
- [14] Ghisi E., Ferreira D.: Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil, *Building and Environment*, vol. 42, 2007, s. 2512-2522.

- [15] Ghisi E., Oliveira S.: Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil, *Building and Environment*, vol. 42, 2007, s. 1731-1742.
- [16] Ghisi E., Tavares D., Rocha V.: Rainwater harvesting in petrol stations in Brasilia: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, 2009, s. 79-85.
- [17] Gluch P., Baumann H.: The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making, *Building and Environment*, vol. 39, 2004, s. 571-580.
- [18] Gual M., Moia A., March J.G.: Monitoring of an indoor pilot plant for osmosis rejection and greywater reuse to flush toilets in a hotel, *Desalination*, vol. 219, 2008, s. 81-88.
- [19] Hotłoś H.: Quantity and availability of freshwater resources: The world – Europe – Poland, *Environment Protection Engineering*, vol. 34, 2008, s. 67-77.
- [20] Huang K., Wang H., Zhou X.: Heat Pump for High School Bathroom Heat Recovery, [in:] *Proceedings of the Six International Conference for Enhanced Buildings Operations*, Shenzhen 2006.
- [21] Imteaz M.A., Shanableh A., Rahman A., Ahsan A.: Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, 2011, s. 1022-1029.
- [22] Jeppesen B.: Domestic greywater re-use: Australia's challenge for the future, *Desalination*, vol. 106, 1996, s. 311-315.
- [23] Jones M., Hunt W.: Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, 2010, s. 623-629.
- [24] Kimmels A.: *Shower Heat Recovery: Overview of Commercially Available DWHR Systems*, Meander Heat Recovery, 2011.
- [25] Kordana S., Słyś D.: Możliwości wykorzystania ciepła odpadowego w systemach kanalizacyjnych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Nr 283, z. 59(2/12/I), 2012, s. 67-78.
- [26] Liu L., Fu L., Jiang Y.: Application of an exhaust heat recovery system for domestic hot water, *Energy*, vol. 35, 2010, 1471-1481.
- [27] March J.G., Gual M., Orozco F.: Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain), *Desalination*, vol. 164, 2004, s. 241-247.
- [28] Misra R.K., Patel J.H., Baxi V.R.: Reuse potential of laundry greywater for irrigation based on growth, water and nutrient use of tomato, *Journal of Hydrology*, vol. 386, 2010, s. 95-102.
- [29] Misra R.K., Sivongxay A.: Reuse of laundry greywater as affected by its interaction with saturated soil, *Journal of Hydrology*, vol. 366, 2009, s. 55-61.
- [30] Mourad K., Berndtsson R.: Potential water saving from rainwater harvesting in Syria, *VATTEN*, vol. 67, 2011, s. 113-117.
- [31] Mucha J., Jodłowski A.: Ocena możliwości wykorzystania wody szarej, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 7-8, 2010, s. 24-27.

