

Dorian CZARNIECKI<sup>1</sup>

Daniel SŁYŚ<sup>2</sup>

## ANALIZA TECHNICZNA I FINANSOWA WARIANTÓW OGRZEWANIA WODY Z WYKORZYSTANIEM POMP CIEPŁA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI ROZSĄCZANIA WODY DESZCZOWEJ W PRODUKCJI ROŚLINNEJ

Prognozy i ogólnoświatowe trendy pokazują, że w najbliższych latach, a także w dalszej przyszłości, trzeba się liczyć ze znacznym wzrostem kosztów energii w stosunku do kosztów budowni, konstrukcji czy samych urządzeń, w tym grzewczych. W wyniku tego można 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. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie analizy technicznej i finansowej systemu podgrzewania wody do podlewania w obiektach przeznaczonych do produkcji roślinnej. Podlewanie roślin w szklarniach jest czynnością niezwykle istotną, a właściwie niezbędną dla ich prawidłowego rozwoju. W systemie ogrzewania wykorzystano gruntową pompę ciepła współpracującą z instalacją odprowadzającą wody deszczowe, pozwalającą na uzyskanie wysokiej wydajności poboru ciepła z gruntu poprzez jego nawilżanie. Przeanalizowano możliwe warianty pracy instalacji.

**Słowa kluczowe:** wody opadowe, pompa ciepła, gruntowy wymiennik ciepła

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Politechnika Rzeszowska, Katedra Infrastruktury i Ekorozwoju, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 6, tel. + 48 (017) 7432409, fax: (017) 8651172, e-mail: doriancz@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Rzeszowska, Katedra Infrastruktury i Ekorozwoju, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 6, tel. + 48 (017) 8651784, fax: (017) 8651172, e-mail: daniels@prz.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Głównym kierunkiem przemian sektora energetycznego jest obecnie poprawa efektywności energetycznej, rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii, jak również ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko.

W wyniku systematycznego i znacznego wzrostu cen paliw i energii, niezbędna staje się potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań systemów zaopatrzenia w ciepło takich jak, rozwój niskoemisyjnych technologii wytwarzania energii – zwłaszcza ze źródeł odnawialnych oraz poprawa sprawności wytwarzania energii. Odpowiedzią na taki trend jest wykorzystanie niskotemperaturowej energii z gruntu przy użyciu pompy ciepła [1].

Obecnie zaobserwować można znaczący rozwój myśli technicznej dotyczącej urządzeń i obiektów, które wpisują się w całokształt zagadnień technicznych w rozwoju zrównoważonym gospodarki wodami opadowymi. Nowe rozwiązania inżynierskie pozwalają na pełniejsze wykorzystanie naturalnych procesów zmierzających do odprowadzania wód opadowych, optymalizują działania infrastruktury kanalizacyjnej, tak aby stała się mniej uciążliwa dla odbiorników. Jednym z awangardowych zastosowań jest ich wykorzystanie do poprawy efektywności poboru ciepła w gruntowych wymiennikach ciepła [2].

Nowoczesna gospodarka wodami opadowymi opiera się na ograniczaniu ilości ścieków deszczowych, odprowadzanych systemami kanalizacji krytej, na rzecz miejscowego zagospodarowywania tych wód. Zatrzymywanie spływów opadowych u źródła ich powstawania przynosi liczne korzyści ekologiczne oraz może wpływać na ograniczenie kosztów budowy sieci kanalizacyjnych. Gospodarka wodami opadowymi powinna uwzględniać aspekt zrównoważonego rozwoju terenów oraz bieżące potrzeby człowieka, wynikające z konieczności utrzymywania niezawodności technicznej obiektów [2].

Niezwykle interesujące może okazać się połączenie tych dwóch systemów w celu uzyskania lepszych parametrów pracy gruntowego wymiennika ciepła, co zostało przedstawione w niniejszym artykule. Dokonano również oceny finansowej wariantów takiego systemu.

## 2. Warianty rozwiązań gruntowych pomp ciepła współpracujących z systemami rozsączania wody deszczowej

W tradycyjnych instalacjach nawadniających podgrzewanie zimnej wody wodociągowej do podlewania roślin w warzywnictwie jak i ogrodnictwie realizowane jest w podgrzewaczach elektrycznych, kotłach gazowych oraz na paliwo stałe. Do tego celu mogą być również wykorzystywane instalacje z pompami ciepła. Ze względu na znaczne nakłady inwestycyjne, istotne jest dokonanie analizy finansowej takiej inwestycji. Pompa ciepła jest szczególnie uzasadniona w przypadku takich obiektów jak [3]:

- duże szklarnie i cieplarnie,

- hurtownie ogrodnicze,
- hurtownie kwiatów,
- szkółki drzew i krzewów.

Jak wynika z informacji uzyskanych od hodowców, aby uzyskać optymalny wzrost systemu korzeniowego oraz zapobiec powstawaniu warunków sprzyjających rozwojowi chorób grzybowych i bakteryjnych rośliny najlepiej nawadniać wodą o temperaturze bliskiej temperaturze otoczenia w okresie letnim, czyli około 20°C [4, 5].

W niniejszym artykule przedstawiono nowy sposób podgrzewania wody wodociągowej z wykorzystaniem pomp ciepła. Celem ogrzewania jest uzyskanie wody o temperaturze optymalnej z punktu widzenia produktywności roślin. Dzięki podgrzewaniu wody, zakładany jest wzrost produkcji roślinnej co spowoduje znaczne zwiększenie zysków. Jak wynika z danych literaturowych [6] w celu zapewnienia odpowiedniej wilgotności podłoża rośliny należy podlewać wodą w ilości około 5 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d.

Analizę techniczno-finansową przeprowadzono dla następujących wariantów:

- Wariant I – pompa ciepła bez systemu rozsączania wody deszczowej,
- Wariant II – pompa ciepła z układem skrzynek rozsączających,
- Wariant III – pompa ciepła z rigolą nawadniającą grunt przy wykorzystaniu drenażu,
- Wariant IV – pompa ciepła o zwiększonej wydajności z układem skrzynek rozsączających,
- Wariant V – pompa ciepła o zwiększonej wydajności z rigolą nawadniającą grunt przy wykorzystaniu drenażu.

