



**Politechnika Krakowska**  
im. Tadeusza Kościuszki



**Wydział Inżynierii  
i Technologii Chemicznej**

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej

Mikołaj Teper

# Badania i modelowanie gruntowego wymiennika ciepła ze zwojami typu slinky

Rozprawa doktorska

Promotor: dr hab. inż. Robert Grzywacz, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr inż. Barbara Król

Kraków 2022



Składam serdeczne podziękowania

dr hab. inż. Robertowi Grzywaczowi  
za nieocenioną pomoc przy realizacji niniejszej pracy  
oraz ogromną życzliwość

prof. dr hab. inż. Krzysztofowi Kupcowi  
za czas poświęcony na konsultacje merytoryczne

kol. Jakubowi Szostakowi za pomoc w przygotowaniu  
i uruchomieniu aparatury pomiarowej

mojej mamie Lidii i babci Teofili  
za okazane wsparcie

## Streszczenie

Przedmiotem niniejszej pracy są badania i modelowanie gruntowych wymienników ciepła typu slinky, stosowanych głównie jako źródło ciepła do pomp ciepła. Opisano podstawowe parametry opisujące pracę pomp ciepła oraz podstawy wymiany ciepła w gruncie. Scharakteryzowano pokrótce najczęściej występujące rodzaje gruntowych wymienników ciepła. Określono aktualny stan wiedzy w dziedzinie badań i modelowania gruntowych wymienników ciepła typu slinky.

Stwierdzono, że dotychczasowe badania wymienników slinky, tak doświadczalnie jak i teoretyczne, pozwoliły poznać szereg ich właściwości, jednak, zdaniem autora, pozostaje szereg niewiadomych w tej materii. Jest to spowodowane między innymi brakiem szczegółowych badań wymienników slinky w pełnej skali oraz szeregiem założeń upraszczających podczas formułowania ich modeli matematycznych. Zdaniem autora obecnie nie sformułowano także procedury obliczeniowej pozwalającej na dobór i przewidywanie pracy wymienników slinky w układach grzewczych.

W niniejszej pracy przeprowadzono badanie terenowe gruntowego wymiennika slinky składającego się z jednej pętli wymiennika. Badania polegały na ciągłym nagrzewaniu gruntu w czasie 72 godzin. Odczytane podczas badania temperatury gruntu z 48 czujników pomiarowych w gruncie, temperatury medium oraz moc przekazywana do gruntu, posłużyły do porównania z wynikami modeli pierścieniowego źródła ciepła RSM oraz komputerowej dynamiki płynów CFD i walidacji tychże modeli. Opisano zalety i ograniczenia wynikające z zastosowania różnego sposobu modelowania gruntowego wymiennika ciepła typu slinky.

Następnie przeprowadzono badania porównawcze właściwości gruntowych wymienników ciepła typu slinky. W tym celu dobrano pełnowymiarowy wymiennik liniowy metodą rekomendowaną przez Polską Organizację Rozwoju Technologii Pomp Ciepła. Stworzony został trójwymiarowy pełnowymiarowy cyfrowy model takiego wymiennika oraz czterech wymienników slinky o takich samych powierzchniach wymiany ciepła z gruntem ale różnych konfiguracjach. Przeprowadzono badania porównawcze poprzez modelowanie CFD dla tych samych warunków początkowo – brzegowych. Otrzymane wyniki modelowania pięciu typu wymienników poddano porównaniu analizę temperatur w gruncie, temperatur wylotowych z wymienników, mocy wymienników, mocy wymienników odniesionych do powierzchni wymiany ciepła z gruntem oraz do powierzchni zabudowy, ilości wymienianej energii oraz innych parametrów. Badania podsumowano a otrzymane wyniki poddano dyskusji. Sformułowano szereg wniosków dotyczących otrzymanych wyników oraz przeprowadzonych badań.

W pracy zasugerowano kierunki w jakich powinny być prowadzone dalsze badania gruntowych wymienników ciepła typu slinky.

Ponadto zaproponowano możliwość stworzenia procedury doboru wymienników slinky, a także przedstawiono koncepcję nowego, poziomego gruntowego wymiennika ciepła.

## Abstract

The topic of this thesis is research and modelling of slinky ground heat exchangers which are commonly used as heat source for heat pumps.

The basic parameters of heat pump efficiency and heat conduction in the soil are described. They were characterized by commonly used ground heat exchangers. The current state of knowledge in the field of research and modelling of ground heat exchangers of the slinky type was determined.

It was found that the previous studies of slinky exchangers, both experimentally and theoretically, allowed to learn a number of their properties, however, according to the author, a number of unknowns remain in this matter.

This is due, among other things, to the lack of detailed full-scale studies of slinky exchangers and a number of simplifying assumptions when formulating their mathematical models. According to the author, there is currently no calculation procedure for selecting and predicting the operation of slinky exchangers in heating systems.

In this work, a field test of a ground heat exchanger consisting of one loop of the exchanger was carried out. The research consisted of continuous heating of the ground over a period of 72 hours. The ground temperature, 48 sensors, the temperature of the medium and the power transmitted to the ground, were read during the ground temperature test, were used to compare with the results of the RSM ring heat source models and the computer dynamics of CFD fluids and the validation of these models. The advantages and limitations resulting from the use of different methods of modeling a ground heat exchanger of the slinky type are described.

Subsequently, comparative studies were carried out on the properties of ground heat exchangers of the slinky type. For this purpose, a full-size linear exchanger was selected using the method recommended by the Polish Organization for the Development of Heat Pump Technology. A three-dimensional full-size digital model of such an exchanger and four slinky exchangers with the same heat exchange surfaces with the ground but different configurations were created. Comparative studies were carried out by modeling CFDs for the same initial-boundary conditions. The obtained results of modeling five types of exchangers were compared with the analysis of temperatures in the ground, outlet temperatures from exchangers, exchanger power, exchanger power related to the heat exchange surface with the ground and to the building surface, the amount of energy exchanged and other parameters. The research was summarized and the results obtained were discussed. A number of conclusions were drawn regarding the results obtained and the research carried out.

The paper suggested the directions in which further research of ground heat exchangers of the slinky type should be carried out.

In addition, the possibility of creating a procedure for the selection of slinky exchangers was proposed, as well as the concept of a new, horizontal ground heat exchanger was presented.

## Spis treści

Streszczenie.....	3
Abstract.....	5
Spis treści.....	7
Wykaz oznaczeń.....	10
Wykaz skrótów i skrótowców.....	13
Wstęp.....	14
Cel i zakres pracy.....	17
1. Teoria pomp ciepła i gruntowych wymienników ciepła.....	19
1.1. Pompy ciepła.....	19
1.2. Wymiana ciepła w gruncie.....	23
1.2.1. Równanie przewodzenia ciepła w gruncie.....	23
1.2.2. Warunki początkowo – brzegowe.....	23
1.3. Gruntowe wymienniki ciepła będące dolnym źródłem ciepła lub chłodu.....	24
1.3.1. Pionowe gruntowe wymienniki ciepła.....	25
1.3.2. Poziome gruntowe wymienniki ciepła.....	25
1.3.3. Wymienniki gruntowe wykonane technologią GRD.....	26
1.3.4. Koszowe gruntowe wymienniki ciepła.....	26
1.4. Wymienniki ciepła typu slinky.....	26
2. Aktualny stan wiedzy o gruntowych spiralnych wymiennikach typu slinky.....	28
2.1. Badania istniejących wymienników.....	28
2.2. Badania modelowe wymienników.....	29
2.2.1. Modelowanie klasyczne wymienników slinky.....	29
2.2.2. Uwagi o pracach wykorzystujących metody CFD.....	29
3. Badania i modelowanie jednej pętli gruntowego wymiennika ciepła typu slinky.....	32
3.1. Badania terenowe.....	32
3.1.1. Stanowisko Pomiarowe.....	33
3.1.2. Eksperyment.....	37



3.2.	Modelowanie klasyczne gruntowego wymiennika ciepła typu slinky .....	49
3.2.1.	Analityczne rozwiązanie równania przewodzenia ciepła w ciele nieskończonym z pierścieniowym źródłem ciągłym źródłem ciepła .....	49
3.2.2.	Zależność strumienia przenoszonego ciepła od czasu.....	51
3.2.3.	Wyznaczenie parametrów cieplnych gruntu.....	52
3.2.4.	Podsumowanie walidacji modelu RSM.....	55
3.3.	Badania CFD gruntowego wymiennika ciepła typu slinky .....	57
3.3.1.	Model obliczeniowy wraz z założeniami .....	57
3.3.2.	Wyniki symulacji CFD.....	61
3.3.3.	Podsumowanie walidacji modelu CFD .....	66
3.4.	Podsumowanie i dyskusja wyników walidacji modeli.....	67
4.	Modelowanie CFD wymienników gruntowych w pełnej skali .....	71
4.1.	Problematyka doboru i badania wymienników slinky .....	71
4.2.	Dobór gruntowego wymiennika liniowego w oparciu o metodę PORT PC i założoną wydajnością liniową .....	73
4.3.	Założenia modelowania CFD.....	75
4.4.	Geometria modeli CFD.....	77
4.4.1.	Model wymiennika liniowego .....	80
4.4.2.	Model wymiennika slinky w konfiguracji rozłącznej .....	81
4.4.3.	Model wymiennika slinky w konfiguracji stycznej .....	82
4.4.4.	Model wymiennika slinky w konfiguracji zwojów zachodzących o 250 mm.....	83
4.4.5.	Model wymiennika slinky w konfiguracji zwojów zachodzących o 500 mm.....	84
4.5.	Przygotowanie siatek obliczeniowych.....	85
4.6.	Warunki początkowe i brzegowe zastosowane w symulacji CFD.....	89
4.7.	Wyniki symulacji CFD wymiennika liniowego oraz wymienników slinky w różnych konfiguracjach .....	92
4.7.1.	Mapy rozkładu temperatur w gruncie.....	92
4.7.2.	Rozkłady temperatur .....	121

4.7.3.	Temperatura wylotowa z wymienników .....	128
4.7.4.	Moce wymienników .....	130
4.7.5.	Moce wymienników odniesione do powierzchni wymiany ciepła z gruntem.....	132
4.7.6.	Moc chłodnicza pobierana z gruntu .....	133
4.7.7.	Energia i parametry średnie .....	135
5.	Podsumowanie i wnioski.....	138
6.	Koncepcja nowego horyzontalnego wymiennika gruntowego do pomp ciepła typu liniowo - spiralnego.....	146
	Posłowie.....	147
	Bibliografia .....	150
	Spis rysunków .....	154
	Spis tabel.....	159

## Wykaz oznaczeń

$A$  - powierzchnia zabudowy gruntu,  $m^2$ ,

$A_0$  - minimalna powierzchnia zabudowy wymiennika gruntowego,  $m^2$ ,

$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$  - współczynnik wyrównania temperatury,  $\frac{m^2}{s}$ ,

$a_p$  - współczynnik zabudowy,  $\frac{m}{m^2}$ ,

$a'$  - obliczeniowa powierzchnia zabudowy gruntu jednego obiegu wymiennika,  $m^2$ ,

$a'_{rzech}$  - rzeczywista powierzchnia zabudowy gruntu jednego rzędu wymiennika,

$c_p$  - ciepło właściwe,  $\frac{J}{kg \cdot K}$ ,

$c_v$  - objętościowe ciepło właściwe,  $\frac{J}{m^3 \cdot K}$ ,

$d_w$  - średnica wewnętrzna,  $mm$ ,

$d_z$  - średnica zewnętrzna,  $mm$ ,

$e_p$  - rozstaw rur wymiennika liniowego,  $m$ ,

$E$  - energia elektryczna,  $\frac{kWh}{rok}$ ,

$E_h$  - maksymalna jednostkowa ilość ciepła pobieranego z gruntu  $\frac{kWh}{m^2 \cdot rok}$ ,

$E_g$  - energia pobrana z gruntu,  $\frac{kWh}{rok}$ ,

$E_{gc}$  - energia pobrana z gruntu,  $\frac{kWh}{rok}$ ,

$EUco$  - zapotrzebowanie budynku na energię grzewczą,  $\frac{kWh}{m^2 \cdot rok}$ ,

$f$  - obliczeniowa powierzchnia wymiany ciepła wymiennika z gruntem,  $m^2$ ,

$f'$  - czynna powierzchnia wymiany ciepła,  $m^2$ ,

$f'_{sp}$  - czynna powierzchnia wymiany ciepła spiral,  $m^2$ ,

$f'_{ad}$  - powierzchnia adiabatyczna,  $m^2$ ,

$f'_{tot}$  - całkowita powierzchnia rur wymiennika,  $m^2$ ,

$h$  - głębokość,  $cm$ ,

$L$  - praca dostarczana do sprężarki,  $J$  ,  
 $L$  - głębokość tłumienia,  $m$  ,  
 $l$  - długość,  $m$  ,  
 $l$  - długość obliczeniowa rur wymiennika,  $m$  ,  
 $l_{wym}$  - długość obliczeniowa rur wymiennika po zaokrągleniu,  $m$  ,  
 $l'$  - obliczeniowa długość jednego obiegu wymiennika liniowego po zaokrągleniu,  $m$  ,  
 $l'_{czyszcz}$  - rzeczywista czynna długość rur,  $m$  ,  
 $l'_{max}$  - maksymalna długość jednego obiegu wymiennika liniowego,  $m$  ,  
 $l'_{ob}$  - obliczeniowa długość jednego obiegu wymiennika liniowego,  $m$  ,  
 $l'_{rzecz}$  - całkowita rzeczywista długość rury,  $m$  ,  
 $l'_{sp}$  - rzeczywista długość części spiralnej wymiennika,  $m$  ,  
 $n$  - ilość obiegów wymiennika,  
 $n_p$  - ilość pętli wymiennika slinky w jednym obiegu,  
 $n_z$  - ilość zwojów na  $m^2$  gruntu,  $\frac{1}{m^2}$  ,  
 $o$  - obwód zwilżany,  $m$  ,  
 $Q$  – ciepło,  $J$  ,  
 $Q_g$  - ciepło dostarczone do źródła górnego,  $\frac{kWh}{rok}$  ,  
 $Q_d$  - ciepło odebrane ze źródła dolnego,  $\frac{kWh}{rok}$  ,  
 $\dot{Q}$  - strumień ciepła, moc cieplna,  $W$  ,  
 $\dot{Q}_k$  - moc chłodnicza pompy ciepła,  $W$  ,  
 $q_h$  - jednostkowa wydajność cieplna gruntu (moc chłodnicza pobierana z gruntu),  $\frac{W}{m^2}$  ,  
 $\bar{q}_h$  - średnia jednostkowa wydajność cieplna gruntu,  $\frac{W}{m^2}$  ,  
 $q_i$  - jednostkowa wydajność cieplna wymiennika na m. b. rury,  $\frac{W}{m}$  ,  
 $\bar{q}_i$  - średnia jednostkowa wydajność cieplna wymiennika na m. b. rury,  $\frac{W}{m}$  ,  
 $\dot{q}$  - gęstość strumienia ciepła,  $\frac{W}{m^2}$  ,

$\bar{q}$  - średnia gęstość strumienia ciepła,  $\frac{W}{m^2}$ ,  
 $\dot{q}_v$  - objętościowe źródło ciepła,  $\frac{J}{m^3}$ ,  
 $r$  - współrzędna po promieniu, m,  
 $R$  - promień pierścienia, m,  
 $Re$  - liczba Reynoldsa,  
 $I$  - *fractional intensity*, intensywność turbulencji,  
 $T$  - temperatura,  $K$ ,  
 $T_g$  - temperatura górnego źródła ciepła,  $K$ ,  
 $T_d$  - temperatura dolnego źródła ciepła,  $K$ ,  
 $T_{init}$  - temperatura początkowa w modelu RSM,  $^{\circ}C$ ,  
 $T_{num}$  - temperatura gruntu modelu RSM,  $^{\circ}C$ ,  
 $T_{exp}$  - temperatura otrzymana eksperymentalnie,  $^{\circ}C$ ,  
 $T_o$  - temperatura otoczenia,  $K$ ,  
 $T_{wl}, T_{wyl}$  - temperatura wlotowa i wylotowa,  $^{\circ}C$ ,  
 $T_{pow}$  - temperatura powierzchni gruntu,  $^{\circ}C$ ,  
 $t$  - czas, s,  
 $x, y, z$  – współrzędne geometryczne, m,  
 $\alpha$  - współczynnik wnikania ciepła,  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ,  
 $\Delta p$  - różnica ciśnień, Pa,  
 $\Delta T$  - różnica temperatur,  $K$ ,  
 $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła,  $\frac{W}{m \cdot K}$ ,  
 $\rho$  - gęstość,  $\frac{kg}{m^3}$ ,  
 $\sigma$  - średni błąd kwadratowy,  
 $\tau$  - zmienna całkowania w modelu RSM,  
 $\omega$  - częstość kołowa,  $s^{-1}$

## Wykaz skrótów i skrótowców

*CFD* - *Computational Fluid Dynamics*, Komputerowa dynamika płynów,

*CWU* - ciepła woda użytkowa,

*CFX* - pakiet obliczeniowy w obrębie oprogramowania Ansys,

*COP* - *Coefficient of performance*, Współczynnik wydajności,

*COP<sub>C</sub>* - Współczynnik obiegu Carnota,

*GSHP* - *Ground Source Heat Pump*, Pompa ciepła z gruntem jako dolnym źródłem ciepła,

*JAZ* - *Jahresarbeitszahl*, Roczny Współczynnik Efektywności Energetycznej,

*OZE* - odnawialne źródła energii,

*PE* - polietylen,

*RSM* - *Ring Source Model*, model pierścieniowego źródła,

*SCOP* - *Seasonal Coefficient of Performance*,

*SPF* - *Seasonal Performance Factor*,

*VDI* - *Verein Deutscher Ingenieure*, Związek Niemieckich Inżynierów,

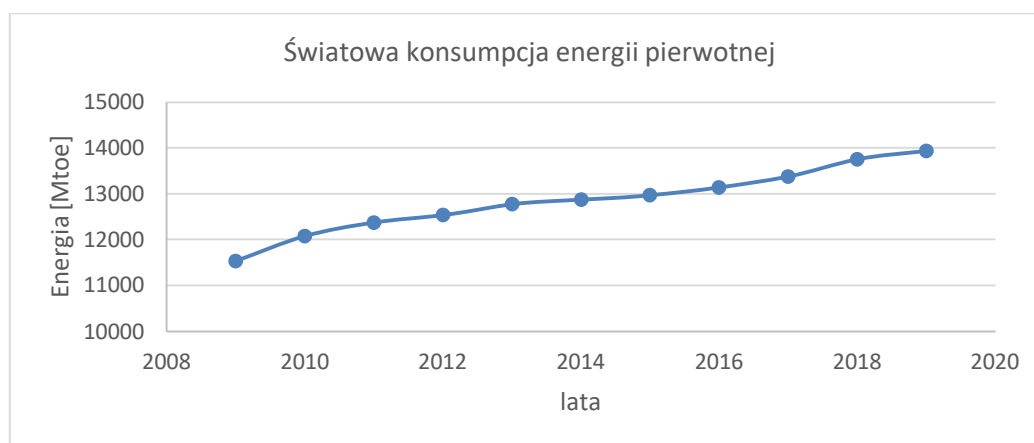
*PORTPC* - Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła,

Mtoe - megatona oleju ekwiwalentnego = 1 630 000 MWh = 41 868 000 GJ,

## Wstęp

W miarę rozwoju cywilizacji zapotrzebowanie na energię pierwotną w skali świata nieustannie wzrasta. W roku 2019 wynosiło ono około 13946 MToe (1). W Polsce zużycie energii pierwotnej wzrastało sukcesywnie w latach 2000 - 2018 z poziomu 85 MToe do poziomu 104 MToe rocznie (2). Równocześnie pojawiają się informacje o rychłym wyczerpaniu się złóż paliw kopalnych (3). Istotna jest także europejska polityka energetyczna związana dekarbonizacją, prowadząca do redukcji emisji dwutlenku węgla oraz przeciwdziałaniu zmianom klimatu (4) (5). W te działania wpisuje się także krajowa polityka walki z tak zwaną „niską emisją” (6). Mając na uwadze te fakty podejmowane są próby odejścia od klasycznych źródeł energii na rzecz energii odnawialnej. Prognozowany jest wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym z poziomu 5 % w roku 2020 do poziomu nawet 45 % w roku 2050 (7).