- [32] Mwenge Kahinda J., Taigbenu A.E., Boroto R.J.: Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa, *Physic and Chemistry of the Earth*, vol. 35, 2010, s. 742-751.
- [33] Ney R., Galos K.: Bilans polskich surowców mineralnych (energetycznych, metalicznych, chemicznych i skalnych). Kierunki polityki przestrzennej w zakresie wykorzystania złóż, Problemy ochrony złóż i terenów eksploatacyjnych – rekomendacja dla KPZK, 2008.
- [34] Nolde E.: Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings – over ten years experience in Berlin, *Urban Water*, vol. 1, 1999, s. 275-284.
- [35] NSW Government: NSW Guidelines for Greywater Reuse in Sewered, Single Household Residential Premises, Department of Water & Energy, Sydney 2008.
- [36] O'Toole J., Sinclair M., Malawaraarachchi M., Hamilton A., Barker S.F., Leder K.: Microbial quality assessment of household greywater, *Water Research*, vol. 46, 2012, s. 4301-4313.
- [37] Ottoson J., Stenström T.A.: Faecal contamination of greywater and associated microbial risks, *Water Research*, vol. 37, 2003, s. 645-655.
- [38] Pandey D.N., Gupta A.K., Anderson D.M.: Rainwater harvesting as an adaptation to climate change, *Current Science*, vol. 85, 2003, s. 46-59.
- [39] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie przeciętnych norm zużycia wody (Dz. U. 2002 Nr 8, poz. 70).
- [40] Sales J.C., König K.W., Lo A.: Rainwater harvesting providing adaptation opportunities to climate change, [in:] Barron J. (ed) *Rainwater Harvesting: A Life-line for Human Well-being*, A report Prepared for UNEP by Stockholm Environment Institute York. Stockholm Resilience Centre, Sweden 2009.
- [41] Słyś D.: Potential of rainwater utilization in residential housing in Poland, *Water and Environment Journal*, vol. 23, 2009, s. 318-325.
- [42] Słyś D., Kordana S.: Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing, *Energy and Buildings*, vol. 71, 2014, 1-11.
- [43] Słyś D., Kordana S.: Odzysk ciepła odpadowego w instalacjach i systemach kanalizacyjnych, Wydawnictwo i Handel Książkami „Kabe”, Krosno 2013.
- [44] Słyś D., Stec A., Zeleňáková M.: A LCC analysis of rainwater management variants, *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 19, 2012, s. 359-372.
- [45] Springer M.: Der Prozess der Kompostierung. Kompost-Toiletten – Wege zur sinnvollen Fäkalien Entsorgung, Claudia Lorenz-Ladener., 1992.
- [46] Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków. Postanowienia ogólne i wymagania (PN-EN 12056-1:2002).
- [47] Szwed M., Karg G., Pińskwar I., Radziejewski M., Graczyk D., Kędziora A., Kundzewicz Z.W.: Climate change and its effect on agriculture, water resources and human health sectors in Poland, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, 2010 s. 1725-1737.
- [48] Vigneswaran S., Sundaravadiel M.: Recycle and Reuse of Domestic Wastewater, [in:] Vigneswaran S. (ed.) *Wastewater Recycle, Reuse and Reclamation – Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 2004.

- [49] Villarreal E.L., Dixon A.: Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden, *Building and Environment*, vol. 40, 2005, s. 1174-1184.
- [50] Ward S., Memon F.A., Butler D.: Performance of a large building rainwater harvesting system, *Water Research*, vol. 46, 2012, s. 5127-5134.
- [51] Wong L.T., Mui K.W., Guan Y.: Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong, *Applied Energy*, vol. 87, 2010, s. 703-709.
- [52] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: *Wymiana ciepła*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- [53] Zaizen M., Urakawa T., Matsumoto Y., Takai H.: The collection of rainwater from dome stadiums in Japan, *Urban Water*, vol. 1, 1999, s. 355-359.

LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF THE SYSTEMS ALLOWING WATER AND ENERGY CONSUMPTION REDUCTION IN A SINGLE-FAMILY DWELLING HOUSE

S u m m a r y

The development of civilization and progressive urbanization contribute to the environmental degradation and the depletion of natural resources. This implies the need to search for the alternative sources of water and energy. Therefore, research has been carried out aimed at evaluating the profitability of the application of selected technology allowing the reduction of potable water and natural gas consumption. Solutions including shower water heat recovery as well as gray and rainwater harvesting for toilet flushing and irrigation were analyzed. The Life Cycle Cost Analysis, which takes into account both investment and operational cost, was conducted. The annual increase in gas and water prices as well as the time value of money were also included in the study. The analysis revealed a significant effect of the operation time of the system on the obtained results.

Keywords: financial analysis, drain water heat recovery, gray water recycling, rainwater harvesting

DOI:10.7862/rb.2014.63

Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.

Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.