Grunt jest odwiecznym akumulatorem energii cieplnej. Według aktualnego stanu wiedzy grunt gliniasty mocno przesiąknięty wodą nadaje się szczególnie dobrze jako źródło ciepła. Doświadczenia wykazały, że można oczekiwać wydajności poboru ciepła  $q_E$  wynoszącej od 10 do 35 W/m<sup>2</sup> jako średniej wartości rocznej przy całorocznej eksploatacji [7].

Właściwości gruntu na ogół zmieniają się w okresie eksploatacji pompy ciepła, co powoduje istotną zmianę parametrów jej pracy. Z tego względu korzystne jest wyznaczenie powierzchni gruntowego poziomego wymiennika ciepła na podstawie doświadczeń praktycznych uzyskanych w wyniku wieloletniej eksploatacji tych urządzeń. W tabeli 1 podane zostały jednostkowe moce cieplne pobierane z gruntów o różnej strukturze i wilgotności [8].

W wyniku zintegrowania systemu retencji i odprowadzania wód deszczowych z instalacją gruntowego wymiennika ciepła możliwe jest utrzymywanie w długich okresach czasu maksymalnych wydajności pomp ciepła. Wody te nie byłyby bezproduktywnie odprowadzane do gruntu, ale w znacznym stopniu przyczyniłyby się do poprawy efektywności instalacji pompy ciepła [1].

Tabela 1. Wartości jednostkowych mocy cieplnych pobieranych z gruntu w poziomych, grunto-  
wych wymiennikach ciepła [na podstawie: 9]

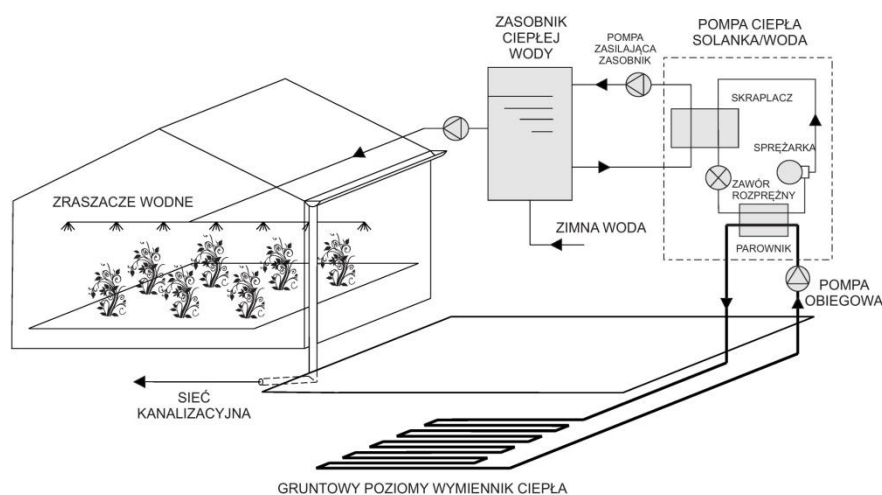
Table 1. The values of thermal power unit taken from the ground in horizontal ground heat ex-  
changers [based on: 9]

Rodzaj gruntu	Jednostkowa moc cieplna pobie- rana z gruntu $q_E$ [ $W/m^2$ ]
Suchy grunt piaszczysty	10 - 15
Wilgotny grunt piaszczysty	15 - 20
Suchy grunt gliniasty	20 - 25
Wilgotny grunt gliniasty	25 - 30

Poniżej przedstawiono przykłady współpracy instalacji pompy ciepła i systemów odprowadzania wód deszczowych w obiektach przeznaczonych do produkcji roślinnej.

### 2.1. Opis wariantu I

Na rysunku 1 przedstawiono schemat instalacji z pompą ciepła z poziomym wymiennikiem gruntowym ułożonym w gruncie suchym, do podgrzewania wody służącej do podlewania w produkcji roślinnej. W tym wariantcie wody opadowe odprowadzane są bezproduktywnie do kanalizacji deszczowej. Do odebrania ciepła z gruntu służy gruntowy wymiennik ciepła z przepływającą przez niego niezamarzającą cieczą, zwaną solanką, który ułożony został pod powierzchnią terenu, w tym przypadku w gruncie suchym o wydajności poboru ciepła około  $q_e = 15 W/m^2$  (tabela 1). Przepływ solanki przez rury gruntowego wymiennika ciepła jest wymuszany przez pompę obiegową o odpowiedniej wydajności. Solanka przepływając przez przewody wymiennika pobiera ciepło zgromadzone w gruncie, które za pośrednictwem pompy ciepła przekazywane jest do zasobnika ciepłej wody i dalej do zraszaczy wodnych, które będą równomiernie zraszać rośliny [1].



Rys. 1. Schemat instalacji z pompą ciepła do podgrzewania wody służącej do podlewania w produkcji roślinnej bez nawadniania gruntu (grunt suchy)

Fig. 1. Installation of a heat pump to heat water used for watering in crop production without irrigation the ground (dry ground)

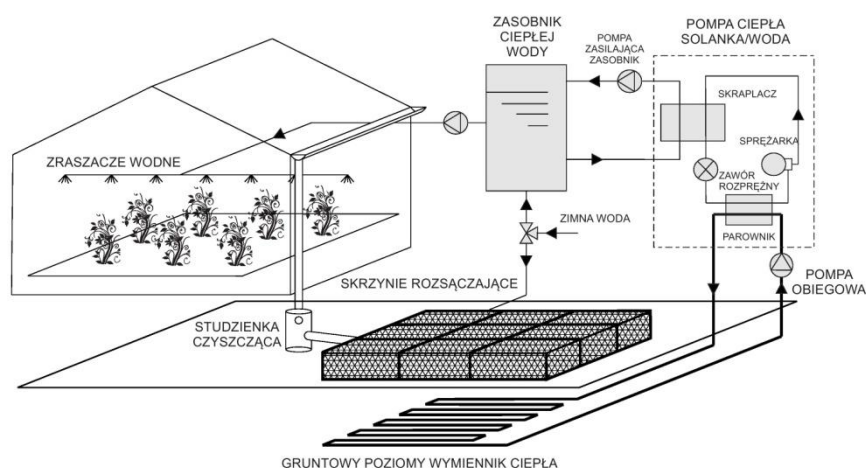
## 2.2. Opis wariantu II

Schemat instalacji gruntowej pompy ciepła służącej do podgrzewania wody do podlewania w produkcji roślinnej przedstawiono na rysunku 2. Instalacja ta współpracuje ze skrzynkami rozsączającymi jako urządzeniami do infiltracji i retencji wód deszczowych po ich wstępnym oczyszczeniu w studziencie czyszczącej, co umożliwia utrzymanie odpowiedniego nawilżenia gruntu. Instalacja pobiera ciepło z gruntu za pomocą poziomego wymiennika ciepła, który został ułożony pod skrzynkami rozsączającymi.