Próby zastąpienia klasycznych źródeł energii przez energie odnawialną wynikają z kilku przesłanek. Z jednej strony coraz doskonalsze technologie pozwalają coraz taniej pozyskiwać energię z OZE (8). Fakt ten zachęca do inwestowania w nowoczesne instalacje OZE co skutkuje coraz większymi mocami zainstalowanych instalacji OZE (9). Drugą przesłanką jest tzw. przymus legislacyjny, wymuszający stosowanie energii odnawialnej (10) (11). Fakty te poza niewątpliwie pozytywnym wpływem na zwiększenie udziału energii odnawialnej mają też drugie, negatywne oblicze. Instalacje OZE realizowane są często niezgodnie z myślą naukowo-techniczną. Nie wykonuje się analizy warunków ich eksploatacji lub nawet postępuje się wbrew tym warunkom (12) (13) (14) (15). Takie działanie, a także niska świadomość inwestorów i instalatorów OZE, skutkuje niejednokrotnie niską jakością powstających instalacji oraz zawyżeniem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. To z kolei zniechęca inwestorów do instalacji OZE. Kolejną przesłanką warunkującą zwiększanie udziału OZE w ogólnej produkcji energii są także podpisane zobowiązania międzynarodowe (10) (11). Ważny jest także punkt widzenia użytkowników OZE. Pozyskiwanie energii z instalacji OZE powinno skutkować dla nich zmniejszeniem opłat za energię oraz zmniejszeniem udziału energii pochodzącej z surowców nieodnawialnych. Poza zyskami ekonomicznymi istotne są także zyski ekologiczne. Stosowanie energii odnawialnej powinno przełożyć się na zmniejszenie zanieczyszczeń emitowanych do środowiska (16).



**Rys. 1. Światowa konsumpcja energii pierwotnej w latach 2006 - 2016 (1)**

W Polsce podczas ostatnich dwudziestu lat, nieustannie wzrasta popularność pomp ciepła (17). Znajdują one główne zastosowań w indywidualnych instalacjach w celu ogrzewnictwa mieszkaniowego i przygotowania ciepłej wody użytkowej (18). Teoria pracy pomp ciepła jest stosunkowo dobrze poznana (19) (20) (21). Opracowano szereg metod dotyczących doboru pomp ciepła i przewidywania sprawności ich pracy w danych warunkach eksploatacyjnych. Jednak badania te dotyczyły szczególnie pomp ciepła typu woda - powietrze. Nieco inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku gruntowych pomp ciepła. Wiadomo jest, że na pracę takiej pompy znaczący wpływ ma rodzaj i konfiguracja gruntowego wymiennika ciepła, który jest źródłem ciepła dla instalacji grzewczej. Praca takich wymienników, ich wydajności, zachowanie się gruntu wokół rur wymiennika a także wpływ warunków atmosferycznych są ze sobą ściśle powiązane. Badania w tym zakresie cały czas są jeszcze niewystarczające. Dotyczy to szczególnie modelowania pracy takiej instalacji i w oparciu o wyniki symulacyjne wykonania projektu oraz doboru rzeczywistych parametrów pracy.

Jako dolne źródło ciepła dla gruntowych pomp ciepła w praktyce stosuje się jeden z trzech najbardziej popularnych rodzajów gruntowych wymienników ciepła. Należą do nich wymienniki poziome liniowe, wymienniki poziome spiralne (slinky) oraz wymienniki pionowe (22). Spośród nich coraz większym zainteresowaniem cieszą się wymienniki spiralne typu slinky. Popularność ta wynika między innymi z ich bardziej kompaktowej budowy w porównaniu z wymiennikami liniowymi, co skutkuje zmniejszonymi wymaganiami co do powierzchni zabudowy terenu oraz mniejszymi kosztami inwestycyjnymi względem wymienników pionowych.

Mimo wzrastających zastosowań poziomego wymiennika spiralnego, jako dolnego źródła ciepła, jego badania są mało zaawansowane. Opracowano dotychczas jeden model matematyczny opisujący pracę wymiennika tego typu (23). Badania doświadczalne wymienników slinky prowadzone były w skali laboratoryjnej (24) (25). Opublikowano niewiele badań prowadzonych



w instalacjach w skali rzeczywistej (26) (27) (28) (29). Mimo, iż badania te pozwoliły na poznanie szeregu właściwości wymienników spiralnych typu slinky, jednak nie są one kompletne i wymagają kontynuacji.

W opinii autora istnieje potrzeba stworzenia modelu matematycznego, który mógłby być zastosowany do określenia wytycznych projektowych związanych z doбором wymiennika spiralnego. Wydaje się, że dobrym narzędziem w osiągnięciu tego celu jest modelowanie i symulacja za pomocą narzędzi komputerowej dynamiki płynów (CFD). Wyniki symulacji CFD dają możliwość dokładnego odwzorowania rzeczywistej pracy gruntowego wymiennika ciepła. Aby jednak taki model był adekwatny, należy przeprowadzić jego walidację sprawdzając wyniki obliczeń symulacyjnych z wynikami badań pracy rzeczywistego wymiennika ciepła. Kolejnym etapem związanym z zastosowaniem walidowanego modelu matematycznego było by wykonanie całego szeregu obliczeń symulacyjnych mających na celu określenie wspomnianych wyżej wytycznych projektowych w modelach o realnej skali. W tym celu trzeba stworzyć procedurę modelowania gruntowych wymienników ciepła w realnej skali.

## Cel i zakres pracy

Mając na uwadze opisaną wcześniej problematykę, związaną z aktualnym stanem wiedzy dotyczącym teoretycznych badań oraz brak wytycznych projektowych gruntowych wymienników ciepła typu slinky<sup>1</sup>, a także brak opracowań co do modelowania wymienników slinky w pełnej skali, postawiono w tej pracy następujące tezy badawcze.

Teza pierwsza: modelowanie matematyczne metodami CFD w wiarygodny sposób opisuje pracę gruntowych wymienników ciepła typu slinky oraz umożliwia wykrycie nowych zależności i cech związanych z ich pracą.

Teza druga: gruntowe wymienniki ciepła typu slinky pod względem uzysku ciepła z jednostkowej powierzchni wymiany ciepła z gruntem są mniej wydajne od prostych gruntowych wymienników ciepła.

Teza trzecia: symulacja pracy wymiennika w tzw. stanie ustalonym oraz w nieustalonym, ale działającym w sposób ciągły a nie cykliczny, daje niepełny obraz nieadekwatny do rzeczywistości. W celu przeprowadzenia realnej symulacji pracy wymiennika konieczne jest uwzględnienie regeneracji gruntu a to zjawisko ma charakter dynamiczny.

W celu realizacji opisanych powyżej tez badawczych sformułowano plan badań który obejmuje:

1. określenie aktualnego stan wiedzy w temacie rozprawy,
2. zaprojektowanie i zbudowanie terenowego stanowiska badawczego złożonego z jednej pętli gruntowego wymiennika ciepła oraz wykonanie przy jego zastosowaniu badania cyklu pracy wraz z przeprowadzeniem pomiarów doświadczalnych,
3. sformułowanie modelu pierścieniowego źródła ciepła RSM wraz z jego walidacją,
4. wyznaczenie parametrów cieplnych gruntu w którym zainstalowano wymiennik,
5. sformułowanie modelu CFD gruntowego wymiennika ciepła,
6. wykonanie obliczeń symulacyjnych oraz następnie porównanie uzyskanych wyników z wyniki pomiarów terenowych w celu walidacji modelu CFD,
7. wykonanie symulacji wielorzędowego wymiennika metodą CFD,
8. wykonanie symulacji wymienników slinky w kilku wybranych konfiguracjach
9. opracowanie założeń projektowych.

---

<sup>1</sup> W literaturze anglojęzycznej gruntowe horyzontalne spiralne wymienniki ciepła o zwojach ułożonych poziomo występują pod nazwą slinky-coil. Wydaje się, że najłatwiej byłoby po polsku nazywać je wymiennikami poziomymi spiralnymi. Stwarza to jednak problemy ponieważ wymienniki spiralne mogą być to wymienniki o kształcie trójwymiarowej helisy ułożonej poziomo w gruncie, mogą to być wymienniki o takich zwojach jak wymienniki poziome slinky-coil ale o zwojach zorientowanych pionowo lub mogą występować jako odmiana wymienników liniowych gdzie rury wymiennika ułożone są poziomo w kształcie „ślimaka” który przypomina spiralę. W pracy przyjęto, że horyzontalne spiralne wymienniki ciepła o zwojach ułożonych poziomo są nazywane slinky.

Dodatkowo sformułowano uwagi związane z praktycznym aspektem projektowania i użytkowania gruntowego wymiennika ciepła typu slinky.

# 1. Teoria pomp ciepła i gruntowych wymienników ciepła

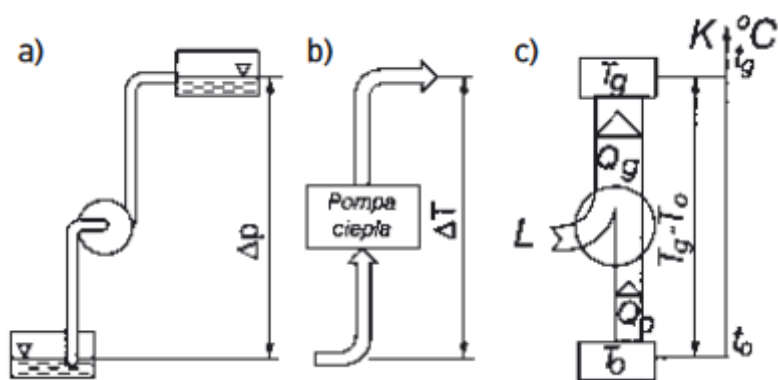
## 1.1. Pompy ciepła

Początek historii powstania urządzenia zwanego pompą ciepła zwykle wiąże się z rokiem 1852, kiedy to William Thomson i James Joule opisali zjawisko ochładzania rozprężającego się gazu. Na bazie ich doświadczenia Carl von Linde w 1876 zaprojektował i zbudował pierwszą chłodziarkę sprężarkową. Już w XX wieku w roku 1945, w USA powstała pierwsza prototypowa instalacja wykorzystująca grunt jako źródło ciepła (GSHP – Ground Source Heat Pump) (30).

Pompa ciepła jest urządzeniem, które transportuje energię w postaci ciepła z ośrodka o niższej temperaturze do ośrodka o wyższej temperaturze. Energia cieplna, zawarta w takich źródłach ciepła jak powietrze, grunt czy woda, z uwagi na niższe temperatury względem temperatur potrzebnych do ogrzewnictwa, nie jest użyteczna w bezpośredniej postaci. Zadaniem pompy ciepła jest pobieranie energii z ośrodka o niższej temperaturze, czyli z tzw. dolnego źródła ciepła i przekazywaniu jej do ośrodka o temperaturze wyższej, czyli do tzw. górnego źródła ciepła. Proces ten nazywany jest „przepompowaniem energii”. Aby mógł być przeprowadzony wymaga dostarczenia pewnej ilości energii. Proces pompowania ciepła może być realizowany w pompach ciepła różnych typów. Można tu wymienić:

- sprężarkowe pompy ciepła,
- absorpcyjne pompy ciepła,
- termoelektryczne pompy ciepła.

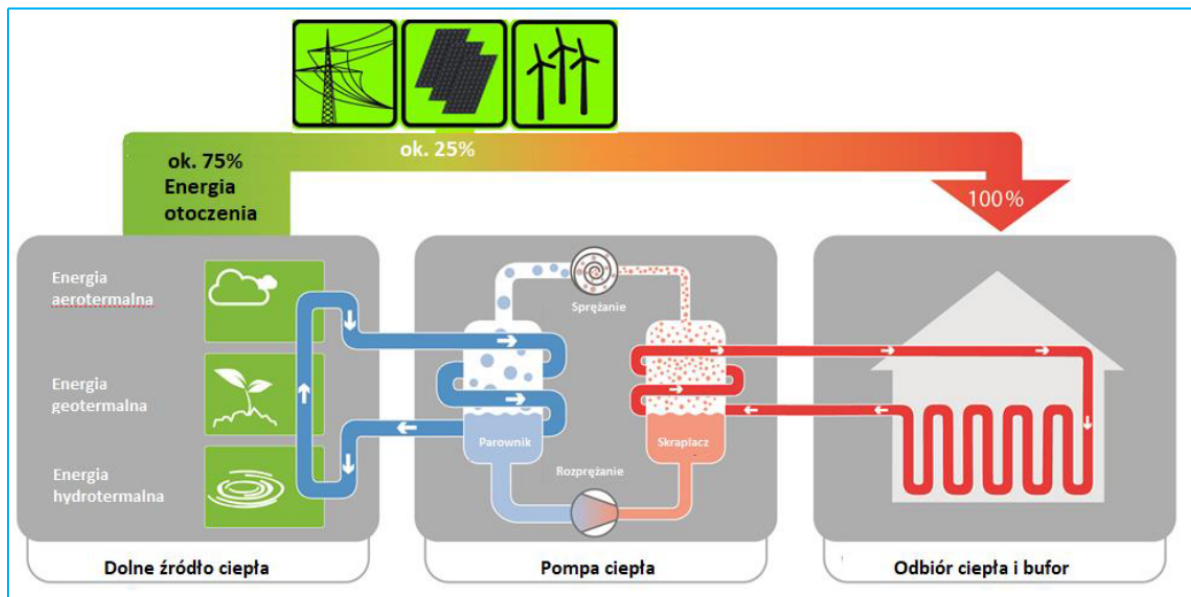
Na rys. 2 przedstawiono analogię transportu cieczy i ciepła wraz z wykresem Sankeya przedstawiającym bilans energetyczny tego procesu.



Rys. 2. Analogia transportu cieczy i ciepła, a) transport cieczy, b) transport ciepła, c) spiętrzanie temperatury na skutek dostarczania pracy (31)

W instalacjach pozyskujących ciepło z otoczenia stosuje się głównie sprężarkowe pompy ciepła. W swoim działaniu realizują one termodynamiczny obieg Lindego. Ciepło z dolnego źródła ciepła jest pobierane przez czynnik transportujący i za jego pomocą przekazywane jest do

parownika. W parowniku ciepło przekazywane jest do ciekłego czynnika roboczego znajdującego się tam pod stałym, niskim ciśnieniem, następuje jego odparowanie. Następnie w postaci pary czynnik roboczy trafia do sprężarki, gdzie jego ciśnienie a co za tym idzie energia wewnętrzna i temperatura rosną. Następnie w skraplaczu, para pod wysokim, stałym ciśnieniem skraplając się oddaje ciepło do medium będącego górnym źródłem ciepła. Następnie przez zawór rozprężny, kapilarę lub turbinę rozprężną, ciekły czynnik roboczy trafia z powrotem do parownika i cały cykl powtarza się (32). Schematycznie działanie pompy ciepła przedstawiono na rys 3.



Rys. 3. Schemat działania pompy ciepła

Sprężarkowe pompy ciepła dzielą się zwykle na:

- powietrzne pompy ciepła w układach: powietrze – powietrze, powietrze – woda,
- gruntowe pompy ciepła w układach: grunt - powietrze, grunt – woda, woda – woda.

Zdefiniowano pewne współczynniki określające prace pomp ciepła. W celu opisanie wydajności pompy ciepła stosuje się tzw. współczynnik sprawności COP (*Coefficient of Performance*) zdefiniowany wzorem [1]:

$$COP = \frac{Q_g}{L} \quad [1]$$

Współczynnik COP jest najwyższy wtedy, gdy praca sprężarki jest minimalna tj. gdy  $L = L_{\min}$ .

Pracę minimalną można zdefiniować wyrażeniem [2]:

$$L_{\min} = Q_g \frac{T_g - T_d}{T_g} \quad [2]$$

Wówczas, po pominięciu strat, współczynnik COP pompy ciepła jest równy współczynnikowi COP jak dla obiegu Carnota [3]:

$$COP_{\max} = \frac{T_g}{T_g - T_d} = COP_C \quad [3]$$

Współczynnik COP wyznaczany jest zgodnie z normami (33), (34) i (35). Należy zwrócić uwagę, iż cytowana tutaj Norma PN-EN 14511 nie uwzględnia parametrów pracy na przestrzeni całego sezonu grzewczego, a więc zmiennego obciążenia cieplnego i różnic klimatycznych w poszczególnych obszarach kraju. Współczynnik COP jest podany dla konkretnego punktu pracy w danym układzie.

Współczynnikiem bliższym rzeczywistym parametrom efektywności pomp ciepła jest sezonowy współczynnik efektywności tzw. współczynnik SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*). Określa on stosunek ilości energii cieplnej wyprodukowanej w całym sezonie grzewczym do pobranej energii elektrycznej w tym sezonie.

Energię ciepłą potrzebną w sezonie jest dość łatwo określić, bo wynika ona z parametrów budynku, jednak energia elektryczna włożona do jej wyprodukowania jest trudna do określenia. Zwłaszcza przy powietrznych pompach ciepła. Te wspólne warunki określa norma EN 14825.

Współczynnik SCOP przedstawia wartości wyliczane na podstawie przyjętych założeń, mających odzwierciedlać warunki panujące podczas całego sezonu grzewczego. Zatem na SCOP decydujący wpływ ma obciążenie cieplne budynku. Wynika z tego, iż dla tej samej pompy ciepła zamontowanej w dwóch podobnych termicznie budynkach można otrzymać zupełnie inne wartości SCOP. Teoretycznie budynki mogą mieć to samo zapotrzebowanie na moc grzewczą, ale oczekiwana temperatura wewnętrzna może być różna. Wpłynie to na wartość tego współczynnika. Wpływ na współczynnik SCOP mają również położenie geograficzne w konkretnej strefie klimatycznej oraz wahania temperatury, które w naszym klimacie, bywają duże. Wynika z tego że SCOP nie jest idealnym wskaźnikiem pokazującym sprawność pompy ciepła.

Kolejnym współczynnikiem stosowanym do opisu pracy pompy ciepła jest współczynnik nazwany Sezonowym Wskaźnikiem Efektywności SPF (*Seasonal Performance Factor*). Zdefiniowany jest wzorem [4]:

$$SPF = \frac{Q_g}{E} \quad [4]$$

Współczynnik ten opisuje rzeczywisty stosunek ilości ciepła dostarczonego do instalacji w sezonie grzewczym do ilości energii elektrycznej pobranej przez sprężarkę w sezonie

grzewczym<sup>2</sup>. Uwzględnia on zatem pracę pompy ciepła podczas warunków, które są zmienne dla całego sezonu grzewczego. SPF jest współczynnikiem mierzonym dla konkretnej instalacji, w konkretnym sezonie grzewczym i przy konkretnych warunkach eksploatacji. Jego wartość dotyczy konkretnej instalacji.

Współczynnik SPF opisuje efektywność pompy w ciągu całego roku. Uwzględnia się tutaj zmiany temperatur zewnętrznych, zmiennego zapotrzebowania na ciepło i CWU w warunkach rzeczywistych. Metody jego wyznaczania są różne w obrębie Unii Europejskiej według różnych wytycznych i norm w Polsce obowiązuje norma PN-EN 15316-4-2:2008.

Wyznaczenie współczynnika SPF pozwala na znajdowanie i weryfikację błędów projektowych i montażowych. Sposób obliczania SPF jest taki sam jak współczynnika SCOP, ale w przeciwieństwie do SCOPu dotyczy rzeczywistych a nie modelowych warunków w jakich pracuje instalacja i obliczany jest na podstawie dokładnie zmierzonego zużycia prądu i ilości dostarczonego ciepła. W idealnych warunkach Współczynnik SCOP i SPF byłyby równe.

W Austrii i Niemczech w powszechnym użyciu są wytyczne/procedury VDI 4640 i dla działających instalacji z pompami ciepła stosuje się roczny współczynnik efektywności energetycznej JAZ (*Jahresarbeitszahl*). Określa się go, jako stosunek wyprowadzonej z urządzenia energii cieplnej do doprowadzonej energii elektrycznej w okresie roku, odniesiony do konkretnej instalacji i budynku. Im wyższa jest sprawność energetyczna instalacji z pompą ciepła, tym wyższy jest roczny współczynnik efektywności energetycznej.

Zarówno współczynnik SPF jak i współczynnik JAZ opisują relację pomiędzy energią elektryczną dostarczoną do pompy ciepła a energią cieplną dostarczoną przez pompę ciepła do instalacji w danym sezonie grzewczym.

Gruntowe pompy ciepła mają większą efektywność niż powietrzne pompy ciepła szczególnie przy niższych temperaturach otoczenia (36). Efektywność energetyczna COP powietrznych pomp ciepła zmniejsza się wraz ze spadkiem temperatury powietrza i dla coraz niższych temperatur zewnętrznych zmierza do jedności. W tych warunkach ilość energii pobieranej z dolnego źródła ciepła jest równa ilości energii zużytej do jego pobrania (37). Natomiast współczynnik COP dla gruntowych pomp ciepła zawsze jest większy od jedności, gdyż stosując grunt jako dolne źródło ciepła istnieje zwykle możliwość zapewnienia stałej, dodatniej temperatury czynnika na wlocie do pompy ciepła. Oczywiście jest to w pewnym stopniu uzależnione od możliwości transportu ciepła w gruncie.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Ponieważ pompa ciepła pobiera energię elektryczną nie tylko do napędu sprężarki ale i innych elementów np. komputera sterującego wyznacza się także współczynnik SPF dla całego układu czyli pompa ciepła plus osprzęt

<sup>3</sup> W zasadzie jeśli grunt będzie mocno wyeksploatowany cieplnie lub gruntowy wymiennik będzie niedowymiarowany a COP pompy gruntowej może być równy jedności.