Skrzynie to jedne z urządzeń składowych systemu odprowadzania wód deszczowych i mają one za zadanie utrzymać wysoką wilgotność gruntu, dzięki czemu wydajność poboru ciepła z tego medium wzrośnie do około  $q_e = 30 \text{ W/m}^2$  (tabela 1). Zwiększy się przez to efektywność wymiany ciepła między gruntem a wymiennikiem poziomym. Dla lepszego efektu utrzymania wilgoci w gruncie pod gruntem wymiennikiem ciepła można zastosować nieprzepuszczalną folię PE. Pompa ciepła po odebraniu ciepła z gruntu przekazuje je do zasobnika ciepłej wody i dalej do zraszaczy wodnych w szklarni [1].

W długotrwałym okresie bezdeszczowym grunt nawilżany może być wodą z sieci wodociągowej. Takie rozwiązanie umożliwi zmniejszenie długości rur wymiennika, a co za tym idzie wymaganej powierzchni gruntowego wymiennika ciepła  $F$  w porównaniu do gruntu suchego. Taka powierzchnia wiąże się z niższymi kosztami poniesionymi na zakup i montaż instalacji, zmniejsza straty hydrauliczne, ale przede wszystkim wymaga od instalatora mniejszej po-

wierzchni na zamontowanie wymiennika ciepła. Pompa ciepła po odebraniu ciepła z gruntu przekazuje je do zasobnika ciepłej wody i dalej do zraszaczy wodnych [1].



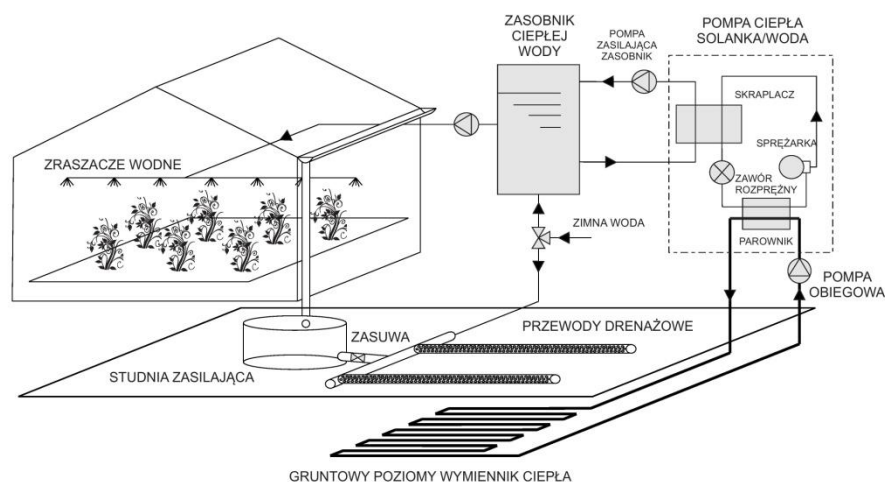
Rys. 2. Schemat instalacji z pompą ciepła do podgrzewania wody służącej do podlewania w produkcji roślinnej we współpracy ze skrzynkami rozsączającymi nawadniającymi grunt (grunt wilgotny)

Fig. 2. Installation of a heat pump to heat water used for watering in crop production in cooperation with drainage boxes for rainwater drain-off (wet ground)

### 2.3. Opis wariantu III

Rysunek 3 przedstawia schemat instalacji pompy ciepła służącej do podgrzewania wody do podlewania w produkcji roślinnej z wymiennikiem gruntowym poniżej strefy przemarzania gruntu współpracującym z rigolą, z podziemnym dopływem wód deszczowych oraz z ich rozproszaniem przy wykorzystaniu drenażu (grunt wilgotny). Zasada działania tego systemu jest analogiczna jak w wariantcie II, jednakże wykorzystany został tutaj sposób odprowadzania wód deszczowych wymagający niższych nakładów inwestycyjnych w porównaniu do wariantu II.

Drenaż jest jednym z urządzeń składowych systemu odprowadzania wód deszczowych. Ma on za zadanie utrzymać wysoką wilgotność gruntu, dzięki czemu wydajność poboru ciepła z tego medium znacznie wzrośnie w porównaniu do powyższego przykładu i będzie wynosić około  $q_e = 30 \text{ W/m}^2$  (tabela 1). Zwiększy się przez to efektywność wymiany ciepła między gruntem a wymiennikiem poziomym. Dla lepszego efektu utrzymania wilgoci w gruncie pod gruntowym wymiennikiem ciepła można zastosować nieprzepuszczalną folię PE [1].



Rys. 3. Schemat instalacji z pompą ciepła do podgrzewania wody służącej do podlewania w produkcji roślinnej we współpracy z rigolą nawadniającą grunt przy wykorzystaniu drenażu (grunt wilgotny)

Fig. 3. Installation of a heat pump to heat water used for watering in crop production in cooperation with rigol irrigation the ground using drainage (wet ground)