## 1.2. Wymiana ciepła w gruncie

### 1.2.1. Równanie przewodzenia ciepła w gruncie

Proces przenoszenia ciepła w gruncie jest procesem nieustalonym w czasie. Składają się na niego zjawiska przewodzenia i konwekcji i promieniowania. Dominującym mechanizmem transportu ciepła w gruncie jest na ogół przewodzenie. Zatem proces ten może być opisany za pomocą prawa Fouriera z członem źródłowym, symbolizującym gruntowy wymiennik ciepła [5]:

$$\frac{dQ}{dt} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_v}{\rho \cdot c_p} \quad [5]$$

Rozwiązaniem równania [5] dla przyjętych warunków początkowych i brzegowych jest funkcja [6] będąca rozkładem przestrzennym i czasowym temperatury dla rozpatrywanej objętości gruntu.

$$T = T(x, y, z, t) \quad [6]$$

Dla odpowiednio dobranych warunków brzegowych i początkowych, równanie [5] ma rozwiązania analityczne, natomiast w ogólności rozwiązania takich modeli uzyskuje się z zastosowaniem metod numerycznych.

Sprowadzając rozpatrywany proces do przypadku jednowymiarowego równanie przewodzenia ciepła przyjmuje formę [7]:

$$\frac{dQ}{dT} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}_v}{\rho \cdot c_p} \quad [7]$$

a jego rozwiązanie będzie postaci [8]:

$$T = f(x, t) \quad [8]$$

Wartości pola temperatur, stanowiące rozwiązanie równań [5] i [7] zależą od takich czynników jak: właściwości fizyczne gruntu głównie jego gęstości, przewodnictwa cieplnego, ciepła właściwego, panujących warunków klimatycznych, pory roku, cyklu dobowego promieniowania słonecznego, rzeźby terenu, rodzaju pokrycia gruntu i innych.

Prawo Fouriera stosuje się dla gruntów w których nie występują konwekcyjne ruchy wilgoci oraz przy pominięciu wpływu radiacji.

### 1.2.2. Warunki początkowo - brzegowe

Jak wspomniano w poprzednim punkcie, w celu rozwiązania równania Fouriera należy określić warunek początkowy czyli rozkład temperatury w gruncie najczęściej w chwili początkowej oraz warunki brzegowe na krańcach rozpatrywanego obszaru. Istnieją warunki brzegowe trojakiego rodzaju i mogą określać:



- temperaturę na powierzchni gruntu, jako liczbę, lub jako funkcję czasu – warunek brzegowy pierwszego rodzaju, tzw. warunek Dirichleta,
- strumień ciepła przekazywany przez powierzchnię brzegową rozpatrywanego obszaru – warunek brzegowy drugiego rodzaju, tzw. warunek Newmana [9]:

$$\dot{q} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [9]$$

- temperaturę otoczenia i warunki wnikania ciepła na powierzchni zewnętrznej rozpatrywanego obszaru – warunek brzegowy trzeciego rodzaju, zwany warunkiem Fouriera [10].

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_o) \quad [10]$$

Spośród wyżej wymienionych warunków brzegowych, dla przypadku ruchu ciepła w gruncie stosowany jest warunek Fouriera, gdyż uwzględnia on konwekcyjne przekazywanie ciepła od powietrza do powierzchni gruntu i vice versa. Warunkiem brzegowym stosowanym na pewnej głębokości gruntu jest zazwyczaj warunek Dirichleta gdzie przyjmuje się stałą niezakłóconą temperaturę (*undisturbed temperature*).

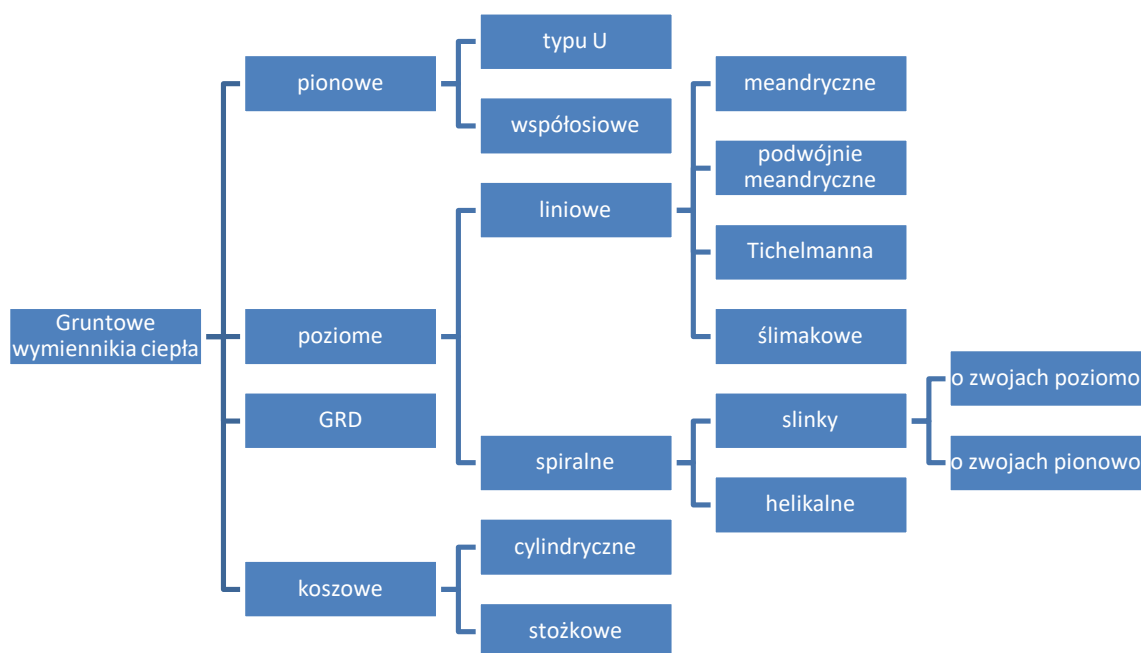
### 1.3. Gruntowe wymienniki ciepła będące dolnym źródłem ciepła lub chłodu

W celu realizowania poboru ciepła z gruntu stosuje się dwa systemy w których pracują pompy ciepła. Są to:

- system zamknięty w którym ciepło jest pobierane z gruntu poprzez przeponowy wymiennik ciepła
- system otwarty w którym ciepło pobierane jest bezpośrednio z nośnikiem ciepła np. wodą ze studni głębinowej, basenu itp.

System zamknięty zwykle realizowany jest poprzez gruntowy wymiennik ciepła.

W praktyce stosuje się wiele rodzajów gruntowych wymienników ciepła. Przedstawiono ogólny podział, który zdaniem autora w jasny sposób klasyfikuje gruntowe wymienniki ciepła pod względem geometrii (rys.4).



Rys. 4. Klasyfikacja gruntowych wymienników ciepła ze względu na ich aranżację w gruncie

Poziome wymienniki slinky których dotyczy niniejsze opracowanie dodatkowo dzielą się na wymienniki o zwojach rozłącznych (*extended*), ułożonych stycznie i zachodzących na siebie.

### 1.3.1. Pionowe gruntowe wymienniki ciepła

Pionowe GWC to wymienniki w postaci U – rurki lub rury współosiowej umieszczonej w pionowym odwiercie w gruncie. Zazwyczaj wymienniki pionowe pracują w układach wielokrotnych i są sprzęgane równolegle. Umożliwiają one osiągnięcie wydajności cieplnych na poziomie 20 – 84 W na metr bieżący kolektora (38). Przeszkodą w stosowaniu tego typu wymienników są zwykle wysokie koszty inwestycyjne związane z prowadzeniem prac wiertniczych oraz uzyskanie stosownych pozwoleń.

### 1.3.2. Poziome gruntowe wymienniki ciepła

Wymienniki te charakteryzują się łatwością wykonania, związaną z płytkim ułożeniem instalacji oraz brakiem wymagania pozwolenia na budowę. Ich cechą są także dużo niższe koszty instalacji w porównaniu z wymiennikami pionowymi. Możemy je podzielić na:

- wymienniki liniowe - układane meandrycznie, podwójnie meandryczne, w kształcie ślimaka i układzie Tichelmana,
- wymienniki spiralne (*slinky*) – o zwojach ułożonych poziomo lub pionowo w rzędach pojedynczych lub wielorzędowo, o zwojach ułożonych rozłącznie, stycznie lub zachodząco na siebie,
- wymienniki spiralne helikalne.

Wymienniki poziome wykonane z rur z tworzywa, rzadziej z rur wielowarstwowych, kompozytowych czy metalowych (miedzianych). Instalowane są do głębokości 3 metrów poniżej powierzchni gruntu. W Polsce zasadą jest montowanie ich 20 centymetrów poniżej strefy przemarzania gruntu zgodnie z normą BN-83/8836-02, PN-81/B-03020 i in. Maksymalne długości pętli wymiennika to 100 – 200 m.

### **1.3.3. Wymienniki gruntowe wykonane technologią GRD**

Technologia GRD (*Geothermal Radial Drilling*) charakteryzuje się wykonywaniem wielu odwiertów wykonywanych promieniowo pod różnymi kątami (35 – 65 stopni) względem pionu. Długość pojedynczego odwiertu może dochodzić do 40 - 60 m. W standardowej studni wykonuje się do 20 odwiertów. Wtedy otrzymuje się ok. 1200 m zainstalowanych rur wymiennika. Taki układ może być stosowany w instalacjach o zapotrzebowaniu na moc do 50 kW z jednej studni.

### **1.3.4. Koszowe gruntowe wymienniki ciepła**

Koszowe gruntowe wymienniki ciepła są rozwiązaniem, które stosuje się szczególnie tam gdzie utrudnione jest wykonanie innych typów wymienników gruntowych. Wymienniki takie mogą być cylindryczne lub stożkowe. Podobne jak w przypadku wymienników poziomych nie ma wymagań prawnych co do ich instalacji.

## **1.4. Wymienniki ciepła typu slinky**

Z pośród wymienionych wyżej rodzajów wymienników ciepła, w ciągu ostatnich kilkunastu lat dużą popularność zyskały spiralne wymienniki slinky ze zwojami ułożonymi poziomo. Ich cechą charakterystyczną jest bardziej zwarta budowa w porównaniu z innym popularnym typem wymienników jakim są wymienniki liniowe. Porównując je natomiast z wymiennikami pionowymi należy zauważyć, iż ich zaletą jest brak konieczności uzyskania pozwolenia budowlanego i zdecydowanie niższy koszt instalacji. Dużą zaletą jest też łatwość montażu rur wymiennika spiralnego. Zwykle rury są układane spiralnie w wykopach przez ich rozciągnięcie bezpośrednio z kłębka. Średnica pętli wynika zazwyczaj ze średnicy rury na kłębku. Stąd charakterystycznym jego wymiarem w Polsce są pętle o średnicy około jednego metra. Materiałami stosowanymi do wykonania rur wymiennika są tworzywa PE i PU. Dużo lepsze parametry cieplne mają rury warstwowe z tworzywa sztucznego z wewnętrznym płaszczem aluminiowym lub miedzianym. Czynnikiem ograniczającym ich powszechne zastosowanie jest m. in. cena.

Dużą zaletą spiralnych wymienników ciepła jest możliwość gęstego upakowania rur a co za tym idzie mniejsza powierzchnia gruntu na której wymiennik ma być zainstalowany. Wadą natomiast jest duża całkowita długość rur i związana z tym większa strata ciśnienia niezbędnego

do transportu cieczy roboczej. Jednocześnie jednak spiralny kształt wymiennika eliminuje nagłe zmiany kierunku przepływu co ogranicza wartość oporów miejscowych w rurociągu. W praktyce maksymalnie stosowane długości rur to około 200 metrów. Wydłużenie rury spowodowałoby bowiem nadmierny wzrost oporów przepływu. Jeśli istnieje potrzeba dłuższych odcinków wymiennika to wtedy stosuje się wielorzędowe wymienniki typu slinky połączone równolegle. Niestety wadą równoległego ich połączenia może być wzajemny wpływ poszczególnych rzędów na profile temperatur w gruncie w przypadku ich zbyt bliskiego ułożenia. Następuje wtedy interferencja co może skutkować spadkiem wydajności.

Pętle wymiennika można rozsuwać dowolnie od położenia w którym zachodzą na siebie, poprzez położenie styczne, aż po położenie rozłączne. Najczęściej spotykanym ułożeniem pętli jest ułożenie poziome. Możliwe jest także pionowe instalowanie wymiennika czyli umieszczenie pętli w wąskich pionowych wykopach. W układzie poziomym wykopy mają zwykle szerokość porównywalną ze średnicą pętli. Natomiast w pionowym szerokość wykopów jest znacznie mniejsza i wynosi 0.15 – 0.3 m.

Parametry instalacyjne takie jak długość rur wymiennika, rozstaw pętli wymiennika w linii oraz rozstaw linii względem siebie, wpływają na wydajność cieplną wymiennika. Istnieje zatem potrzeba badania tych układów. Można tego dokonać poprzez sformułowanie modelu matematycznego oraz przeprowadzenie symulacji pracy takiego wymiennika. Następnie na bazie uzyskanych wyników można podejmować próbę opracowania wytycznych co do projektowania geometrii wymienników typu slinky. Wyniki symulacji umożliwiają także przewidywanie ich wydajności cieplnej szczególnie dla krótkiego okresu oraz wieloletniego użytkowania.

## 2. Aktualny stan wiedzy o gruntowych spiralnych wymiennikach typu slinky

Badanie i modelowanie pracy gruntowych wymienników ciepła typu slinky jest zagadnieniem złożonym. Wynika to głównie z ich różnorodnej i skomplikowanej geometrii. Dodatkowym utrudnieniem jest nieustannie zmieniające się pole temperatury w otoczeniu wymiennika wynikające z warunków cieplnych w gruncie, wpływu klimatu na te warunki i sposobu eksploatacji.

### 2.1. Badania istniejących wymienników

Pierwszym, naturalnym sposobem badania pracy gruntowych wymienników ciepła są pomiary i doświadczenia wykonywane na istniejących wymiennikach, zarówno tych już pracujących w instalacjach grzewczych, jak i prototypowych instalacjach terenowych w skali półtechnicznej czy laboratoryjnej. Badania takie zazwyczaj dotyczą pomiarów temperatury mediów wpływających i wypływających z wymiennika oraz pomiarów temperatur w gruncie w wybranych punktach wokół wymiennika oraz określania ich wydajności cieplnej. Instalacje pracujące w układach rzeczywistych można badać w dłuższej skali czasowej, natomiast instalacje doświadczalne, czy w mniejszej skali służą do badań w krótszej skali czasowej. Badania laboratoryjne pozwalają także porównywać wymienniki slinky z innymi typami wymienników.

W pracy (28) omówiono badania wymienników ciepła typu slinky pracujących w instalacjach pomp ciepła w budynkach użyteczności publicznej na terenie Republiki Czeskiej. Stwierdzono że wymienniki te mogą być stabilnym źródłem ciepła.

Yoon i in. w pracy (24) przedstawili rezultaty badań eksperymentalnych, w których analizowano ilość wymienianego ciepła dla trzech typów wymienników gruntowych tj. wymiennika slinky, liniowego typu U oraz spiralnego. Wymienniki te były umieszczone w stalowych skrzyniach zasypanych piaskiem. Porównywano wydajność wymienników dla jednakowej długości rury wymiennika oraz dokonano analizy ekonomicznej poszczególnych instalacji.

Pauli i in. w pracy (26) zaprezentowali analizę zmian rozkładu temperatury w gruncie z zainstalowanymi poziomymi wymiennikami gruntowymi typu liniowego i typu slinky. Wyniki symulacji porównano z pomiarami strumieni ciepła pozyskanego z gruntu podczas sezonu grzewczego.

W pracy (29) porównywano parametry pracy wymienników slinky o zwojach ułożonych poziomo i pionowo.

## 2.2. Badania modelowe wymienników

Celem obliczeń symulacyjnych gruntowych wymienników ciepła jest wyznaczenie długości rur, powierzchni zabudowy takiego wymiennika, konfiguracji w gruncie, jego wydajności cieplnej oraz rozkładu temperatur w gruncie wokół wymiennika i tendencji zmian tych rozkładów w czasie. Wartości tych parametrów i zmiennych mają kluczowy wpływ na cały system w którym pracuje gruntowa pompa ciepła. Analizując postęp prac badawczych w tym zakresie można zauważyć stosowanie przez badaczy modeli klasycznych zwanych analitycznymi oraz modeli wykorzystujących metody CFD.

### 2.2.1. Modelowanie klasyczne wymienników slinky

Modele analityczne stosowane do opisu pracy wymiennika to modele sformułowane dla stanu ustalonego, dla wymienników liniowych w których wprowadzono odpowiednie poprawki (39). Nowym modelem sformułowanym mającym zastosowanie dla wymienników typu slinky przez Xiong'a (23) jest model tzw. pierścieniowego źródła ciepła RSM (*Ring Source Model*). Umożliwia on modelowanie pracy wymienników ciepła typu slinky, zarówno jako chwilowego, jak i ciągłego źródła ciepła. Model ten umożliwia wyznaczenie zmian temperatur w czasie wokół pierścienia umieszczonego w ciele nieskończonym. Autor opracował rozwinięcie tego modelu, które pozwala na obliczanie parametrów wymienników slinky dla wielu zwojów oraz w ciele półnieskończonym z warunkiem izotermiczności powierzchni.

### 2.2.2. Uwagi o pracach wykorzystujących metody CFD

Innym sposobem numerycznej analizy pracy opisywanych wymienników ciepła jest zastosowanie metod komputerowej dynamiki płynów CFD. Dzięki rozwojowi technik komputerowych oraz zwiększeniu wydajności obliczeniowej komputerów, użycie metod CFD stało się ostatnich latach bardzo popularne (40) (41) (25) (30) (42) (43) (27). W niniejszej pracy do analizy działania gruntowego wymiennika ciepła zastosowano obydwaj typy modeli, model analityczny pierścieniowego źródła ciepła RSM oraz modele wykorzystujące obliczeniową dynamikę płynów CFD.

Jak już wspomniano, wraz ze wzrostem mocy obliczeniowych komputerów pojawiło się wiele prac związanych z zastosowaniem metod CFD do analizy pracy gruntowych spiralnych wymienników ciepła. Poniżej przedstawiono opis i analizę wybranych prac.

W pracy (27) autorzy przedstawili wyniki badań horyzontalnego wymiennika typu slinky oraz wyniki obliczeń symulacyjnych z zastosowaniem metod CFD. Badano m. in. wpływ średnic i odstępów pętli na wydajność wymiennika. W wyniku obliczeń uzyskano rozkłady temperatur w gruncie. Maksymalne różnice między wynikami pomiarów i modelowania nie były większe niż 1

stopień Celsjusza. Zastosowano uproszczenie w postaci stałej temperatury ścianki wymiennika oraz uproszczony model wymiennika slinky będący połową pętli.

W pracy (44) przedstawiono wyniki badań horyzontalnego wymiennika typu slinky oraz obliczeń symulacyjnych jego dwuwymiarowego modelu CFD. Brano w nich pod uwagę zmiany właściwości cieplnych gruntu, warunków zewnętrznych oraz temperatury zewnętrznej ścianki rury wymiennika. Wymiennik badano dla ciągłych warunków pracy oraz dla eksploatacji cyklicznej. Zastosowano dwuwymiarowy model CFD nie oddający kształtu pętli wymiennika.

Congedo i in. w pracy (30) stosując modelowanie CFD dokonali analizy porównawczej trzech typów wymienników poziomych: liniowego, slinky i heliakalnego. Brano pod uwagę m. in. odstęp między pętlami wymiennika i głębokość montażu. Symulację prowadzono dla okresu zimowego i letniego oraz dla warunków klimatycznych rejonu południowych Włoch. Niejasny jest, zastosowany przez autorów, warunek wymiany ciepła między gruntem a wymiennikiem. W pracy zastosowano model w którym temperatura cieczy opuszczającej wymiennik jest powiązana sztywno z temperaturą gruntu, co wprawdzie daje możliwość porównywania wydajności różnych wymienników między sobą, jednak w opinii autora rozprawy nie pozwala na określenie wydajności cieplnej takiego wymiennika.

Chong i in. w pracy (43) przedstawili wyniki modelowania CFD poziomych wymienników slinky o zwojach zorientowanych horyzontalnie i pionowo. Badano wpływ odstępów między pętlami. Porównywano także nakłady energii na prace związane z wykopami w gruncie koniecznymi do wykonania na potrzeby montażu poszczególnych konfiguracji wymienników. Wyniki tych studiów wykazały, iż głębokość instalacji wymiennika slinky o zwojach pionowych ma mały wpływ na wydajność cieplną systemu. Autorzy przyjęli założenie o stałej temperaturze wymiennika a model CFD był uproszczony i składał się z połowy pętli.

W pracy (42) zamieszczono wyniki symulacji numerycznych metodami CFD trójwymiarowego wymiennika spiralnego i przedstawiono jego wydajność cieplną w różnych konfiguracjach. Badania były prowadzone dla pięciu rozstawów pętli, trzech średnic pętli oraz trzech gruntów różniących się właściwościami cieplnymi. Analizowano ilości transportowanego ciepła, ilości zapotrzebowania na materiał rur oraz nakładów pracy związanej z wykopami. Autorzy przyjęli założenie o stałej temperaturze ścianki wymiennika, modele ograniczały się do 1 – 2 pętli. Przyjęto stałą temperaturę powierzchni gruntu.

Kim i in. (25) przedstawili rezultaty badań eksperymentalnych oraz modelowania CFD porównując wydajności cieplne wymiennika slinky i heliakalnego. Wymienniki te były umieszczone w stalowych skrzyniach zasypanych piaskiem. Stosując modelowanie CFD badano

wpływ średnicy rury oraz przewodnictwa cieplnego gruntu na ilość ciepła wymienianego przez wymiennik. Autorzy nie podali dokładnych danych zastosowanego modelu numerycznego.

Selamat i in. (41) przedstawili wyniki symulacji pracy równoległych wymienników typu slinky dla wybranych parametrów otoczenia. Badania miały na celu symulację realistycznych warunków pracy wymienników. Analizowano wymienniki o rurach wykonanych z różnych materiałów. Obliczenia prowadzono dla procesu nagrzewania i chłodzenia gruntu. Symulowano pracę jednej pętli wymiennika. W pracy (40) ci sami autorzy przedstawili badania trzech konfiguracji wymiennika slinky oraz wymiennika liniowego. Symulacje prowadzono dla okresu 5 dni czasu trwania procesu. Wyniki porównano z danymi pomiarowymi. Wykazano różnice w wydajności cieplnej badanych wymienników.

Dotychczasowe badania wymienników slinky zarówno doświadczalnie jak numeryczne dały szereg informacji co do ich właściwości. Pozostaje jednak szereg niewiadomych. Zdaniem autora obecnie nie sformułowano procedury obliczeniowej pozwalającej na dobór i przewidywanie pracy wymienników slinky w układach grzewczych.



### **3. Badania i modelowanie jednej pętli gruntowego wymiennika ciepła typu slinky**

Modelowanie matematyczne musi pogodzić ze sobą dwie tendencje tj. chęć dokładnego odwzorowania fizyki zachodzących zjawisk oraz możliwość zastosowania sformułowanego modelu w sposób praktyczny. Jak wiadomo wyniki obliczeń symulacyjnych otrzymane przy zastosowaniu modelu matematycznego są tak dokładne jak dokładnie sformułowany model odzwierciedla rzeczywistość. Jednak należy tak formułować model matematyczny, by było możliwe jego zastosowanie do celów projektowych i inżynierskich bez utraty możliwości opisu pracy badanego urządzenia w warunkach rzeczywistych. Model nie może być prostszy niż to konieczne. Metodą sprawdzenia adekwatności modelu jest jego weryfikacja doświadczalna. Porównując wyniki pomiarów dokonanych na stanowisku doświadczalnym z wynikami obliczeń symulacyjnych, można wysnuć wniosek na temat przydatności sformułowanego modelu matematycznego do przewidywania jego pracy w innych warunkach niż eksperymentalne i projektowania wymienników które mają być instalowane w gruncie i eksploatowane w realnych instalacjach. Poza adekwatnym modelem matematycznym, konieczne jest także określenie parametrów eksploatacji projektowanego gruntowego wymiennika.

W celu zebrania danych doświadczalnych które mogły posłużyć do walidacji sformułowanego modelu analitycznego oraz modelu CFD zaprojektowano i wybudowano terenowe stanowisko badawcze. Stanowisko badawcze umiejscowione zostało na terenie gminy Miasto Jordanów w województwie małopolskim. Składało się ono z poziomego gruntowego wymiennika typu slinky złożonego z jednej pętli oraz z aparatury hydraulicznej, grzewczej i kontrolno-pomiarowej. Wymiennik zainstalowano w gruncie i odpowiednio oprzyrządowano.

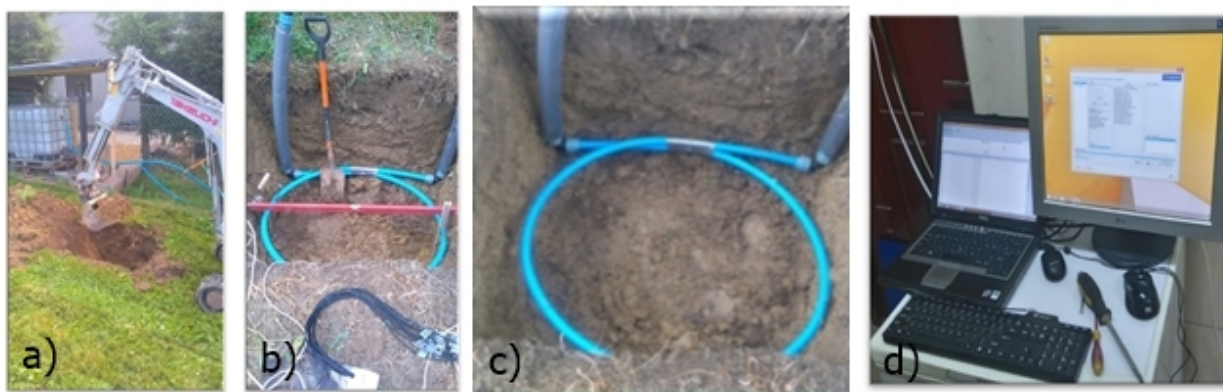
#### **3.1. Badania terenowe**

Pomiary gruntowego wymiennika slinky wykonano w Jordanowie w województwie małopolskim w dniach 5.12.2017 – 7.12.2017. Zainstalowany wymiennik pracował w trybie nagrzewania gruntu. W typowych warunkach pracy gruntowy wymiennik ciepła stanowi dolne źródło ciepła dla pompy ciepła typu ciecz – ciecz. Ma on za zadanie pobierać ciepło z gruntu za pomocą czynnika cyrkulującego w jego wnętrzu. Jednak możliwa jest także praca odwrotna czyli regeneracja gruntu po okresie zimowym lub oddawanie ciepła do gruntu podczas użytkowania instalacji z pompa ciepła w celach klimatyzacji pomieszczeń. Wtedy grunt jest nagrzewany przez ciecz dostarczaną np. z pomp ciepła pracujących z tzw. Odwróconym obiegiem, urządzeń klimatyzacyjnych itp. Sytuacja taka jest łatwiejsza do zasymulowania w warunkach terenowych gdyż nie wymaga podłączenia pompy ciepła a jedynie źródła ciepła np. kotła lub innego

podgrzewacza. Od strony modelowej różnica polega jedynie na zmianie warunków eksploatacji w taki sposób aby uzyskać odpowiedni dla eksperymentu kierunek ruchu ciepła od wymiennika do gruntu.

### 3.1.1. Stanowisko Pomiarowe

Przed przystąpieniem do eksperymentu przeprowadzono konieczne prace instalatorskie oraz przetestowano stanowisko badawcze. Następnie w celu ustalenia się temperatury w gruncie naruszonym podczas prac instalatorskich odczekano pięć dób. Krótka dokumentacja fotograficzna wykonanych prac została przedstawiona na rys. 5.

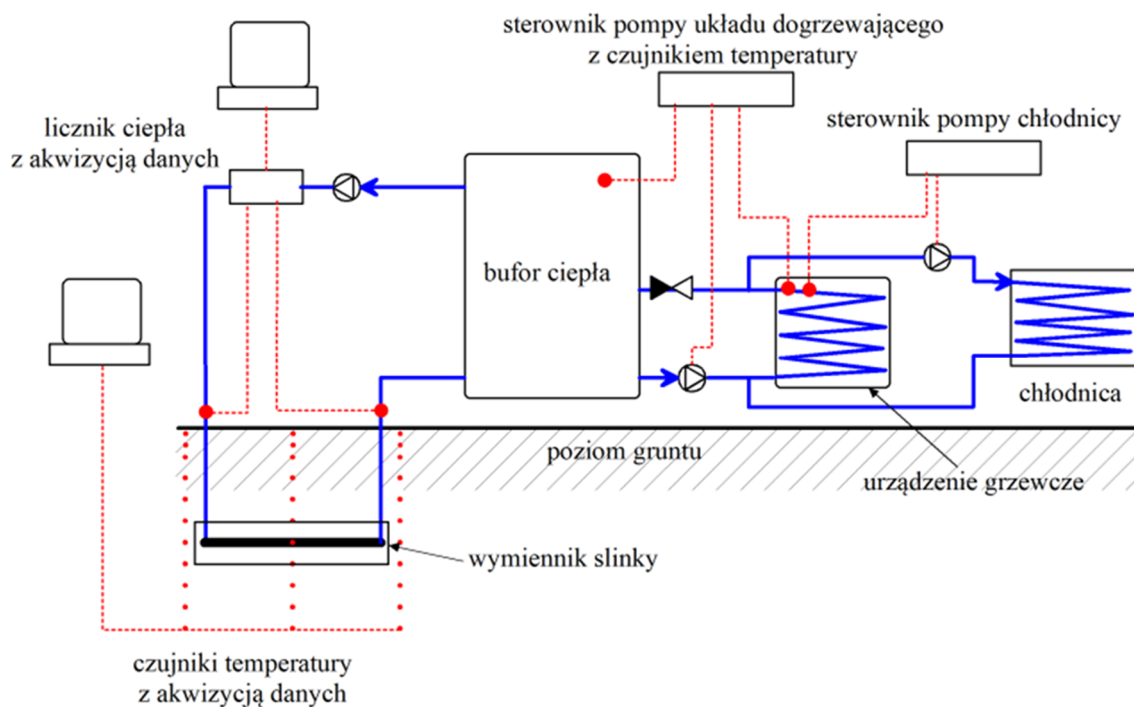


Rys. 5. Badania terenowe, a) wykopy pod wymiennik, b) posadowienie wymiennika i czujników w gruncie, c) wymiennik slinky, d) stanowisko akwizycji danych

Centralnym elementem stanowiska była instalacja grzewczo - pomiarowa. Układ ten składał się z następujących elementów:

- źródła ciepła,
- bufora wodnego o pojemności 1000 L,
- pompy obiegowej układu grzewczego,
- pompy obiegowej gruntowego wymiennika ciepła,
- gruntowego wymiennika ciepła,
- licznika ciepła Apator LQM III zintegrowanego z przepływomierzem CQM III,
- czujników Dallas 18B20,
- stanowiska akwizycji danych,
- armatury hydraulicznej,
- sterowników elektronicznych.

Schemat instalacji przedstawiono na rys. 6.



**Rys. 6. Schemat instalacji pomiarowej**

Zasada działania instalacji grzewczo - pomiarowej była następująca. Urządzeniem grzewczym był kocioł wyposażony w układ sterujący (rys. 7). Kocioł nagrzewał wodę w buforze ciepła pełniącą rolę czynnika roboczego pracującego w gruntowym wymienniku ciepła. Nagrzewanie bufora następowało gdy temperatura kotła osiągała 40 °C. Wtedy pompa cyrkulacyjna uruchomiana przez system sterowania przetłaczała czynnik roboczy między kotłem a buforem ciepła w celu jego nagrzania. W przypadku przegrzania kotła, sterownik wyłączał wentylator tłoczący powietrze na palenisko kotła. Pełne nagrzanie bufora ciepła trwało około 3,5 godziny. Temperatura cieczy roboczej w buforze, utrzymywana była przez sterownik sprzężony z pompą cyrkulacyjną między buforem ciepła a kotłem oraz z pompą cyrkulacyjną pomiędzy buforem ciepła a chłodnicą. Temperatura zadana w buforze ciepła wносиła 55 °C i utrzymywana była z dokładnością 0,5 °C.

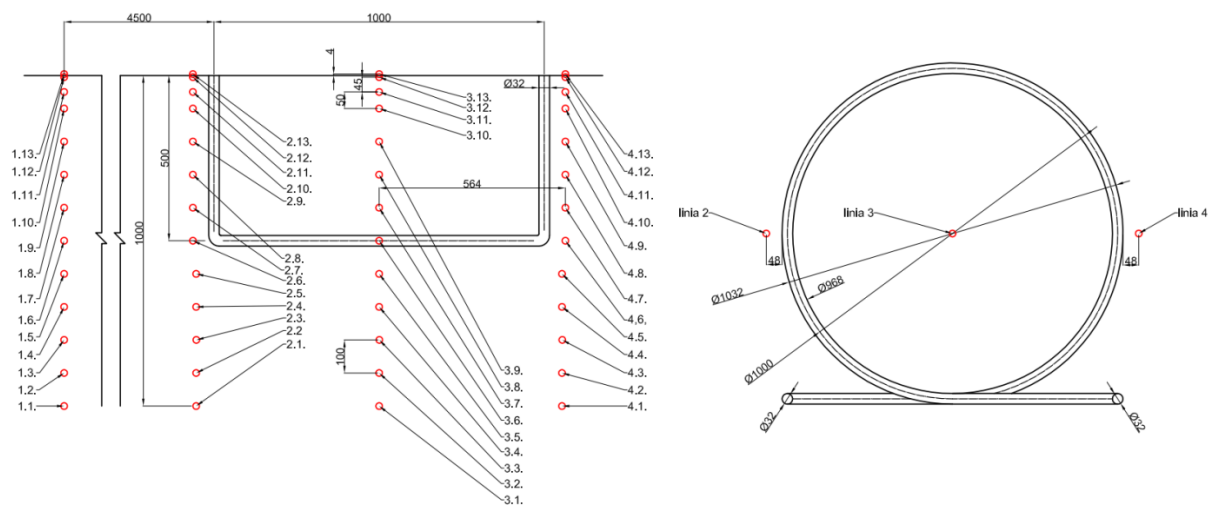


**Rys. 7. Kocioł wykorzystywany do grzania bufora**

Od strony gruntowego wymiennika ciepła typu slinky zainstalowana została pompa cyrkulująca czynnik roboczy poprzez przepływomierz i wymiennik gruntowy. Woda o temperaturze około 55 °C nagrzewała grunt w otoczeniu wymiennika i powracała do bufora. Na zasilaniu i powrocie czynnika grzewczego z wymiennika ciepła umieszczono dwa czujniki temperatury zintegrowane z licznikiem ciepła. W gruncie umieszczono cztery linie czujników temperatury po 13 sztuk w każdą. Rozmieszczenie czujników prezentują tabela 1 i rys. 8.

**Tabela 1. Numeracja czujników w gruncie - czarna poziom instalacji wymiennika = 50 cm**

Głębokość [cm]	Numer czujnika			
	Linia 1	Linia 2	Linia 3	Linia 4
100	1.1.	2.1	3.1.	4.1.
90	1.2.	2.2.	3.2.	4.2.
80	1.3.	2.3.	3.3.	4.3.
70	1.4.	2.4.	3.4.	4.4.
60	1.5.	2.5.	3.5.	4.5.
50	1.6.	2.6.	3.6.	4.6.
40	1.7.	2.7.	3.7.	4.7.
30	1.8.	2.8.	3.8.	4.8.
20	1.9.	2.9.	3.9.	4.9.
10	1.10.	2.10.	3.10.	4.10.
5	1.11.	2.11.	3.11.	4.11.
1	1.12.	2.12.	3.12.	4.12.
0	1.13	2.13	3.13	4.14



**Rys. 8. Rozmieszczenie czujników w gruncie**

Czujniki w Linii 1 były czujnikami mierzącymi temperatury odniesienia i zostały umieszczone w gruncie w takiej odległości, aby ich wskazania nie były zakłócone przez

wymiennik. Pozostałe czujniki tj. linie 2, 3 i 4 mierzyły temperatury w otoczeniu wymiennika. Czujniki w linii 2 i 4 umieszczone były w pobliżu rury wymiennika a czujniki linii 3 w osi pętli wymiennika. Czujniki umieszczone zostały od poziomu gruntu do głębokości 100 cm. Kolejno na głębokości 0 cm, 1 cm, 5 cm 10 cm i dalej co 10 cm aż do głębokości jednego metra.

Akwizycja danych pomiarowych prowadzona była przez dwa komputery klasy PC. Jeden komputer archiwizował dane pomiarowe z ciepłomierza Apator LQM III. Za pomocą tego urządzenia określano strumień ciepła oddawany do gruntu. Dokonywano pomiaru masowego natężenia cieczy przepływającej w rurze wymiennika gruntowego oraz różnicy temperatur na wlocie i wylocie z wymiennika (rys. 9). Do obsługi ciepłomierza zastosowano oprogramowanie producenta Apator FlatStandard 1.5.24 Demo.



**Rys. 9. Licznik ciepła Apator LQM III ze zintegrowanym przepływomierzem CQM III**

Za pomocą drugiego komputera prowadzono akwizycje danych pomiarowych z cyfrowych czujników temperatury Dallas Maxim DS18B20 (rys. 10) umieszczonych w gruncie. Czujniki te cechują się szerokim zakresem pomiarowym (- 55 °C do + 125 °C) oraz stosunkowo dużą dokładnością wynoszącą +/- 0.5 °C. Przesyłanie danych odbywało się cyfrowym protokołem przesyłu danych 1 – Wire umożliwiającym podpięcie wielu czujników jednym przewodem.



**Rys. 10. Czujnik DS18B20 wersja bez pancerza i w obudowie hermetycznej**

W celu wykonania pomiarów ciepła w gruncie wykorzystano wersję czujników zaopatrzoną w hermetyczny pancierz. Do odczytu temperatur wykorzystano darmowe oprogramowanie LogTemp firmy MR SOFT.

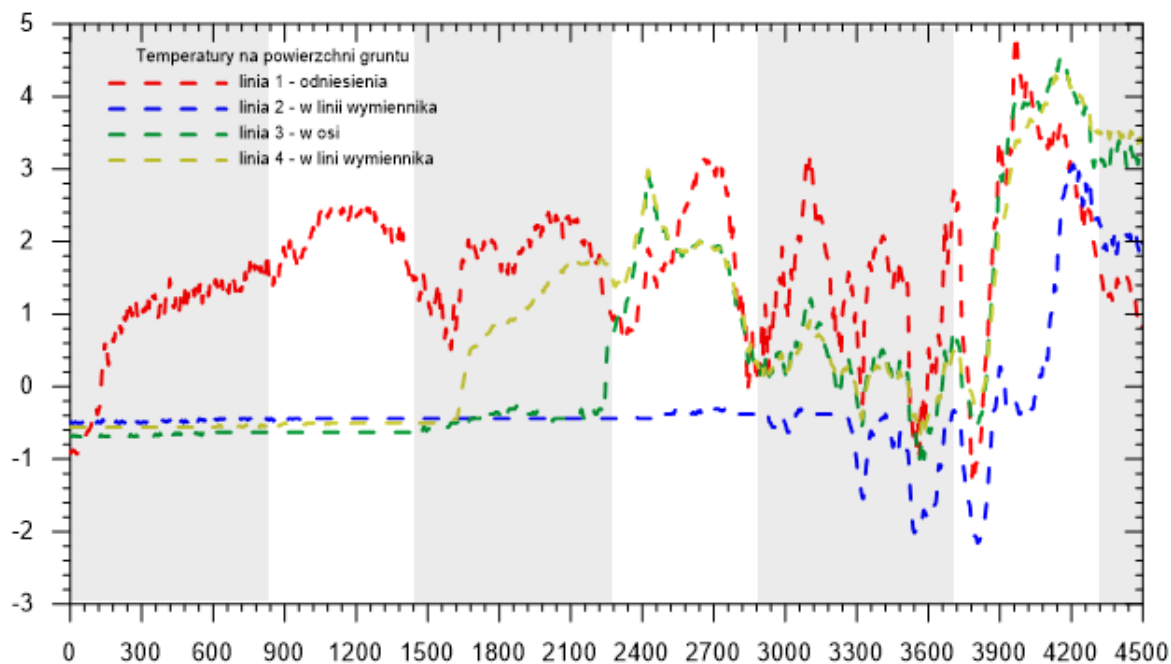
Pętlę gruntowego wymiennik ciepła wykonano ze standardowej tzw. „niebieskiej” rury polietylenowej o średnicy zewnętrznej 32 mm stosowanej powszechnie do ich konstrukcji. Wymiennik został zainstalowany na głębokości 50 centymetrów poniżej poziomu gruntu. Długość pętli wymiennika wynosiła 4,14 m. Zatem powierzchnia wymiany ciepła wynosiła 0,0003 m<sup>2</sup>. Pionowe elementy przyłączeniowe zostały zaizolowane.