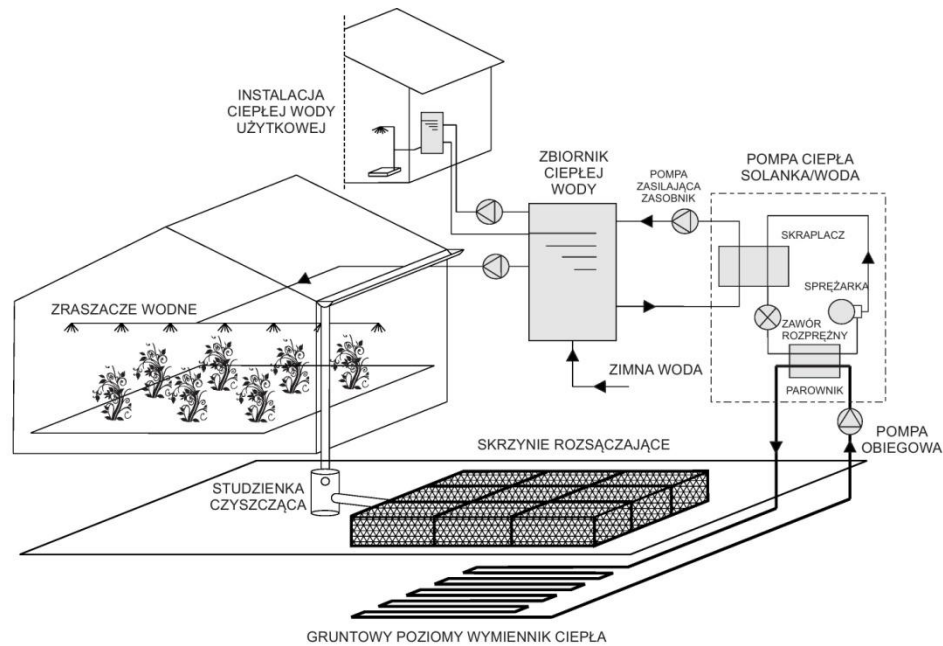
## 2.4. Opis wariantu IV

Schemat instalacji gruntowej pompy ciepła służącej do podgrzewania wody do podlewania w produkcji roślinnej wraz z podłączeniem tej instalacji do budynku hotelu pracowniczego na potrzeby produkcji ciepłej wody użytkowej przedstawiono na rysunku 4. Dzięki temu, zainstalowana pompa ciepła może pracować nie tylko w okresie wegetacji roślin, ale przez cały rok, co w znacznym stopniu przyczyni się do szybszego zwrotu kosztów poniesionych na wykonanie i eksploatację tego systemu. Instalacja ta współpracuje ze skrzynkami rozsączającymi jako urządzeniami do infiltracji i retencji wód deszczowych po ich wstępnym oczyszczeniu w studziencie czyszczącej, co umożliwia utrzymanie odpowiedniego nawilżenia gruntu.

Dzięki utrzymaniu wysokiej wilgotności gruntu, wzrośnie wydajność poboru ciepła z tego medium w porównaniu do wariantu I i będzie wynosić około  $q_e = 30 \text{ W/m}^2$  (tabela 1). Zwiększy się przez to efektywność wymiany ciepła między gruntem a wymiennikiem poziomym. Stwarza to możliwości zainstalowania pompy ciepła o większej mocy przy tej samej powierzchni gruntowego wymiennika ciepła jak w przypadku gruntu suchego [1].

W okresie bezdeszczowym lub długotrwałego mrozu pompa ciepła może być wykorzystywana jako pomocnicze źródło ciepła podgrzewające ciepłą wodę

użytkową, natomiast przez resztę roku, po zmianie parametrów na wyższe, może stanowić podstawowe źródło ciepła [1].

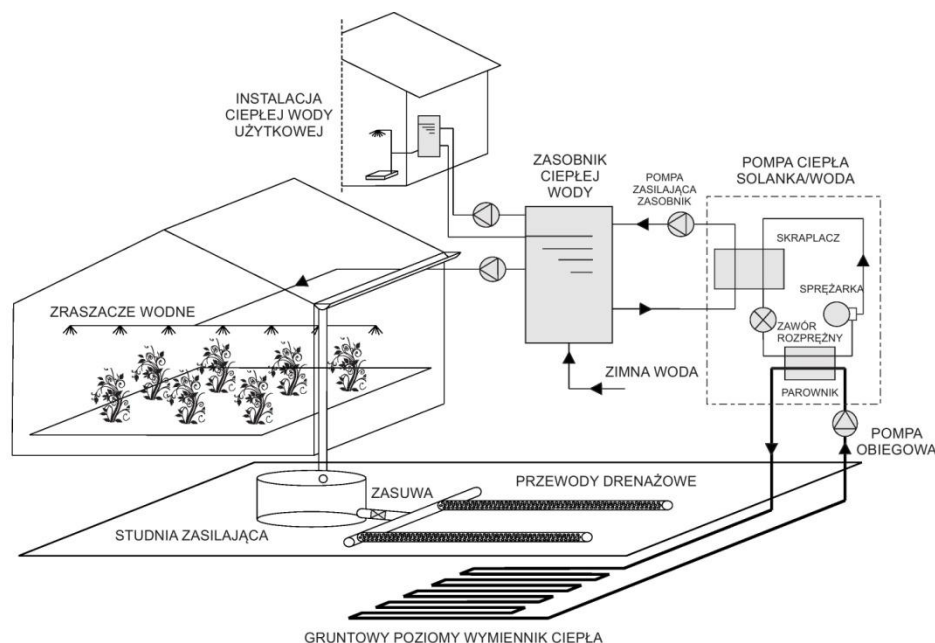


Rys. 4. Schemat instalacji z pompą ciepła o większej wydajności do podgrzewania wody służącej do podlewania w produkcji roślinnej we współpracy ze skrzynkami rozsączającymi nawadniającymi grunt (grunt wilgotny)

Fig. 4. Installation of a heat pump of higher efficiency to heat water used for watering in crop production in cooperation with drainage boxes for rainwater drain-off (wet ground)

## 2.5. Opis wariantu V

Rysunek 5 przedstawia schemat instalacji gruntowej pompy ciepła służącej do podgrzewania wody do podlewania w produkcji roślinnej wraz z podłączeniem tej instalacji do budynku hotelu pracowniczego na potrzeby produkcji ciepłej wody użytkowej. Zasada działania tego systemu jest analogiczna jak w wariantcie IV, jednakże zastosowany został system odprowadzania wód deszczowych wymagający niższych nakładów inwestycyjnych w porównaniu do powyższego.



Rys. 5. Schemat instalacji z pompą ciepła o większej wydajności do podgrzewania wody służącej do podlewania w produkcji roślinnej we współpracy z rigolą nawadniającą grunt przy wykorzystaniu drenażu (grunt wilgotny)

Fig. 5. Installation of a heat pump of higher efficiency to heat water used for watering in crop production in cooperation with rigol irrigation the ground using drainage (wet ground)

### 3. Obliczenie wariantów systemu

Na podstawie przyjętych założeń dokonano obliczenia poszczególnych wariantów. W obliczeniach bazowano na danych wyjściowych, którymi są:

- liczba mieszkańców hotelu pracowniczego (wariant IV i V):  $M = 15$  osób,
- parametry instalacji ciepłej wody użytkowej zgodnie z normą PN-92/B-01706: temperatura wody zimnej  $T_z = 10^\circ\text{C}$  [10], temperatura ciepłej wody użytkowej  $T_c = 40^\circ\text{C}$ , temperatura wody do nawadniania  $T_n = 20^\circ\text{C}$  [4, 5],
- dolne źródło ciepła - grunt o temperaturze  $T_g = 7^\circ\text{C}$  [7, 9],
- górne źródło ciepła - instalacja zasilająca pojemnościowy zasobnik ciepłej wody.