### 3.1.2. Eksperyment

Po przygotowaniu stanowiska badawczego, wykonaniu stosownych testów oraz po ustabilizowaniu się temperatury gruntu oraz wykonaniu wszystkich prac instalatorskich, przystąpiono do wykonania zaplanowanego doświadczenia. Doświadczenie polegało na ciągłym nagrzewaniu gruntu wodą o temperaturze 55 °C przez czas 72 godzin. Podczas tego procesu mierzono w sposób opisany w poprzednim punkcie następujące parametry procesowe:

- temperaturę w gruncie przez 48 czujników i temperaturę na powierzchni gruntu przez 4 czujniki
- zmiany temperatury na wlocie i na wylocie z wymiennika
- strumień masowy cieczy przepływającej przez wymiennik

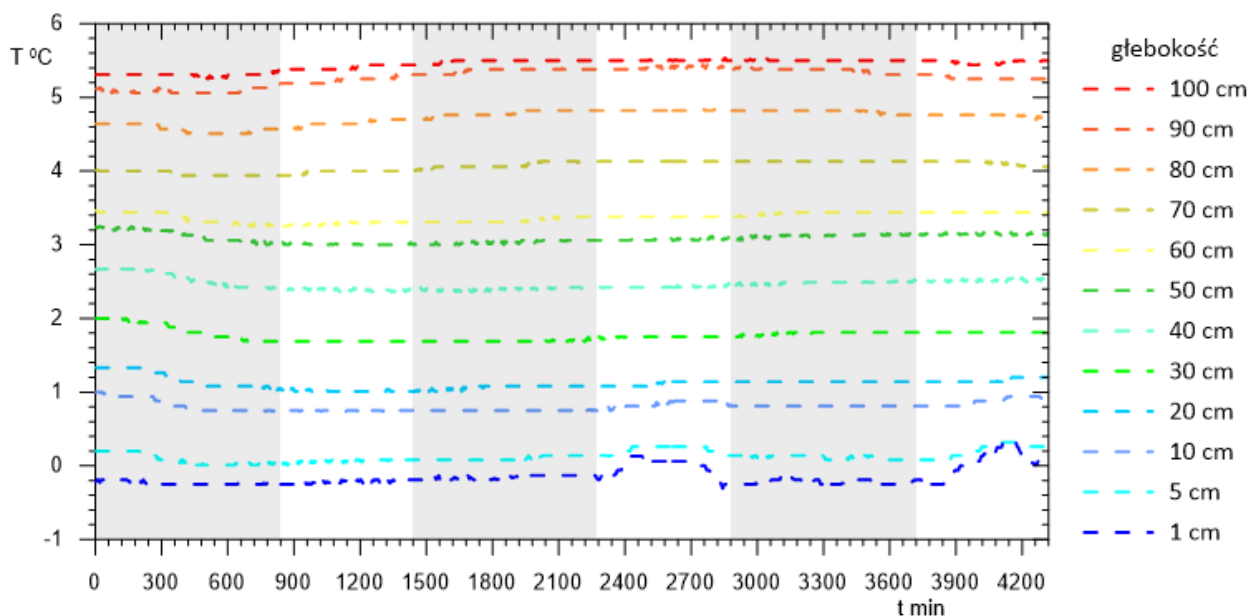
Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na wykresach różnych typów (rys. 11 – 25). Jak już wspomniano, proces nagrzewania gruntu trwał w sposób ciągły przez 72 godziny. W czasie wykonywania pomiarów na obszar w którym zainstalowany był wymiennik ciepła spadł śnieg. Pokrywa śnieżna nie była cały czas jednolita i na początku procesu zalegała nad wszystkimi liniami pomiarowymi a od około 2000 minuty jedynie nad linią 2. Wykresy na rys. 22 ukazują zmiany temperatur dla czujników znajdujących się na powierzchni gruntu. Można zaobserwować izolacyjne działanie pokrywy śnieżnej podczas pierwszej doby. Nie zaobserwowano tutaj mianowicie cyklu dobowego zmian temperatury. Z wyjątkiem czujnika mierzącego temperaturę dla linii 1. Natomiast po stopieniu się warstwy śniegu nad liniami 3 i 4, w drugiej i trzeciej dobie doświadczenia, wyraźnie zaznacza się cykl dobowy.



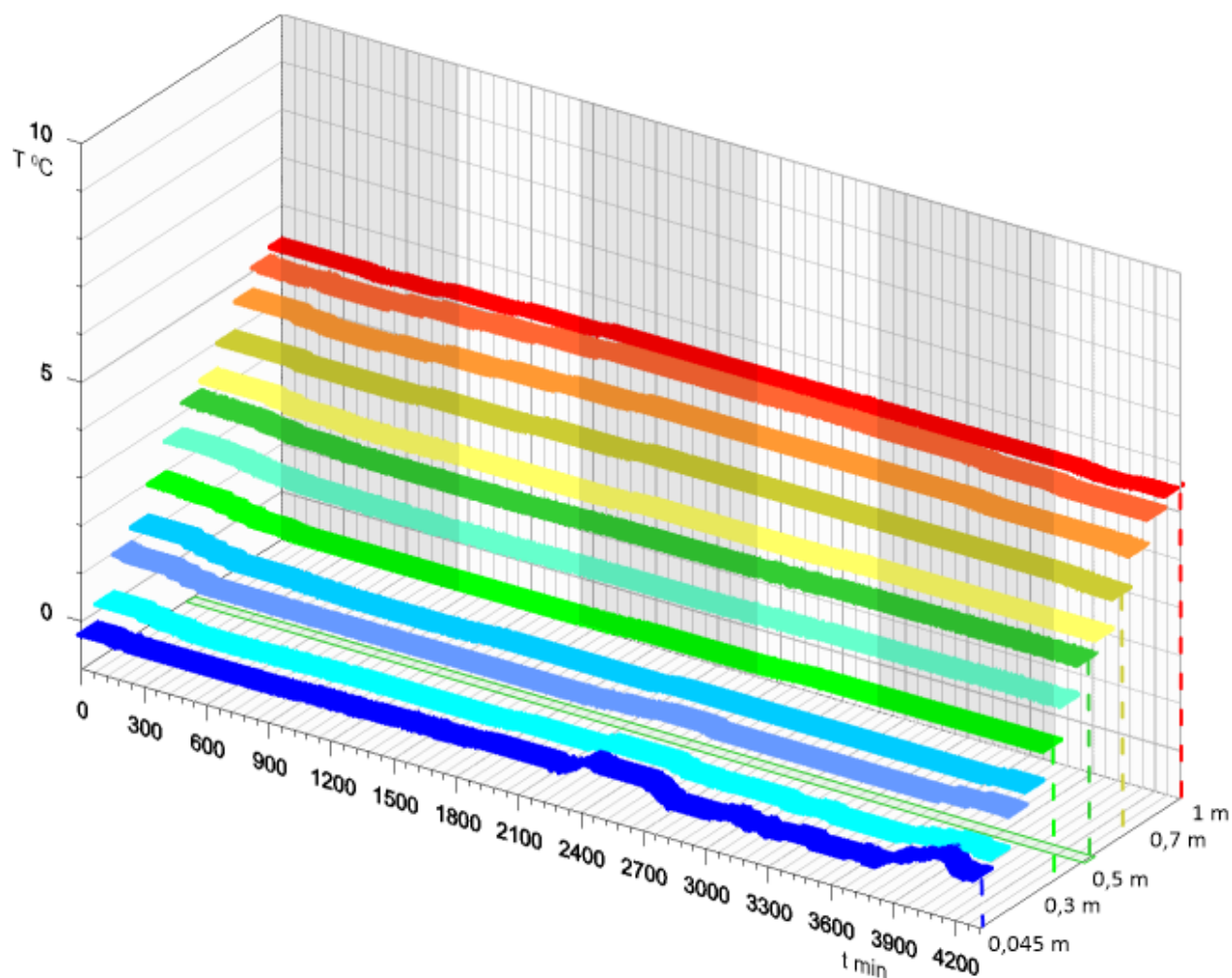
Rys. 11. Wykres profili temperatury na powierzchni gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 1 – 4

Dla każdej z linii pomiarowych zamieszczono trzy rodzaje wykresów. Wykresy 2D obrazujące zmiany temperatur w czasie oraz rozkłady/profile temperatur w gruncie dla wybranych czasów trwania procesu, a także poglądowe wykresy 3D.

Wykresy na rys. 12 i rys. 13 przedstawiają zmiany temperatur gruntu niezakłóconych przez pracę wymiennika w odległości 4,5 m od wykopu w którym został on zainstalowany .



Rys. 12. Wykres profili temperatury gruntu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 1

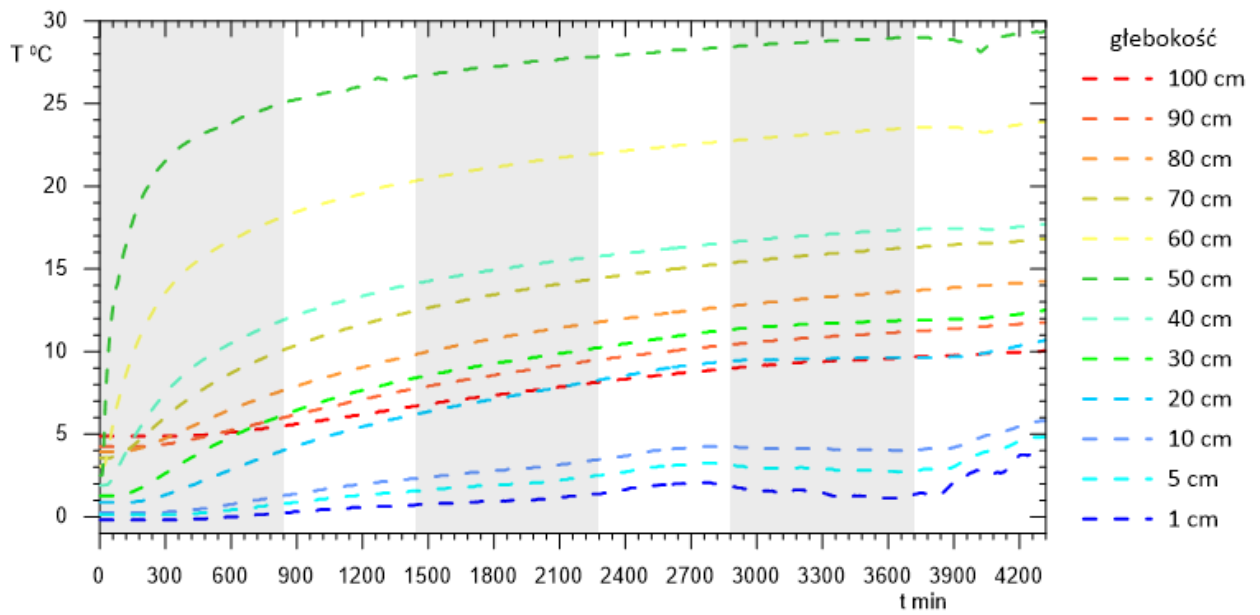


**Rys. 13. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 1 zainstalowane na wybranych głębokościach**

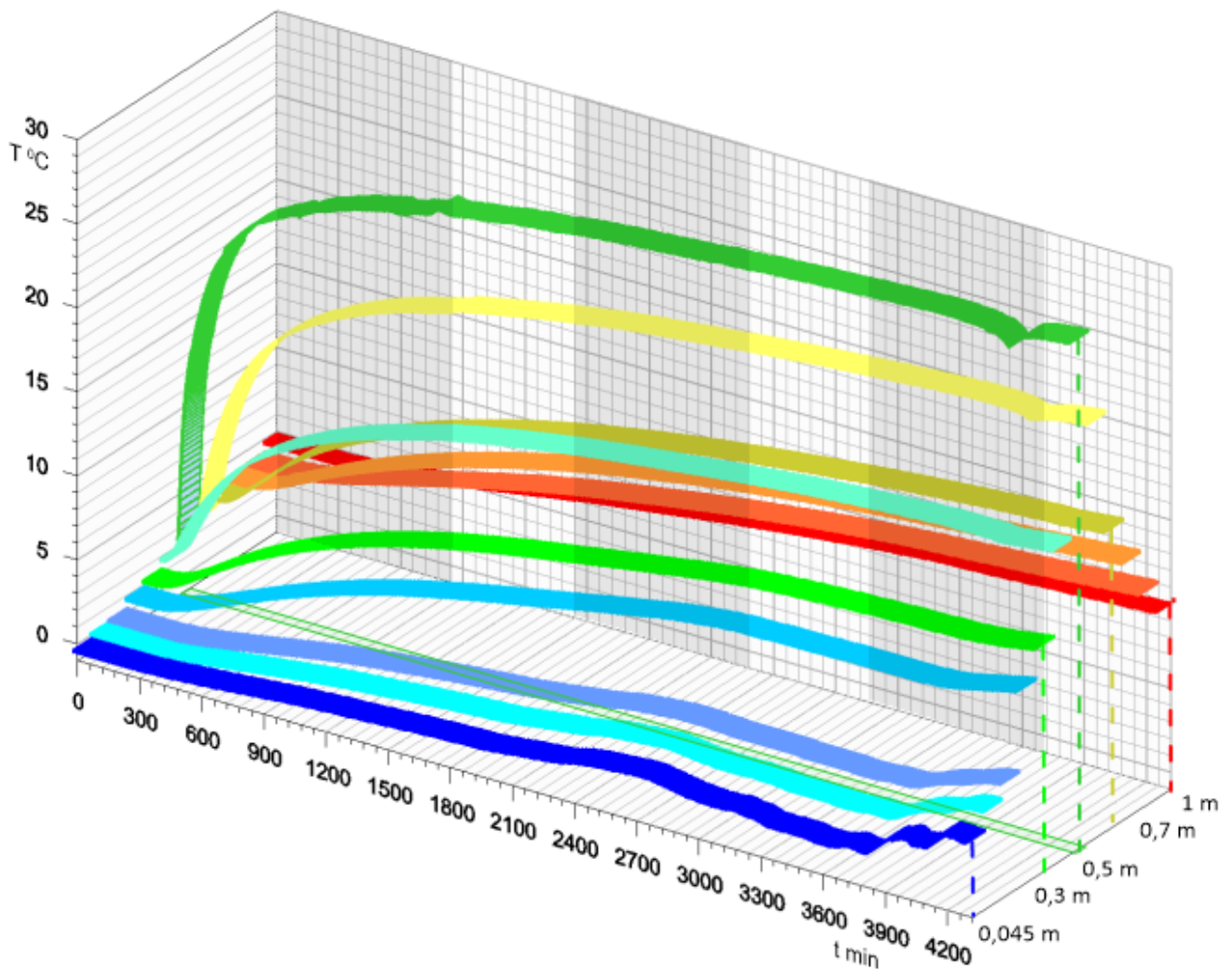
Podczas całego eksperymentu temperatury w gruncie z dala od wymiennika wahały się nieznacznie w zakresie  $\pm 0,2$  °C. Na powierzchni gruntu widać wpływ warunków atmosferycznych na temperaturę przypowierzchniową jednak i tu wahania są niewielkie.

Wykresy na rys. 14 i rys. 15 oraz rys. 16 i rys. 17 obrazują odpowiednio linie pomiarowe 2 i 4. Linie te umieszczone są symetrycznie względem osi wymiennika w odległości około 56 cm od osi symetrii wymiennika (rys. 8).

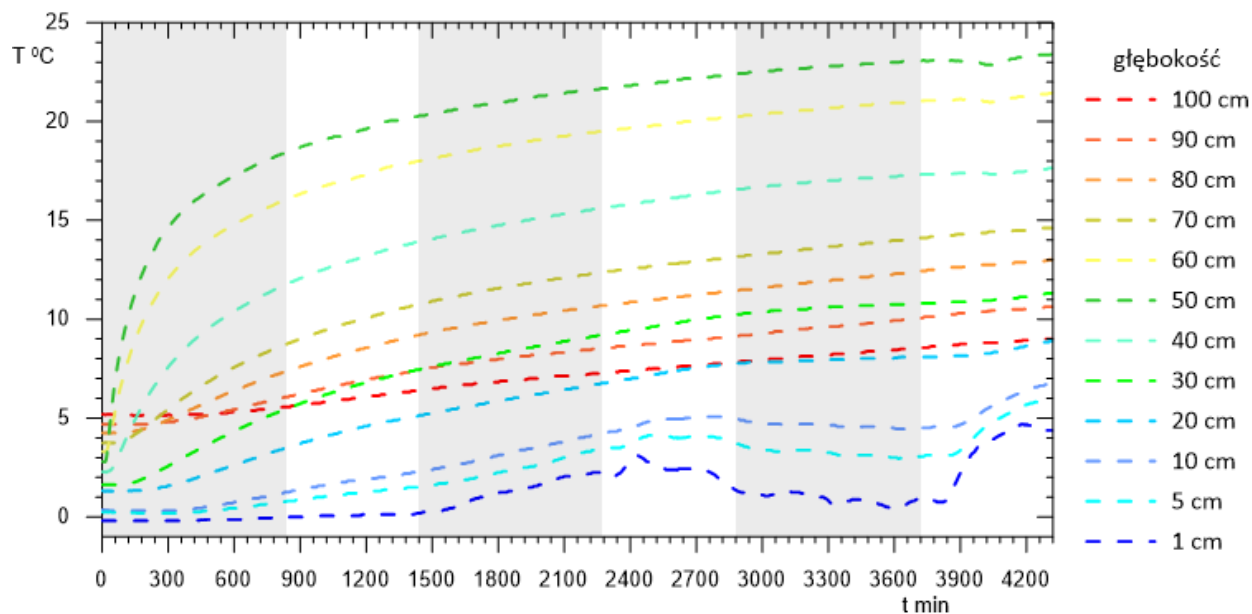




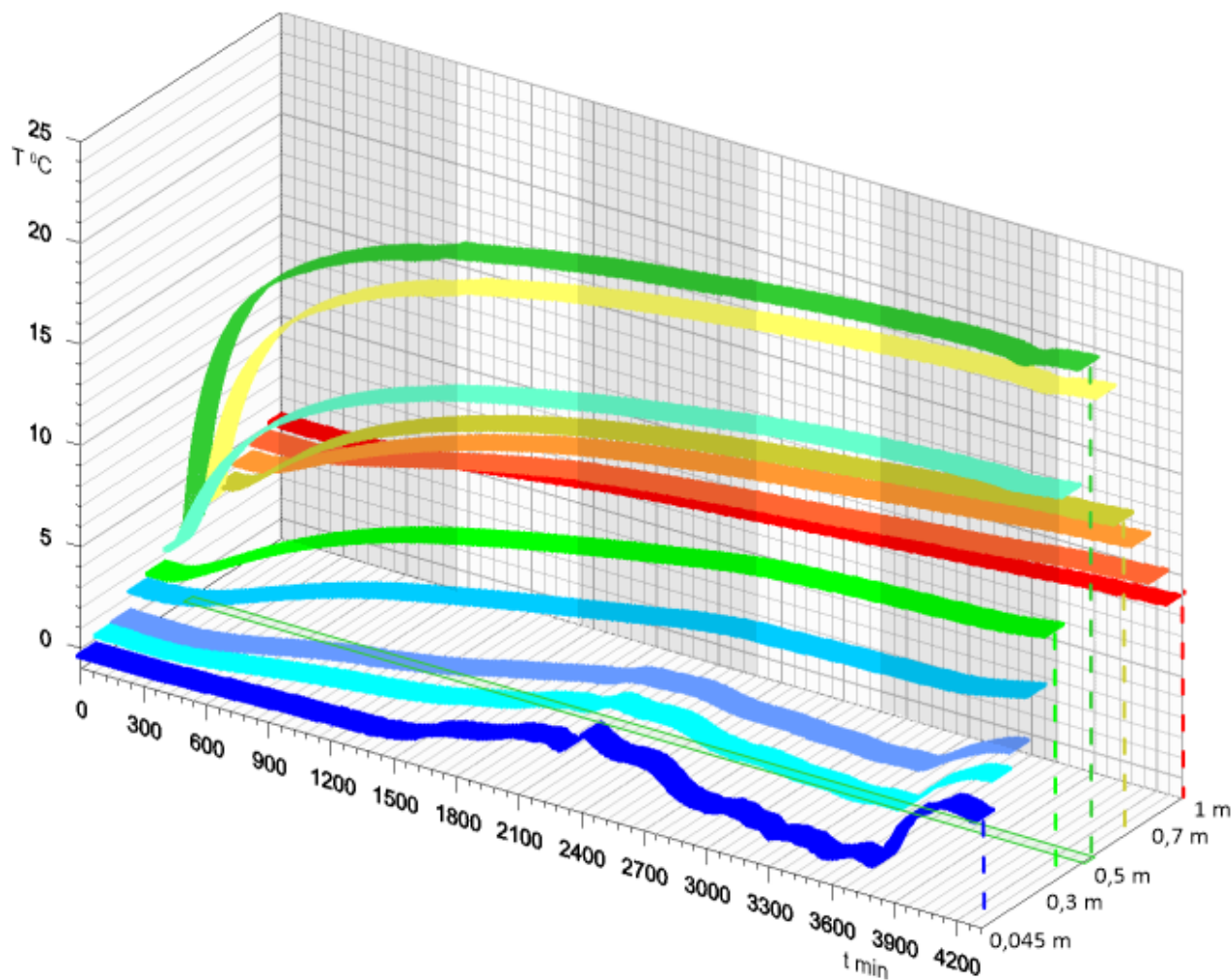
Rys. 14. Wykres profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 2 zainstalowane na wybranych głębokościach



Rys. 15. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 2 zainstalowane na wybranych głębokościach