Określono średnie dobowe zużycie wody dla celów produkcji roślinnej oraz średnie zapotrzebowanie na ciepło układu do podgrzewania wody służącej do nawadniania dla szklarni o powierzchni  $1000\text{ m}^2$ . Według metody zaproponowanej przez [11] obliczono zapotrzebowanie na moc cieplną do przygotowa-

nia ciepłej wody użytkowej w hotelu pracowniczym (wariant IV i V). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2. W dalszej części analizy obliczeniowej dobrano pompę ciepła oraz gruntowy wymiennik ciepła.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych wariantów

Table 2. Summary calculated data for the variants

<b>Zestawienie wyników zapotrzebowania na ciepło w celu przygotowania ciepłej wody użytkowej</b>			
<b>Wariant obliczeniowy</b>	<b>I</b>	<b>II i III</b>	<b>IV i V</b>
Liczba mieszkańców w hotelu pracowniczym	15		
Średnie dobowe zużycie wody dla potrzeb produkcji roślinnej $q_{\text{sr,d}}$ [ $\text{dm}^3/\text{d}$ ]	5000		
Średnia moc układu ciepłej wody dla potrzeb produkcji roślinnej $Q_{\text{sr,r}}$ [kW]	8,26		
Zredukowana moc układu do przygotowania ciepłej wody użytkowej $Q_z$ [kW]	-	-	10,47
Obliczeniowa moc pompy ciepła dla potrzeb produkcji ciepłej wody $Q_{\text{pc}}$ [kW]	9,44	9,44	22,26

Na podstawie danych z tabeli 2 oraz danych technicznych dostępnych w katalogach producentów dobrano przykładowe pompy ciepła dostępne na rynku [12] (tabela 3).

Tabela 3. Parametry techniczne pomp ciepła [12]

Table 3. Specifications heat pump [12]

<b>Parametry techniczne dobranych pomp ciepła</b>			
<b>Wariant obliczeniowy</b>	<b>I</b>	<b>II i III</b>	<b>IV i V</b>
Moc grzewcza pompy ciepła dobrana z katalogów $Q_{\text{pc}}$ [kW]	11	11	23
Wydajność chłodnicza $Q_d$ [kW]	9,8	9,8	17,5
Pobór mocy elektrycznej $P$ [kW]	2,1	2,1	5,2
Stopień efektywności $\varphi$ [-]	5	5	4

Moc cieplną  $Q_d$ , którą należy pozyskać ze źródła niskotemperaturowego obliczono ze wzoru [9]:

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

gdzie:  $Q_{pc}$  – moc grzejna pompy ciepła (moc oddawana na skraplaczu), kW;  
 $\varphi$  – znamionowy współczynnik wydajności grzejnej pompy ciepła COP  
 odczytany z karty katalogowej producenta [12], -.

Gruntowy wymiennik ciepła dobrano zgodnie z zaleceniami producentów pomp ciepła [12]. Wymienniki te są zaprojektowane, jako poziome z równoległym prowadzeniem przewodów.

Pole powierzchni  $F$  konieczne do wykonania poziomego wymiennika ciepła, obliczono ze wzoru [7]:

$$F = \frac{Q_d}{q_e} \quad (2)$$

gdzie:  $Q_d$  – moc cieplna pozyskana ze źródła niskotemperaturowego, kW;  
 $q_e$  – wskaźnik poboru ciepła z gruntu, W/m<sup>2</sup>.

W wariantach IV i V ze względu na modernizację wariantu I przyjęto taką samą powierzchnię poziomego gruntowego wymiennika ciepła (tabela 4).

W celu określenia wymaganej długości układu skrzynek rozsączających  $L_s$  należy, wykorzystując wzór (3) określić natężenie deszczu miarodajnego  $q$  [2]:

$$q = \frac{6,631 \cdot \sqrt[3]{H^2 \cdot c}}{T_d^{\frac{2}{3}}} \quad (3)$$

gdzie:  $H$  – średnia roczna wysokość opadów, mm;  
 $c$  – częstość występowania opadu deszczu, -;  
 $T_d$  – czas trwania deszczu, min.

Wymaganą długość układu skrzynek rozsączających obliczono na podstawie zależności [2]:

$$L_s = \frac{F_o \cdot \psi \cdot q \cdot 10^{-7}}{b_s \cdot h_s \cdot a_k + (b_s + \frac{h_s}{2}) \cdot T_d \cdot 60 \cdot \frac{k_f}{2}} \cdot T_d \cdot 60 \quad (4)$$

gdzie:  $F_o$  – pole powierzchni odwadnianej, m<sup>2</sup>;  
 $\psi$  – współczynnik spływu powierzchniowego, -;  
 $b_s$  – szerokość pojedynczej skrzynki, m;  
 $h_s$  – wysokość pojedynczej skrzynki, m;  
 $a_k$  – współczynnik akumulacji, -;  
 $k_f$  – współczynnik filtracji, -.

Wymaganą długość rigoli z drenażem rozsączającym obliczono na podstawie zależności [2]:

$$L_r = \frac{F_o \cdot \psi \cdot q \cdot 10^{-7}}{b_r \cdot h_r \cdot n + (b_s + \frac{h_r}{2}) \cdot T_d \cdot 60 \cdot \frac{k_f}{2}} \cdot T_d \cdot 60 \quad (5)$$

gdzie:  $b_r$  – szerokość dna rowu chłonnego, m;  
 $h_r$  – wysokość użyteczna rowu chłonnego, m;  
 $n$  – współczynnik porowatości gruntu, -.

Powierzchnia systemu rozsączania wody opadowej  $F_s$  (wariant II i IV) i  $F_r$  (wariant III i V) jest analogiczna jak pole powierzchni gruntowego wymiennika ciepła  $F$ , ponieważ zaprojektowana została w celu jego nawilżenia.