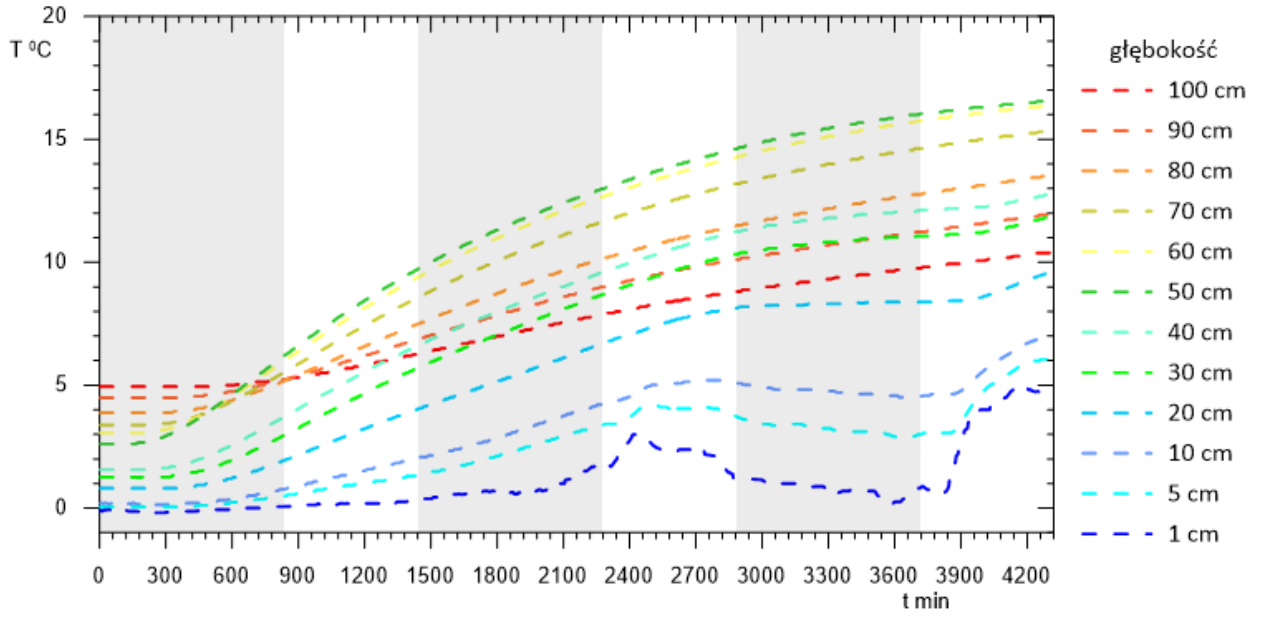


Rys. 16. Wykres profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 4 zainstalowane na wybranych głębokościach

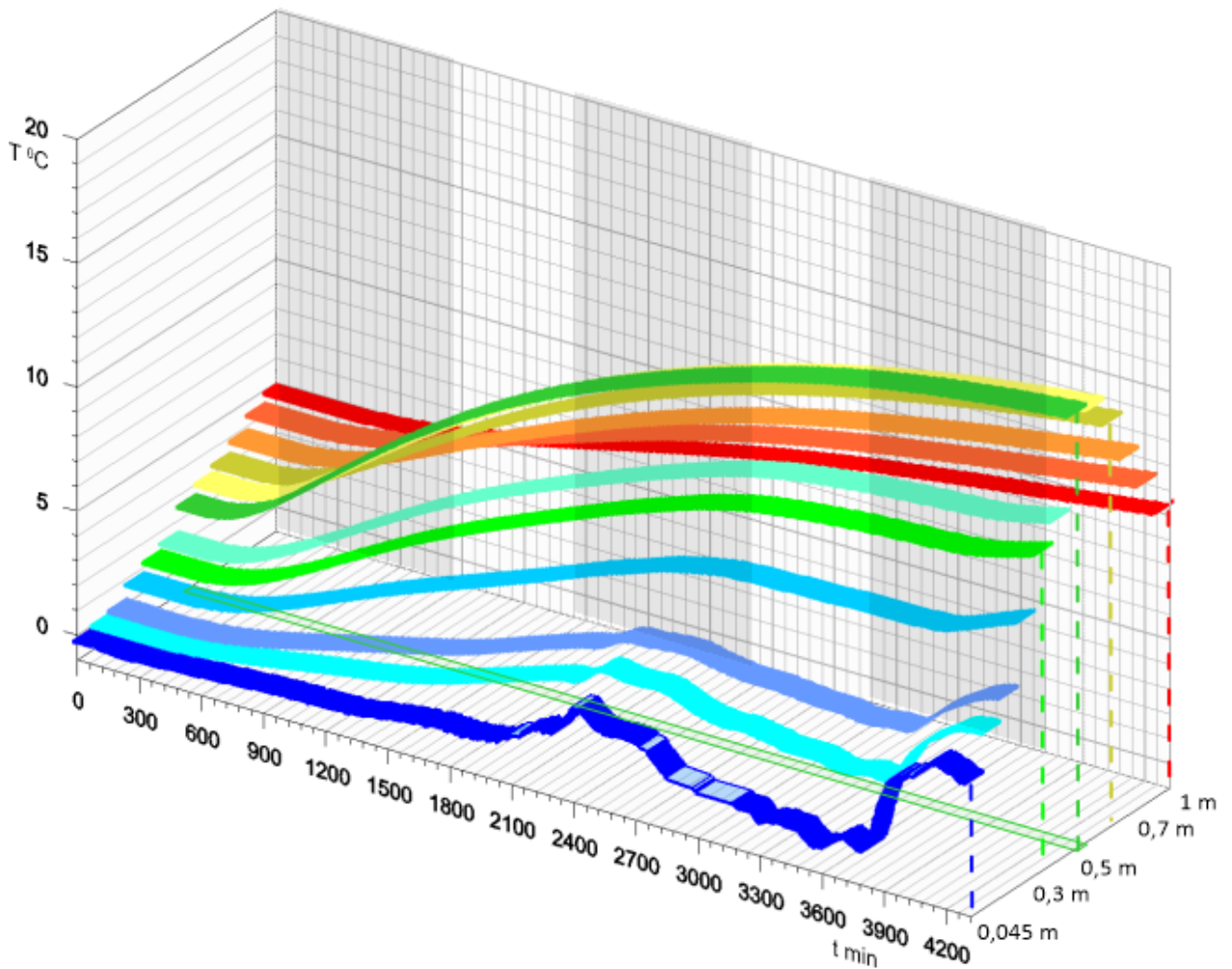


Rys. 17. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 4 zainstalowane na wybranych głębokościach

Rys. 18 i rys. 19 obrazują linię pomiarową numer 3, zainstalowaną w osi wymiennika.



Rys. 18. Wykres profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 3 zainstalowane na wybranych głębokościach



Rys. 19. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 3 zainstalowane na wybranych głębokościach

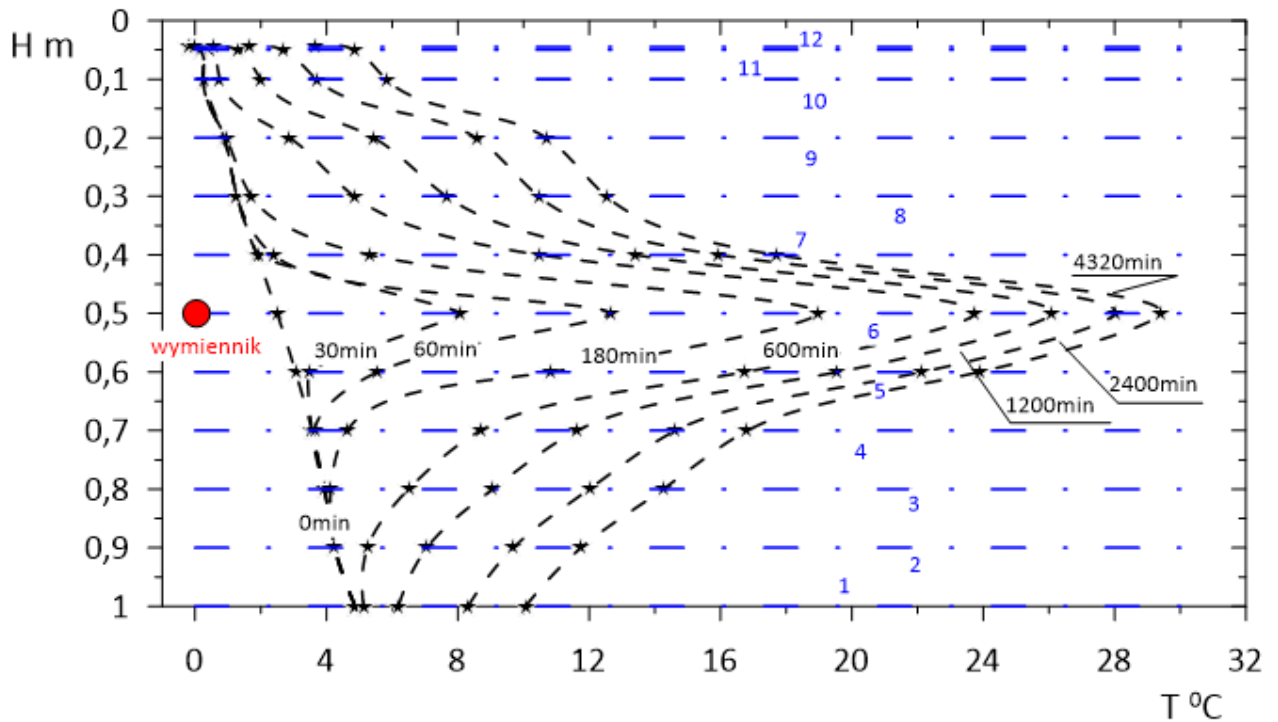
Na powyższych wykresach zaznaczono przebiegi czasowe temperatur na różnych poziomach w gruncie. Każdy wykres składa się z 12 przebiegów przedstawiających temperatury rejestrowanych przez czujniki o numerach od 1 – 12 dla każdej z linii. Czujniki te zainstalowane były na głębokościach zgodnie z Tabelą 1. Zatem, czujniki o numerach od 1 – 5 zainstalowane były poniżej płaszczyzny wymiennika, czujnik 6 w płaszczyźnie wymiennika a czujniki o numerach 7 – 12 powyżej płaszczyzny wymiennika. Czujniki numer 13.2, 13.3, 13.4 w każdej z linii pomiarowych mierzyły temperatury na powierzchni gruntu. Wyjątek dotyczy czujnika 13.1 dla linii odniesienia który był umieszczony kilka cm nad gruntem i mierzył temperaturę powietrza atmosferycznego. Wykresy zmian tej temperatury w czasie przedstawia rys. 14.

W czasie trwania pomiarów, w okolicach 3500 - 4000 min. procesu nastąpiła sytuacja awaryjna. Układ dostarczający wodę uległ zapowietrzeniu, przepływ wody został zablokowany i nastąpił chwilowy spadek ilości ciepła dostarczanego do gruntu. Na wszystkich wykresach sytuacja ta obrazuje się jako chwilowy spadek temperatury rejestrowanej przez czujniki zainstalowane w pobliżu rur wymiennika oraz powyżej, jak i poniżej poziomu wymiennika.

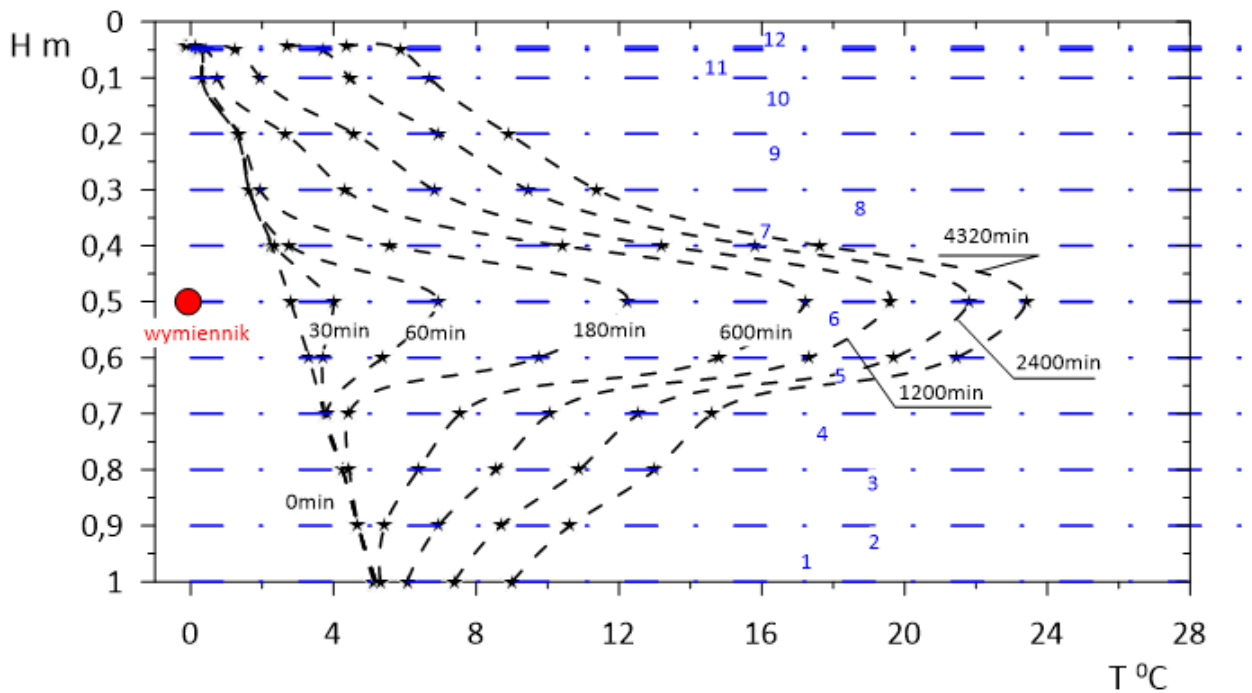
Analizując przedstawione wykresy można stwierdzić, iż najwyższe gradienty temperatury gruntu obserwuje się dla czujników umieszczonych w płaszczyźnie wymiennika w liniach 2 i 4 czyli w liniach umieszczonych w pobliżu rury wymiennika. Obserwacja linii 3, zainstalowanej w osi wymiennika wykazała że w początkowym okresie nagrzewania temperatura gruntu praktycznie nie ulega zmianie. Wzrost temperatury gruntu w tej linii następował dla poszczególnych czujników po 300 minutach czasu trwania procesu (rys. 18 - 19). Jest on jednak zdecydowanie mniej dynamiczny niż dla linii 2 i 4 z powodu oddalenia od wymiennika. Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, iż po tym czasie strumień ciepła dotarł do tej linii pomiarowej. W miarę trwania procesu, dynamika wzrostu temperatury gruntu uległa znacznemu zmniejszeniu.

Różnice w szybkości zmian temperatury gruntu jeszcze wyraźniej widać na trzecim rodzaju zamieszczonych wykresów (rys. 20 – 23). Są to mianowicie wykresy na których przedstawiono profile temperatur po głębokości gruntu dla wybranych czasów trwania procesu. Przyrosty zmian temperatur gruntu dla linii pomiarowych 2 i 4 umieszczonych w pobliżu rur wymiennika są stosunkowo duże, (rys. 20, 21). Szczególnie dla czujników w pobliżu płaszczyzny wymiennika (czujniki na poziomie 0,4 – 0,6 m). Natomiast w osi wymiennika dla linii pomiarowej nr 3 (rys. 22) obserwuje się znaczące gradienty temperatur jedynie w płaszczyźnie wymiennika (czujnik na poziomie 0,5 m), dodatkowo po opisanym powyżej czasie opóźnienia. Wyniki pomiarów zamieszczone na rys. 23 obrazują zmiany temperatury niezakłóconego ciepłnie

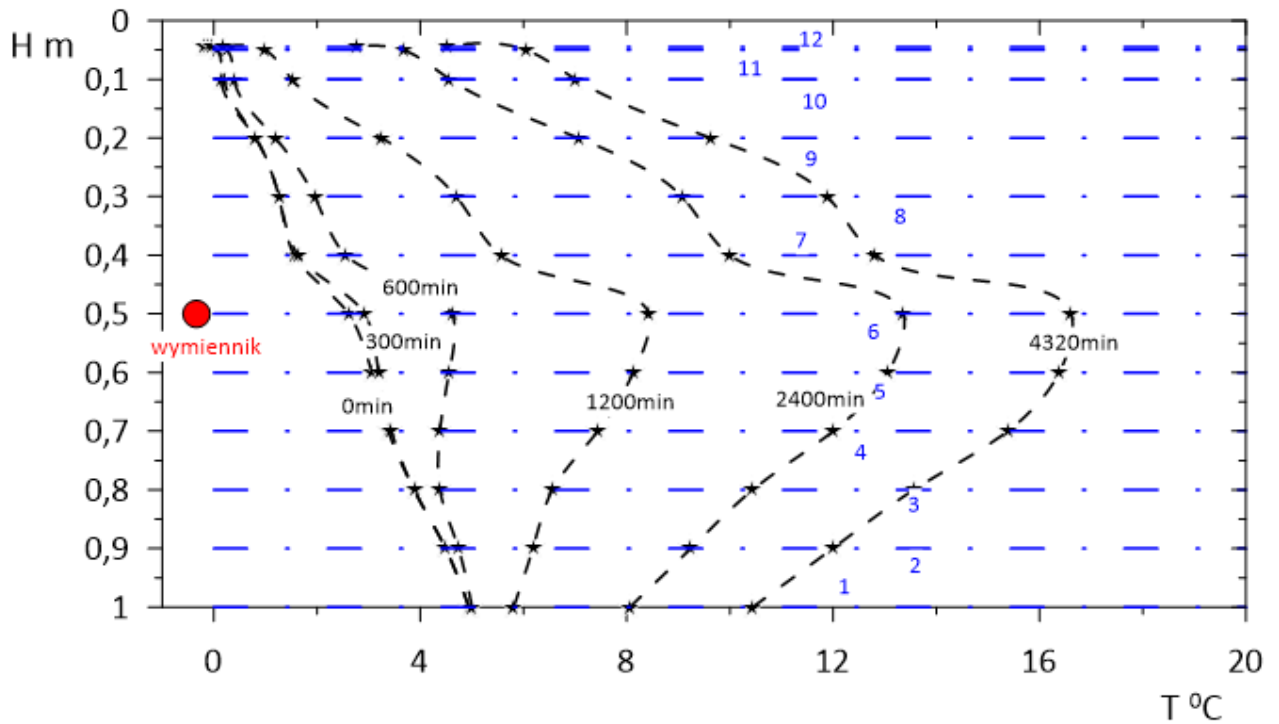
gruntu w czasie trwania procesu. Jak można zauważyć, rozkład temperatury gruntu prawie nie ulegał zmianie.