Wyniki powyższych obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie wskaźników dla gruntowych wymienników ciepła dla poszczególnych wariantów

Table 4. Summary indicators for ground heat exchangers for the variants

Zestawienie obliczeń gruntowego wymiennika ciepła					
Wariant obliczeniowy	I	II	III	IV	V
Jednostkowa moc cieplna pobierana z gruntu $q_e$ [W/m <sup>2</sup> ]	15	30			
Wydajność chłodnicza $Q_d$ [kW]	8,8	8,8		17,25	
Powierzchnia gruntowego wymiennika ciepła $F$ [m <sup>2</sup> ]	587	294		587	
Natężenie deszczu miarodajnego $q$ [dm <sup>3</sup> /s·ha]	46,29				
Długość układu skrzynek $L_s$ [m]	-	294	-	587	-
Napełnienie układu skrzynek $h$ [m]	-	0,19		0,09	
Długość rigoli z drenażem rozsączającym $L_r$ [m]	-	-	294	-	587
Powierzchnia systemu rozsączania wody opadowej $F_r$ [m <sup>2</sup> ]	-	294		587	

Powierzchnia gruntu, jaką zajmuje wymiennik poziomy odpowiada jego długości.

#### 4. Ocena efektywności finansowej inwestycji

Znanych jest wiele metod do oceny ekonomicznej efektywności układów ogrzewania, do jednych z nich należą metoda kosztów rocznych oraz dynamiczna metoda wartości bieżącej netto - NPV (ang. Net Present Value) [13]. Metody

dynamiczne uwzględniające w swoim rachunku rozłożenie wpływów i wydatków inwestycyjnych w czasie umożliwiają dokładną ocenę projektów inwestycyjnych. Najczęściej stosuje się je ze względu na ich dyskontowy charakter. Dzięki dynamicznym metodom oceny projektów inwestycyjnych można przyszłą inwestycję zdyskontować na dziś, co pozwala na łatwiejsze porównanie inwestycji, które mają różne terminy wpływów i wydatków oraz wyciągnięcie wniosków.

W celu oceny efektywności finansowej zastosowania przyjętych wariantów współpracy gruntowego wymiennika pompy ciepła z systemem rozsączania wody deszczowej przeprowadzono analizę finansową zgodnie z powyższymi metodami.

W przedmiotowych szklarniach prowadzona jest hodowla ogórków. Owoce kwalifikujące do sprzedaży mają masę 180 – 250 g. Założono, że zagęszczenie roślin wynosi 2 szt./m<sup>2</sup> [14]. Z tego typu nasadzeń możliwe jest zebranie około 33,3 kg/m<sup>3</sup> [14] ogórków co w przypadku powierzchni 1000 m<sup>2</sup> daje 37000 kg. Średnia cena ogórków w Polsce w zależności od odmiany waha się w granicach 4 zł/kg [15], wartość produkcji przy takiej cenie wyniesie 133200 zł. Koszt uprawy według danych uzyskanych od hodowców to około 20779 zł [16]. Przychód netto ze sprzedaży ogórków wynosi zatem 112421 zł.

Założono, iż wykorzystanie instalacji pompy ciepła służącej do podgrzewania wody do podlewania w produkcji roślinnej zwiększy plony o 10% co odpowiada uzyskaniu plonu wynoszącego ok. 37 kg/m<sup>3</sup>. Zwiększony plon a co za tym idzie przychód netto z zastosowania pompy ciepła to 14800 zł.

Z informacji uzyskanych od firm budowlanych koszt wykonania rigoli z odprowadzaniem wody deszczowej przy pomocy drenażu wynosi około 45 zł/mb. Założono, że koszt pozostałych elementów instalacji wynosi 20% według propozycji [17].

W tabeli 5 zestawiono nakłady inwestycyjne instalacji dla poszczególnych wariantów.

Analizując dane z tabeli 5 można zauważyć, że nakłady inwestycyjne związane z budową systemu rozprowadzania wody deszczowej przy użyciu skrzynek rozsączających przy takiej powierzchni do nawadniania gruntowego wymiennika ciepła są bardzo wysokie i przewyższają koszty wykonania samego wymiennika gruntowego.

Czas eksploatacji opisanego systemu, który odpowiada czasowi bezawaryjnej pracy sprzężarek pomp ciepła przyjęto na  $N = 25$  lat, zgodnie z zaleceniami producentów (wymiana informacji w rozmowach z przedstawicielami różnych przedsiębiorstw). Do obliczeń przyjęto aktualną cenę energii elektrycznej w taryfie G11, która w Rzeszowie wynosi  $c_{el} = 0,59$  zł/kWh [19]. Natomiast obliczenia wartości zaktualizowanej netto przedsięwzięcia przeprowadzono przy założeniu wartości stopy dyskontowej na poziomie  $p = 4\%$  zalecanej dla obiektów energetyki odnawialnej [17].

Tabela 5. Nakład inwestycyjny instalacji dla wszystkich wariantów

Table 5. Cost the installation for the all variants

Nakłady inwestycyjne dla poszczególnych wariantów					
Wariant	I	II	III	IV	V
Pompa ciepła [zł]	26656 [12]			36316 [12]	
Wymiennik ciepła [zł]	29350 [17]	14700 [17]		29350 [17]	
Układ skrzynek rozdających [zł]	-	78435 [18]	-	156870 [18]	-
Układ rigoli z drenażem [zł]	-	-	13230	-	26415
Pozostałe elementy instalacji: zasobnik ciepłej wody, geowłóknina, folia PE, rurociągi, armatura, układ automatyki oraz robocizna i uruchomienie instalacji [zł]	11202	23959	10918	44508	18417
Sumaryczny nakład inwestycyjny ( $K_{ipc}$ ) [zł]	67208	143750	65504	267044	110498

Charakterystycznymi składowymi metody kosztów rocznych są:

- rata zwrotu kapitałowego  $r$ ,
- rata kosztów stałych  $r + r_{ce}$ ,
- roczne koszty stałe  $K_{rst}$ ,
- roczne koszty eksploatacyjne zmienne  $K_{ezm}$ ,
- koszty roczne wytwarzania ciepła  $K_{rpc}$ ,
- ilość ciepła użytecznego dostarczonego w ciągu roku przez pompę ciepła  $Q_{apc}$ ,
- jednostkowy koszt wytwarzanego ciepła  $q_{pc}$ .