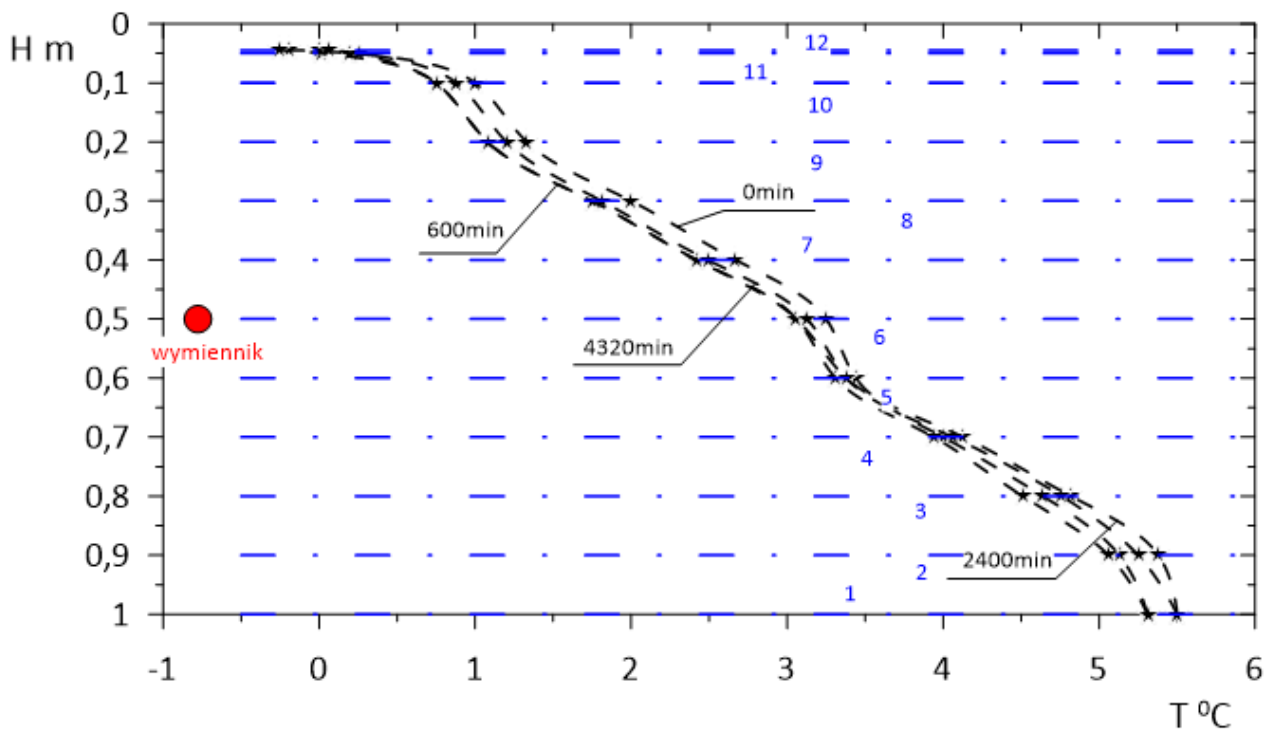
Rys. 20. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 2



Rys. 21. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 4



Rys. 22. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 3

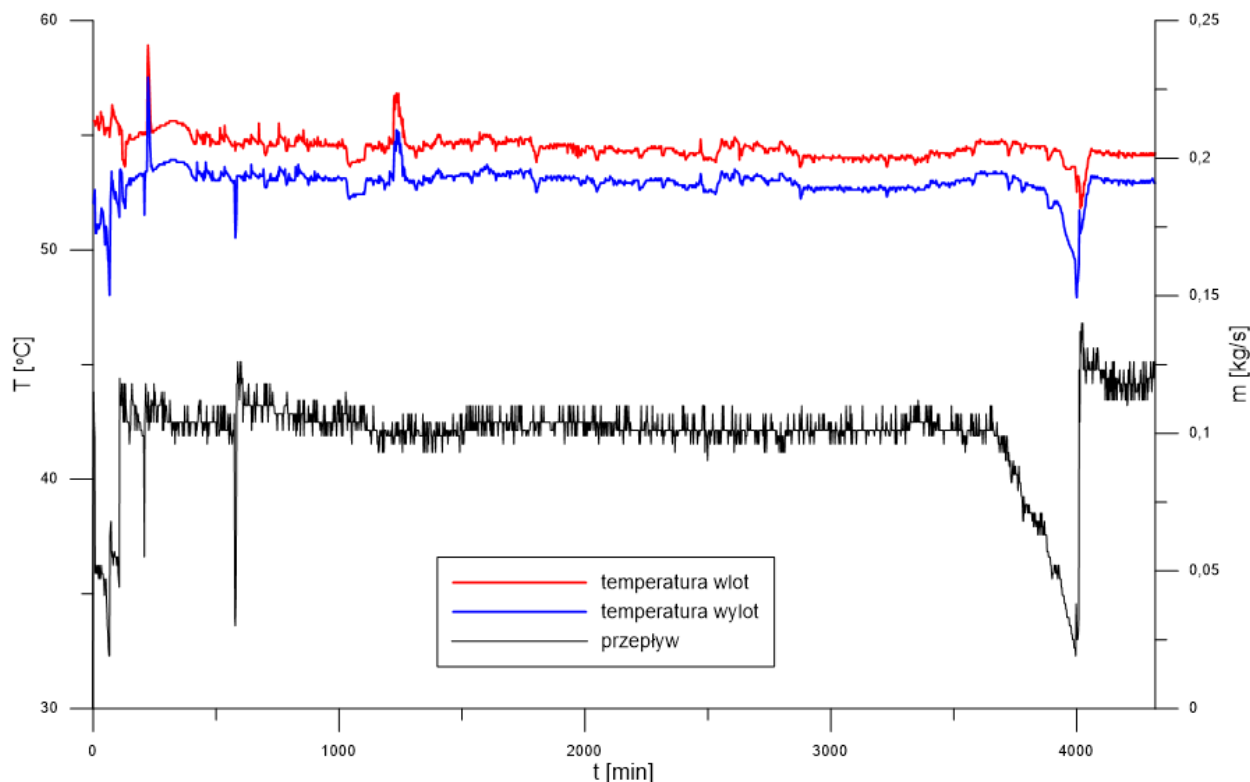


Rys. 23. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 1

Kolejną obserwacją wynikającą z analizy wykresów (rys. 20 – 21) jest różnica w zmianach temperatur gruntu rejestrowanych przez linię 2 i 4. Linia 2 rejestruje nagrzanie gruntu do temperatury o kilka stopni wyższej niż linia 4. Wynika to z braku idealnego

rozmieszczenia czujników względem osi wymiennika, braku idealnej symetrii wymiennika, relatywnie dużych wymiarów czujników pomiarowych oraz w mniejszym stopniu ze zmniejszania się różnicy temperatur pomiędzy cieczą roboczą a gruntem z powodu wychłodzenia się czynnika roboczego podczas przepływu przez wymiennik.

Natężenie przepływu wody cyrkulującej w gruntowym wymienniku ciepła oraz zmiany temperatury na wlocie i wylocie z wymiennika przedstawiono na rys. 24.



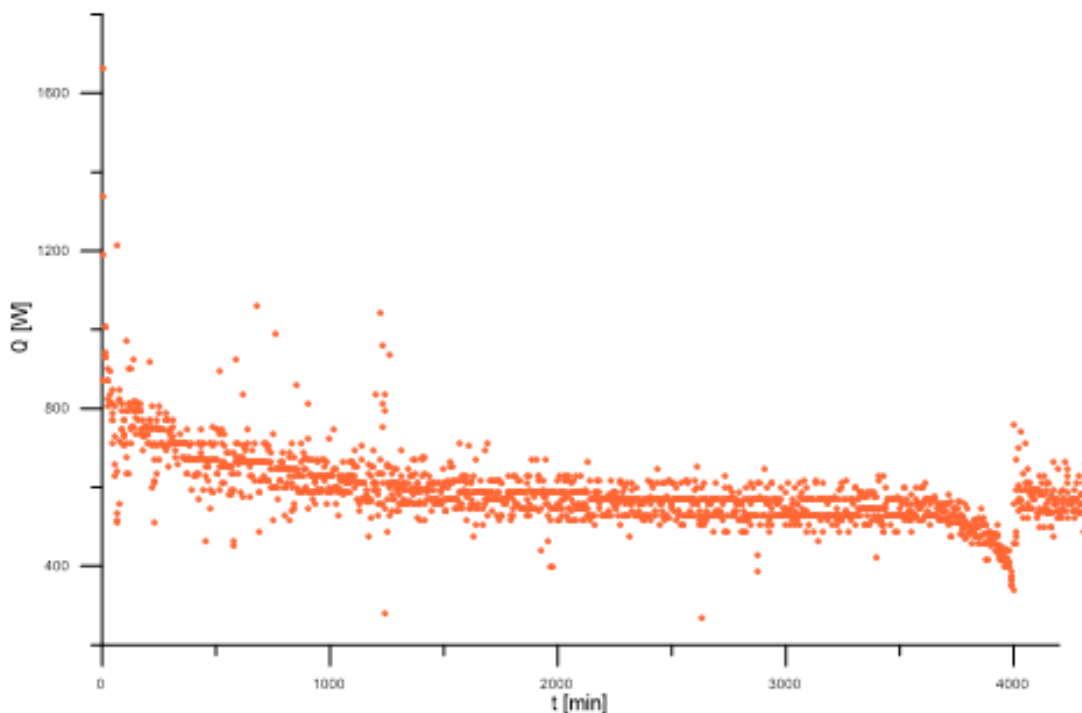
**Rys. 24. Wyniki pomiarów temperatury cieczy roboczej oraz jej natężenia przepływu na wlocie i wylocie z wymiennika ciepła**

Analizując wykres obrazujący natężenie przepływu wody cyrkulacyjnej należy zwrócić uwagę na dwa incydenty awaryjne. Podczas początkowego okresu grzania, między 0 - 250 minutą oraz pod koniec doświadczenia między 3600 - 4100 minutą procesu obserwowano znaczne skoki przepływu cieczy roboczej, spowodowane zapowietrzeniem instalacji. Jak już wspomniano zakłócenia w końcowym okresie eksperymentu obserwowane były także na wykresach temperatur. Początkowy okres wahań, znacznie krótszy, nie znalazł odzwierciedlenia na wspomnianych wykresach. Zakłócenia te obserwowane są także na wykresach obrazujących zmiany temperatury na zasilaniu i powrocie cieczy roboczej. Temperatura zasilania wymiennika ciepła utrzymywała się na poziomie 55 °C. Różnica temperatur pomiędzy wlotem a wylotem cieczy z wymiennika podczas trwania eksperymentu sukcesywnie spadała. W początkowej fazie temperatura powrotu była niższa od temperatury zasilania o 4 °C a w końcowej o 1 °C. Stopniowe

zmniejszanie się różnicy temperatur między zasilaniem a powrotem z wymiennika wynikało z oporów przewodzenia ciepła w gruncie które spowodowały że coraz mniejszy strumień ciepła oddawany był przez ścianę rury wymiennika do gruntu. Ilość ciepła dostarczanego do gruntu wyliczono zgodnie ze wzorem [11]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{wl} - T_{wyl}) \quad [11]$$

Dane o temperaturze wlotowej i wylotowej z wymiennika oraz o przepływie określono na podstawie odczytów ciepłomierza CQM III zintegrowanego z przepływomierzem LQM - III. Wyniki pomiarów zaprezentowano na rys. 25.



**Rys. 25. Strumień ciepła oddawany do gruntu podczas eksperymentu**

Na podstawie wykresu można stwierdzić iż w początkowej fazie nagrzewania gruntu strumień ciepła był największy i wynosił maksymalnie 1650 W, by w kolejnych godzinach spadać do poziomu około 450 - 550 W. Zatem strumień przenieszonego ciepła zmniejszał się w trakcie trwania procesu co wynikało z nagrzewania gruntu i zmniejszania się siły napędowej przenoszenia ciepła. Dla czasu 300 – 500 minut wykres strumienia ciepła wyplaszacza się co można tłumaczyć faktem iż strumień ciepła zaczął docierać do osi wymiennika ( $r = 0$  m) i różnica temperatur pomiędzy osią wymiennika a ścianką jego rurki zaczęła spadać, przez co ruch ciepła w kierunku poziomym od ścianki rury wymiennika do jego osi stracił na intensywności. Wahania strumienia ciepła oddawanego do gruntu wynikały ze zmiennego strumienia cieczy przepływającej przez wymiennik oraz zmiennej temperatury zasilania wymiennika (rys. 24).



Pomijając incydent w okolicach czasu 3800 – 4000 minut można zauważyć że strumień ciepła zmierza do osiągnięcia stanu ustalonego jednak 72 godziny to za krótki okres aby został on osiągnięty.

## 3.2. Modelowanie klasyczne gruntowego wymiennika ciepła typu slinky

### 3.2.1. Analityczne rozwiązanie równania przewodzenia ciepła w ciele nieskończonym z pierścieniowym źródłem ciągłym źródłem ciepła

Podstawą modelowania analitycznego spiralnych wymienników ciepła jest model pierścieniowego źródła ciepła – Ring Source Model (RSM).

Bazą rozwiązań analitycznych przewodzenia ciepła w ciałach nieskończonych są rozwiązania dla chwilowych źródeł ciepła. Znane są rozwiązania dla źródła punktowego, liniowego, cylindrycznego, sferycznego i pierścieniowego. Jeżeli źródło ma kształt pierścienia o promieniu  $R$  to w chwili  $t = 0$ , równomiernie na całym obwodzie pierścienia, wydziela się ciepło w ilości  $Q$ , zaś temperatura w dowolnym punkcie ośrodka w którym źródło jest umieszczone jest funkcją czasu  $t$ , odległości od osi pierścienia  $r$  oraz odległości od płaszczyzny pierścienia  $z$ . W przypadku kiedy ośrodek można traktować jako ciało nieskończone, to zależność ta ma postać [12] (45):

$$T = T_{init} + \frac{Q}{8c_v (\pi a t)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + R^2 + z^2}{4at}\right) \cdot I_0\left(\frac{rR}{2at}\right) \quad [12]$$

W modelowaniu gruntowych wymienników ciepła jednym z celów jest wyznaczenie pola temperatur wokół wymiennika, przy istnieniu ciągłego źródła ciepła. Rozwiązanie takiego problemu wymaga scałkowania powyższego równania w zakresie od 0 do  $t$  co prowadzi do równania [13]:

$$T = T_{init} + \int_0^t \left\{ \frac{\dot{Q}}{8c_v [\pi a (t-\tau)]^{3/2}} \cdot \exp\left[-\frac{r^2 + R^2 + z^2}{4a(t-\tau)}\right] \cdot I_0\left[\frac{rR}{2a(t-\tau)}\right] \right\} d\tau \quad [13]$$

Całkę w tym równaniu rozwiązano numerycznie przyjmując krok czasowy  $\Delta t$ . Po podstawieniu  $t_i = i \cdot \Delta t$  oraz  $\dot{Q} = \dot{Q}_i \cdot \Delta t$  otrzymano [14]:

$$T = T_{init} + \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\dot{Q}_i}{8c_v (\pi a t_i)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + R^2 + z^2}{4at_i}\right) \cdot I_0\left(\frac{rR}{2at_i}\right) \quad [14]$$

przy czym  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n = t/\Delta t$ .

Należy zauważyć, że w praktyce pierścieniem jest rura zwinięta w okrąg. Model ten pozwala na pominięcie średnicy rury poprzez przyjęcie założenia o jej zerowej wartości.

Na rys. 26 przedstawiono pierścieniowe źródło ciepła w układzie współrzędnych w którym określano pola temperatur. Rys. 26 a) dotyczy cylindrycznego układu współrzędnych, zaś rys. 26 b), kartezjańskiego układu współrzędnych. Ze względu na symetrię względem osi  $z$  w cylindrycznym układzie współrzędnych (wzory: 12 - 14) obowiązuje równość  $x = y = r$ .



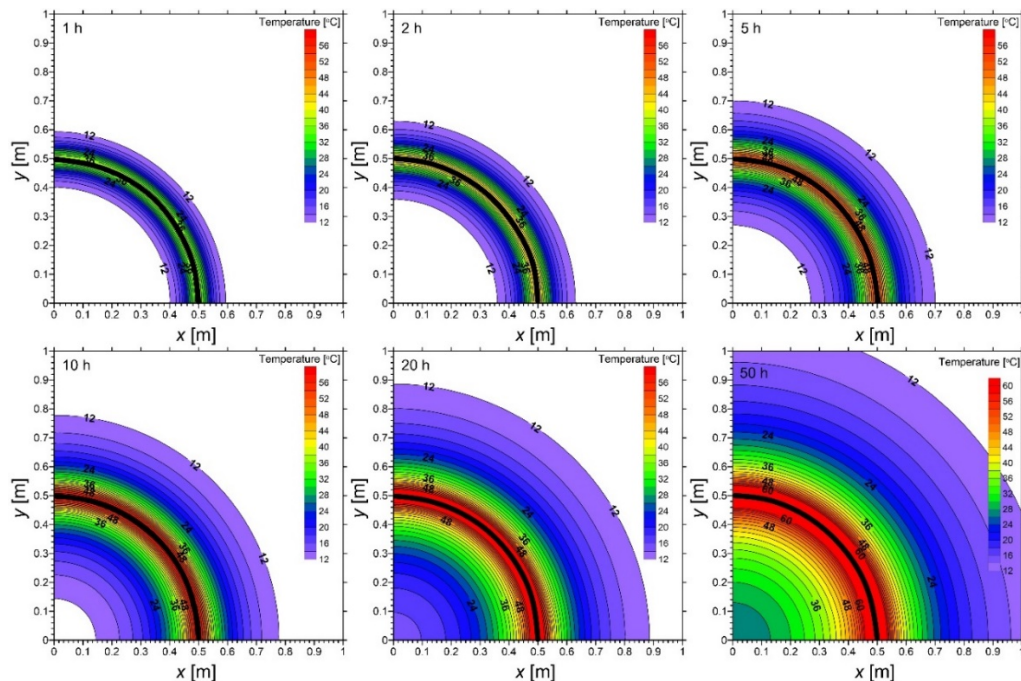
Rys. 26. Pierścieniowe źródło ciepła a) układ współrzędnych cylindryczny, b) kartezjański

Przeprowadzono symulację cyfrową procesu przenoszenia ciepła pomiędzy pierścieniem o promieniu  $R = 0,5$  m a otaczającym gruntem. Założono, że źródło znajduje się w dużej odległości od powierzchni gruntu a więc potraktowano grunt jako ciało nieskończone. Ponadto przyjęto:

$$\dot{Q} = 400W, \quad c_v = 1,8 \cdot 10^6 \frac{J}{kg \cdot K}, \quad a = 0,6 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}, \quad T_{init} = 10^\circ C.$$

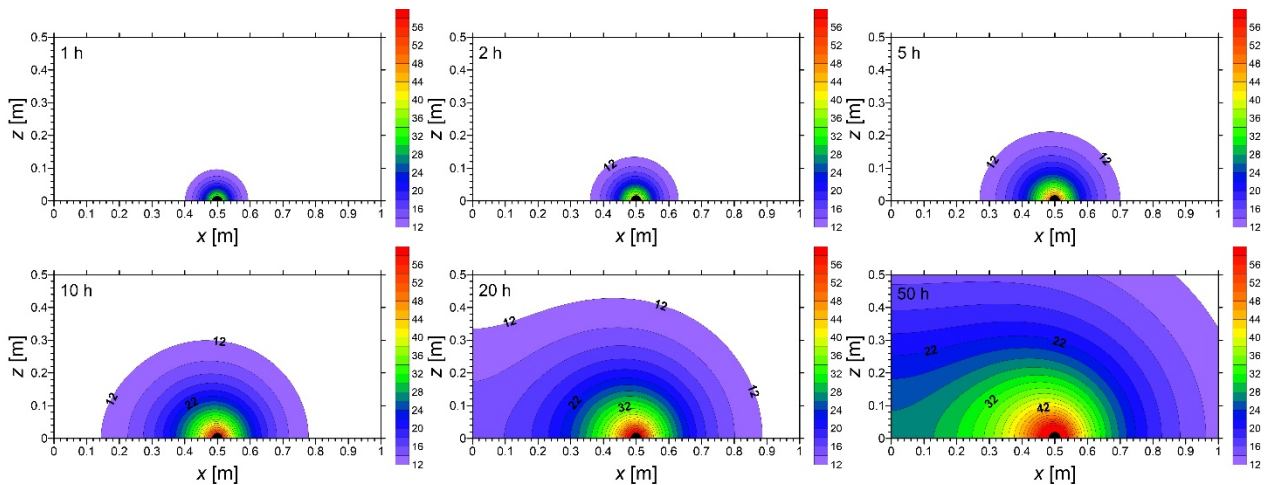
Obliczenia przeprowadzono dla czasów trwania procesu 1, 2, 5, 10, 20 i 50 h. Wyznaczono pola temperatur wokół pierścienia. Zgodnie z rysunkiem 26 b) pierścień leży w płaszczyźnie  $x$ - $y$ , zaś oś  $z$  stanowi oś pierścienia.

Na rys. 27 przedstawiono mapy temperatur w układzie współrzędnych  $y$  -  $x$  tzn. na płaszczyźnie, na której znajduje się pierścień o współrzędnej  $z = 0$ . Rurę o umownej średnicy zewnętrznej 0.032 metra oznaczono kolorem czarnym. Ze względu na symetrię rysunek przedstawiono tylko dla wartości  $x > 0$  oraz  $y > 0$ .



Rys. 27. Wyniki symulacji cyfrowej profili temperatur gruntu z zainstalowaną jedną poziomą pętlą dla różnych czasów trwania procesu ogrzewania. Mapa temperatur w układzie współrzędnych  $y$ - $x$

Rys. 28 przedstawia mapy temperatur w układzie współrzędnych  $z - x$  tj. na płaszczyźnie o współrzędnej  $y = 0$ . Również w tym przypadku ze względu na symetrię przedstawiono tylko fragment pola temperatur dotyczący dodatnich wartości  $x$  i  $z$ . Początkowo temperatura gruntu zmienia się tylko w pobliżu powierzchni rury. Przestrzeń w pobliżu osi pierścienia przez pewien czas zachowuje temperaturę początkową. Po pewnym czasie również do tej przestrzeni, odległej od źródła, dociera ciepło. W miejscach nieleżących na osi  $z$  ciepło dociera nierównomiernie z różnych kierunków, co objawia się deformacjami pól temperatur.



**Rys. 28. Wyniki symulacji cyfrowej profili temperatur gruntu z zainstalowaną jedną poziomą pętlą dla różnych czasów trwania procesu ogrzewania. Mapa temperatur w układzie współrzędnych  $z-x$**

Na podstawie tak wykonanej wstępnej symulacji oraz pomiarów doświadczalnych można przewidywać że jakościowa zmiana temperatur wokół pętli wymiennika jest zgodna dla obu przypadków. Następnie model RSM przygotowano tak aby walidować go z wynikami doświadczalnymi. W tym celu wykorzystano dane otrzymane podczas eksperymentu.