Ratę zwrotu kapitałowego (rozszerzonej reprodukcji)  $r$  obliczono ze wzoru [17]:

$$r = \frac{p \cdot (1+p)^N}{(1+p)^N - 1} \quad (6)$$

gdzie:  $p$  – stopa dyskontowa, %;

$N$  – obliczeniowy okres eksploatacji obiektu, lata.

Ratę kosztów stałych  $r + r_{ce}$  (suma raty rozszerzonej reprodukcji i raty kosztów eksploatacyjnych stałych) obliczono z poniższego wzoru [17]:

$$r + r_{ce} = 0,08401 \quad (7)$$

gdzie:  $r_{ce}$  – stopa stałych kosztów eksploatacyjnych, %; przyjęto 2% według propozycji [17].

Roczne koszty stałe  $K_{rst}$  obliczono ze wzoru [17]:

$$K_{rst} = K_{rr} + K_{est} = K_{inpc} \cdot r + K_{inpc} \cdot r_{ce} = (r + r_{ce}) \cdot K_{inpc} \quad (8)$$

gdzie:  $K_{rr}$  – suma kosztów zwrotu kapitałowego, zł/rok;

$K_{est}$  – suma stałych kosztów eksploatacyjnych, zł/rok;

$K_{inpc}$  – całkowite nakłady inwestycyjne na instalację z pompą ciepła; zł.

Roczne koszty eksploatacyjne zmienne – składowa zmienna kosztów rocznych  $K_{ezm}$  obliczono ze wzoru [17]:

$$K_{ezm} = \frac{Q_{pc} \cdot T_{ipc} \cdot c_{el} \cdot k_{mr}}{\varphi \cdot \eta_{sil}} \quad (9)$$

gdzie:  $Q_{pc}$  – moc zainstalowana pompy ciepła, kW;

$T_{ipc}$  – czas użytkowania mocy zainstalowanej pompy ciepła, h/rok;

$c_{el}$  – cena energii elektrycznej, zł/kWh;

$k_{mr}$  – współczynnik kosztu materiałów ruchomych dla pompy ciepła, -; przyjęto 1,02 według propozycji [17],

$\varphi$  – średni roczny współczynnik wydajności grzewczej, -;

$\eta_{sil}$  – sprawność silnika elektrycznego napędzającego sprężarkę pompy ciepła, wartość średnia roczna, %; przyjęto 85% według propozycji [17].

Koszty roczne wytwarzania ciepła  $K_{rpc}$  jako suma składowej stałej i składowej zmiennej obliczono z poniższego wzoru [17]:

$$K_{rpc} = K_{rst} + K_{ezm} \quad (10)$$

Ilość ciepła użytecznego dostarczanego w ciągu roku przez pompę ciepła obliczono ze wzoru [17]:

$$Q_{apc} = Q_{pc} \cdot T_{ipc} \quad (11)$$

Jednostkowy koszt wytwarzanego ciepła  $q_{pc}$  jest ilorazem kosztów rocznych i rocznie wytwarzanego ciepła użytecznego można określić w oparciu o wzór [17]:

$$q_{pc} = \frac{K_{rpc}}{Q_{apc}} \quad (12)$$

Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla poszczególnych wariantów zestawiono w tabeli 6.

Jak można zauważyć z danych w tabeli 6 warianty IV i V okazują się najdroższe w eksploatacji. Dzięki temu, że zainstalowano w nich pompy ciepła większej mocy, pozwalają oprócz podgrzewania wody do podlewania na produkcję ciepłej wody w 15 osobowym hotelu pracowniczym.

Analiza finansowa metodą kosztów rocznych wykazała, że najlepszym wariantem jest instalacja gruntowej pompy ciepła służącej do podgrzewania wody do podlewania w produkcji roślinnej współpracującej z drenażem do rozsączania wody deszczowej wraz z podłączeniem tej instalacji do budynku hotelu pracowniczego na potrzeby produkcji ciepłej wody użytkowej (wariant V). Jednostkowy koszt wytwarzania ciepła jest w tym przypadku najniższy i wynosi 0,25 zł.

W związku z tym, że wskaźnik NPV > 0 w wariantach I, III, IV i V inwestycja może być opłacalna, ponieważ poza zwrotem nakładów początkowych przyniesie dodatkowo zysk z uwzględnieniem zmiany wartości pieniądza w czasie. Jedynie analiza finansowa wariantu II wykazała, że inwestycja jest nieopłacalna (NPV < 0) z uwagi na wysokie nakłady inwestycyjne oraz koszty wytwarzania ciepła w stosunku do zysków finansowych.

Tabela 6. Zestawienie wyników analizy finansowej

Table 6. Summary of the results of the financial analysis

Wyniki oceny efektywności finansowej analizowanej inwestycji					
Wariant	I	II	III	IV	V
Rata zwrotu kapitałowego $r$	0,064				
Rata kosztów stałych $r + r_{ce}$	0,084				
Roczne koszty stałe $K_{rst}$ [zł/rok]	5646,28	12076,72	5503,12	22434,89	9283,15
Roczne koszty eksploatacyjne zmienne $K_{ezm}$ [zł/rok]	1973,48			22288,73	
Roczne koszty wytwarzania ciepła $K_{rpc}$ [zł/rok]	7619,76	14050,20	7476,60	44723,62	31571,88
Ilość ciepła użytecznego $Q_{apc}$ [kWh/rok]	13937			125925	
Jednostkowy koszt wytwarzanego ciepła $q_{pc}$ [zł/kWh]	0,55	1,01	0,54	0,36	0,25
NPV [zł]	44962,28	-132036,56	51296,04	41813,11	403815,87
SPBT [lata]	9,36	191,72	8,94	23,25	4,48

Obliczenia prostego okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBT wykazały, że najszybciej bo po ok. 4,5 roku ulegną zwrotowi środki finansowe przewidziane na realizację wariantu V. W wariantcie tym zainstalowana jest pompa ciepła, która pracuje nie tylko w okresie wegetacji roślin, ale przez cały rok, co w znacznym stopniu przyczyniło się do szybszego zwrotu kosztów poniesionych na wykonanie tego systemu. Z uwagi na wysoki koszt systemu do odprowadzania wody deszczowej z użyciem skrzynek rozsączających przy tak dużej powierzchni do nawadniania, nakłady inwestycyjne w wariantcie II i IV zwrócić się w okresie najdłuższym.

W przypadku braku przez inwestora odpowiedniej powierzchni pod gruntowy wymiennik ciepła i potrzeby zakupu dodatkowego gruntu wariant III byłby jeszcze bardziej wskazany w porównaniu do wariantu I.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Wykonana analiza finansowa wykazuje jednoznacznie, że wykorzystanie wód opadowych do poprawy efektywności energetycznej pomp ciepła jest możliwe, ale również opłacalne finansowo.

O przydatności gruntu jako źródła ciepła decyduje jego struktura oraz wilgotność. Im jest ona większa, tym występują korzystniejsze warunki wymiany ciepła. W wyniku zastosowania nawilżania gruntu możliwe jest zmniejszenie kosztów instalacji oraz eksploatacji pompy ciepła dzięki zastosowaniu gruntowego wymiennika ciepła o mniejszej powierzchni (wariant II i III). Zwiększona wilgotność tego medium polepsza efektywność pracy pompy ciepła, pozwala na zastosowanie pompy ciepła o większej mocy przy takiej samej powierzchni wymiennika gruntowego w porównaniu do gruntu suchego co wykazano w niniejszym artykule (wariant IV i V). Warianty II i III oraz IV i V są do siebie podobne pod względem rozwiązania, z tą różnicą że zastosowano w nich różne systemy rozsączania wody deszczowej.

Ponadto w wyniku zmian klimatycznych przewiduje się w kolejnych latach zdecydowany wzrost intensywności opadów ekstremalnych co dodatkowo sprzyja zastosowaniu powyższych systemów.

Obowiązujące w naszym kraju, dostosowywane do prawa Unii Europejskiej przepisy prawne dotyczące gospodarki wodnej i ochrony środowiska jednoznacznie wymagają, aby wody opadowe były traktowane jako element zrównoważonego rozwoju obszarów zurbanizowanych, przy maksymalnym wykorzystaniu naturalnych sposobów ich odprowadzania i zagospodarowania [20]. Pomimo tego, że opłata deszczowa w naszym kraju nie ma jeszcze charakteru obligatoryjnego (przymusowego) w krajach Unii Europejskiej i Stanach Zjednoczonych są powszechną praktyką od lat 90 ubiegłego stulecia. Przy tak znacznej powierzchni uszczelnionej jak dachy szklarni, opłata mogłaby okazać się wysoka, co dodatkowo potwierdza celowość współpracy systemu rozsączania wody

deszczowej z gruntowym wymiennikiem ciepła w celu poprawy efektywności poboru ciepła z gruntu.

### Literatura

- [1] Czarniecki D., Słyś D.: Możliwości poprawy efektywności pomp ciepła współpracujących z systemami rozsączania wody deszczowej, Materiały Konferencyjne IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej INFRAEKO 2014, Rzeszów-Kraków 2014.
- [2] Słyś D.: Retencja i infiltracja wód deszczowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
- [3] Pisarev V., Nowak K.: Analiza techniczna i ekonomiczna ogrzewania wody z wykorzystaniem pompy ciepła do podlewania zieleńców i ogrodów, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, nr 283, Rzeszów 2012.
- [4] Lisiecka J.: Wymagania wodne ogórka, [www.e-warzywnictwo.pl](http://www.e-warzywnictwo.pl) [dostęp: 3 marzec 2014 r.].
- [5] Kołota E., Orłowski M., Biesiada A.: Warzywnictwo, Wydawnictwo UWP, Wrocław 2007.
- [6] Dz.U. z 2002 Nr 8, poz. 70, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie kreślenia przeciętnych norm zużycia wody.
- [7] Pisarev V.: Projektowanie instalacji grzewczych z pompami ciepła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [8] Pisarev V., Nowak K.: Analiza techniczna i ekonomiczna pracy gruntowej pompy ciepła na gruntach różnej wilgotności, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, nr 283, Rzeszów 2012.
- [9] Rubik M.: Pompy ciepła. Poradnik, Ośrodek Informacji: „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2000.
- [10] PN 92/B-01706: Instalacje wodociągowe – wymagania w projektowaniu.
- [11] Danielewicz J., GołECKI K.: Projektowanie kotłowni, katalog De Dietrich 2006.
- [12] Katalog firmy Viessmann, [www.viessmann.pl](http://www.viessmann.pl) [dostęp: 3 marzec 2014 r.].
- [13] Słyś D., Kordana S.: Odzysk ciepła odpadowego w instalacjach i systemach kanalizacyjnych, Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”, Krosno 2013.
- [14] Podymniak M.: Uprawa w starych szklarniach, Hasło Ogrodnicze, nr 2/2006, [www.ho.haslo.pl](http://www.ho.haslo.pl) [dostęp: 3 marzec 2014 r.].
- [15] Ile kosztują ogórki w Polsce?, [www.cenynaswiecie.pl](http://www.cenynaswiecie.pl) [dostęp: 3 marzec 2014 r.].
- [16] Bartczak M.: Koszty produkcji ogórków, [www.ogrodinfo.pl](http://www.ogrodinfo.pl) [dostęp: 3 marzec 2014 r.].
- [17] Kusto Z.: Uwarunkowania ekonomicznej efektywności pomp ciepła, IMP PAN, Gdańsk 2006.
- [18] Cennik skrzynek rozsączających, [www.kamaonline.pl](http://www.kamaonline.pl) [dostęp: 3 marzec 2014 r.].

- [19] Ceny prądu w Polsce, <http://zaklad.energetyczny.w.interia.pl>. [dostęp 17 listopada 2013].
- [20] Królikowska J., Królikowski A.: Opłaty za odprowadzanie wód opadowych - potrzeby i możliwości, Rocznik Ochrona Środowiska, tom 15, 2013.

## **TECHNICAL AND FINANCIAL ANALYSIS OF WATER HEATING VARIANTS WITH THE USE OF HEAT PUMPS COOPERATING WITH RAINWATER DRAINAGE SYSTEMS IN CROPS PRODUCTION**

### **S u m m a r y**

This thesis contains the presentation of possible solutions and the approximate benefits which can be achieved through the use of rainwater drainage installation cooperating with the ground heat exchanger which ensures a high efficiency heat extraction from the ground through its irrigation. The author analysed the possible examples of cooperation of these installations and detailed analysis of technical and financial applications has been done.

**Keywords:** rain water, heat pump, ground heat exchanger

DOI:10.7862/rb.2014.45

*Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.*

*Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.*