### 3.2.2. Zależność strumienia przenoszonego ciepła od czasu

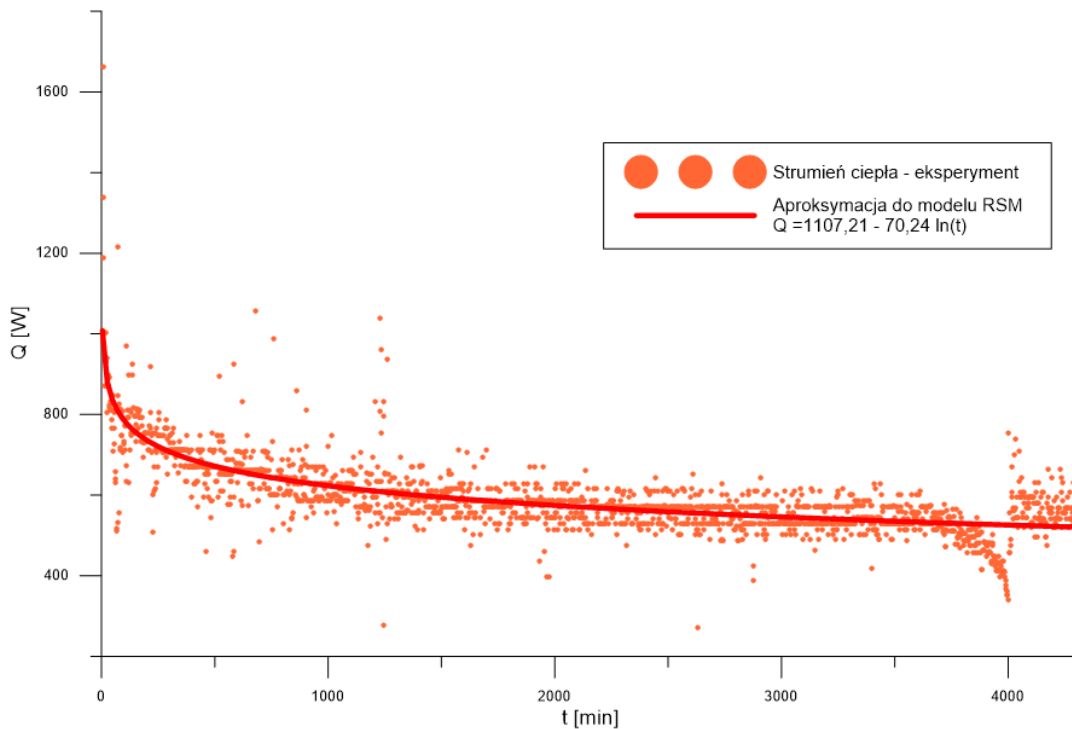
Na rys. 24 przedstawiono przebieg temperatur wody na wlocie i wylocie z wymiennika. Temperaturę na wlocie  $T_{in}$  podczas pomiarów utrzymywano na poziomie około 55 °C. Zanotowano jednak pewne wahania zarówno w górę jak i w dół. Jak wspomniano wcześniej w końcowej fazie pomiarów zanotowano stan awaryjny, w którym temperatura spadła o kilka K. Temperatura wody na wylocie  $T_{out}$  była o ok. 1-3 K niższa od  $T_{in}$ . W trakcie pomiaru różnica temperatur pomiędzy wlotem i wylotem nieznacznie zmniejszała się.

Różnica temperatur wody jest proporcjonalna do strumienia ciepła przenoszonego w wymienniku, zgodnie z zależnością [11].

Strumień ciepła oddawanego do gruntu aproksymowano funkcją postaci:

$$\dot{Q} = 1107,21 - 70,24 \cdot \ln(t) \quad [15]$$

gdzie  $t$  to czas wyrażony w minutach. Na rys. 29 funkcję aproksymującą [15] oznaczono linią ciągłą.



Rys. 29. Zależność przenoszonego ciepła od czasu – dane z pomiarów i funkcja aproksymująca

### 3.2.3. Wyznaczenie parametrów cieplnych gruntu

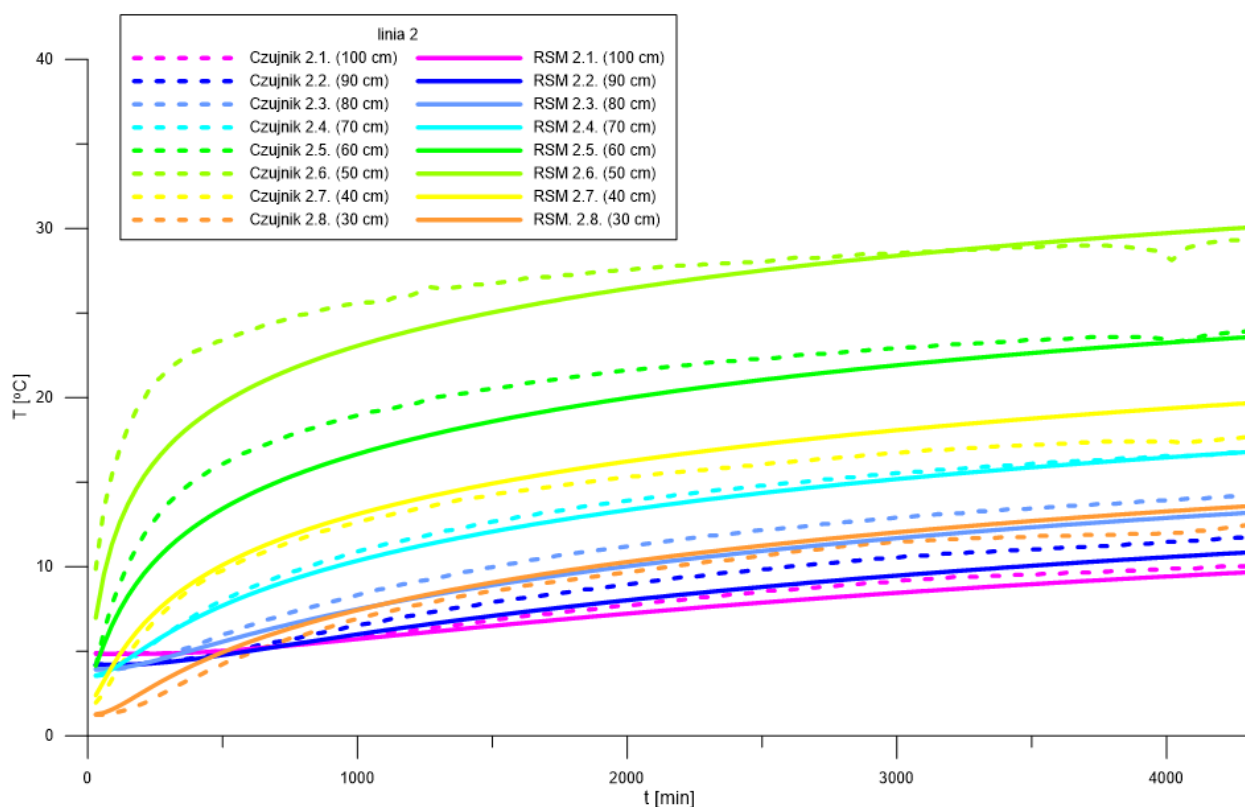
Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów temperatury gruntu wyznaczono jego parametry termiczne. Te parametry dopasowano metodą najmniejszych kwadratów, zgodnie z zależnością [16]:

$$SS = \sum_{j=1}^m (T_{num} - T_{exp})^2 = f(a, c_v) \quad [16]$$

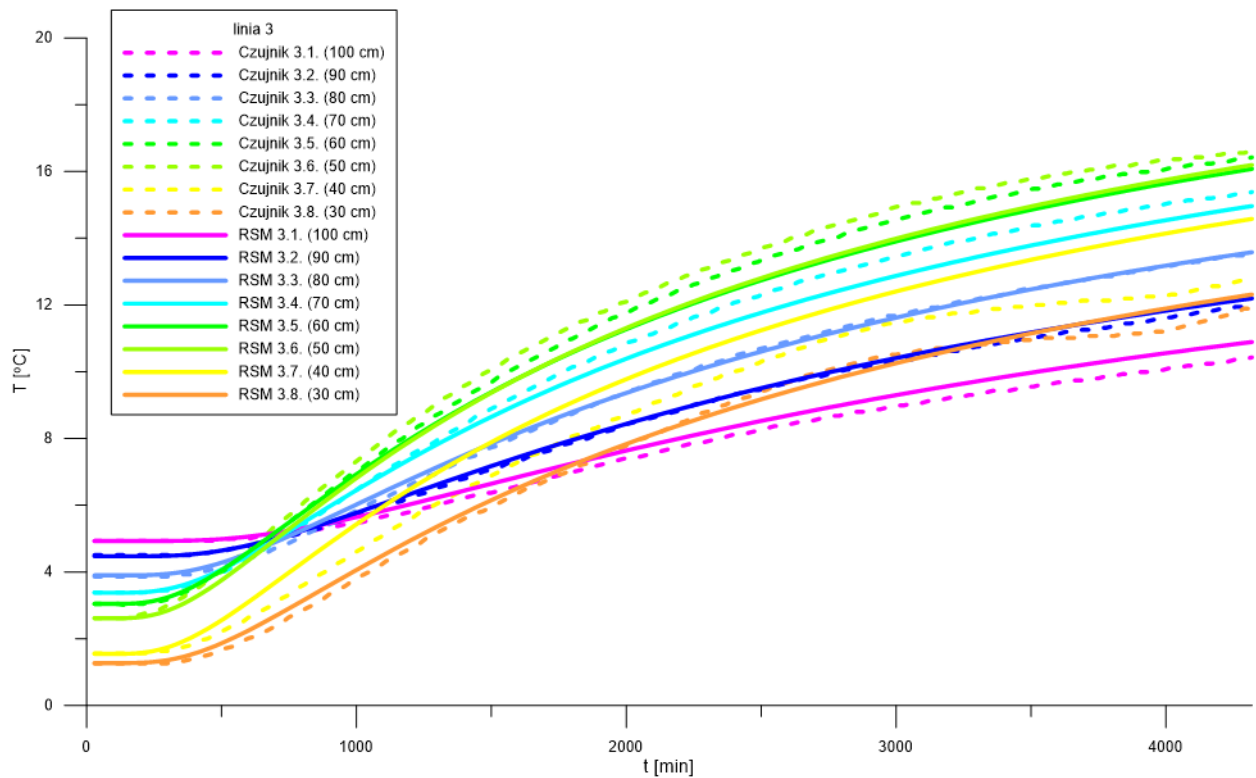
Wartości  $T_{num}$  wyznaczano wg wzoru [14] z podstawieniem [15]. Poszukiwano wartości  $a$  i  $c_v$  dla których wartość  $SS$  osiąga minimum. Ponieważ RSM jest modelem formułowanym dla ciała nieskończonego, spośród danych zebranych podczas pomiarów odrzucono pomiary z czujników na które wpływ miały warunki na powierzchni gruntu. Wykorzystano zatem dane z 24 czujników położonych na głębokościach od 30 do 100 cm poniżej powierzchni gruntu. Do obliczeń wzięto wyniki z pomiarów w odstępach 30 minut, więc w obliczeniach wykorzystano 3456 danych pomiarowych. Minimalizację funkcji  $SS = f(c_v, a)$  wykonano wykorzystując aparat obliczeniowy Solver z aplikacji Excel. Poszukiwanie minimalnej wartości funkcji dwóch zmiennych doprowadziło do znalezienia następujących wartości liczbowych: dyfuzyjność cieplna

gruntu  $a = 0,89 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ , pojemnościowe ciepło właściwe gruntu  $c_v = 3,481 \cdot 10^6 \frac{J}{m^3 \cdot K}$ , wartość minimum funkcji celu  $SS = 3442K^2$  ze średnim błędem kwadratowym wynoszącym  $\sigma = \sqrt{3442/3456} \cong 0,998 K$ .

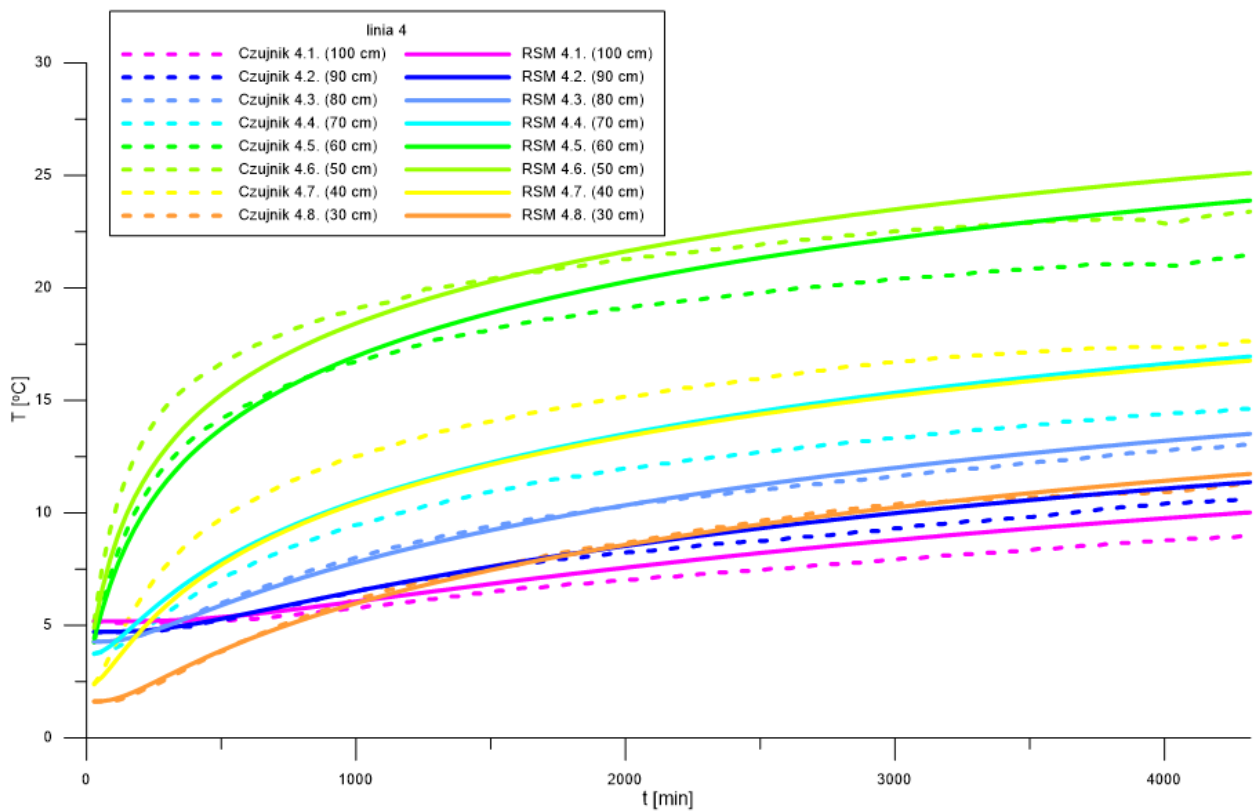
Na rys. 30 - 32 przedstawiono zależności temperatury gruntu od czasu trwania procesu odpowiednio dla czujników w liniach 2, 3 i 4. Poszczególne przebiegi temperatur dotyczą różnych wartości  $z$ , charakteryzujących odległości od płaszczyzny usytuowania wymiennika. Najwyższe temperatury dotyczą miejsc położonych najbliżej poziomemu wymiennika. Dla wygody w legendzie podano głębokość położenia czujnika względem powierzchni gruntu tzn.  $h = |z - 0,5|$ . Przedstawiono przebiegi doświadczalne (linie przerywane) oraz numeryczne (linie ciągłe).



Rys. 30. Zależność temperatury gruntu od czasu linii 2 dla różnych wartości zmiennej położenia  $z$  – porównanie wartości doświadczalnych i obliczeniowych z modelu RSM

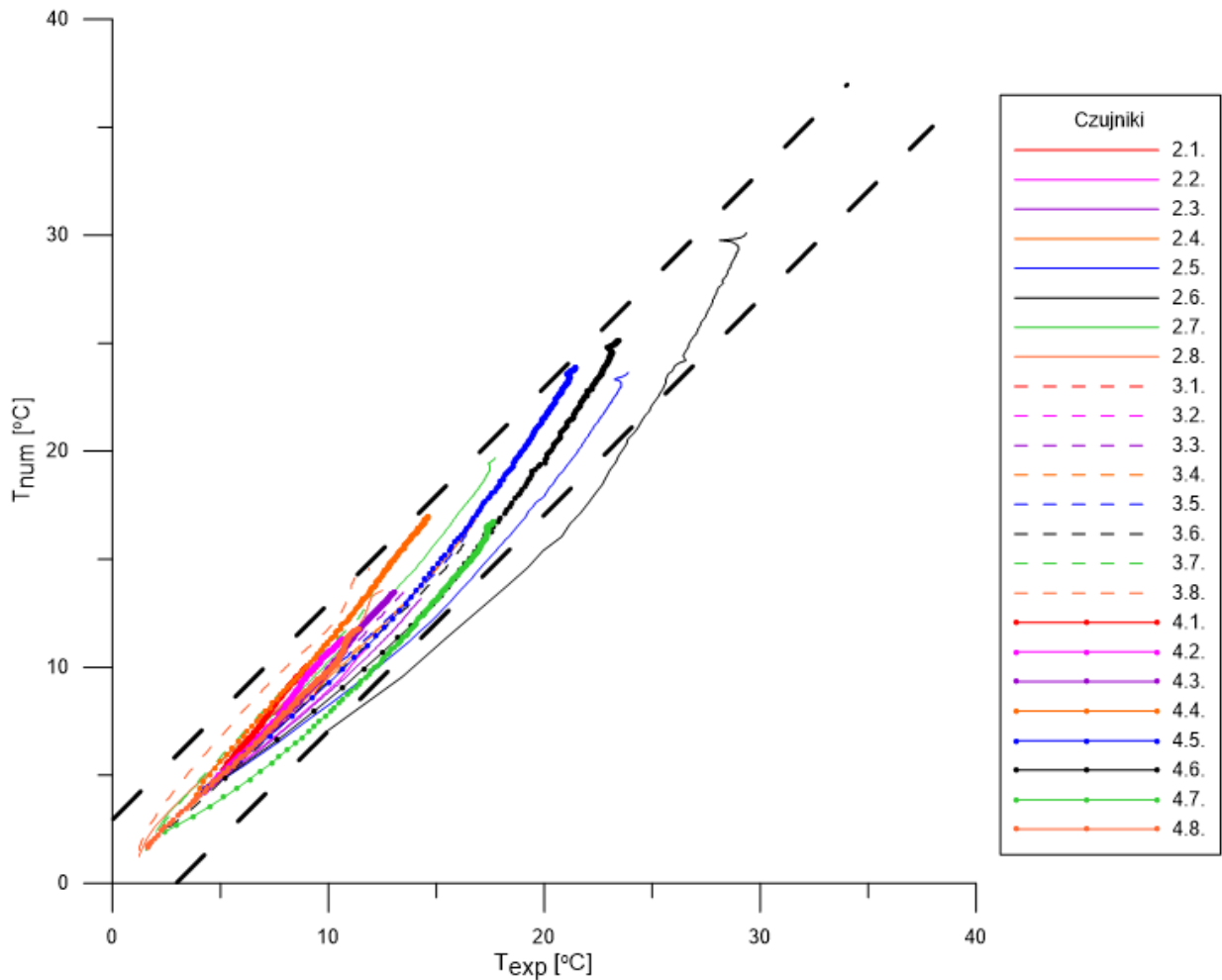


Rys. 31. Zależność temperatury gruntu od czasu linii 3 dla różnych wartości zmiennej położenia z – porównanie wartości doświadczalnych i obliczeniowych z modelu RSM



Rys. 32. Zależność temperatury gruntu od czasu linii 4 dla różnych wartości zmiennej położenia z – porównanie wartości doświadczalnych i obliczeniowych z modelu RSM

Wszystkie przebiegi mają charakter rosnący. Jedynie dla linii pomiarowej numer 3 w osi symetrii wymiennika ( $r = 0$ ), temperatura w początkowym okresie nie ulega zmianie. Ze względu na symetrię ułożenia czujników w linach 2 i 4, przebiegi na rys. 30 i 32 są podobne; ponadto w tych miejscach osiągnęte są najwyższe temperatury. Zgodność wyników jest zadowalająca z odchyleniem standardowym poniżej 1 K. Dopasowanie wyników modelu RSM i pomiarów przedstawiona ona rys. 33.



Rys. 33. Porównanie wartości temperatur doświadczalnych i obliczeniowych – linie przerywane oznaczają odchylenie  $\pm 3$  K

### 3.2.4. Podsumowanie walidacji modelu RSM

Otrzymane wyniki obliczeń wskazują, iż uzyskano dobrą zgodność wyników pomiarów temperatury gruntu z zainstalowanym wymiennikiem z wynikami otrzymanymi z rozwiązania analitycznego modelu pierścieniowego źródła ciepła RSM. Temperatura jest funkcją trzech zmiennych niezależnych: współrzędnych położenia  $r$  i  $z$  oraz czasu  $t$ . Zgodność wartości doświadczalnych z numerycznymi z powodzeniem zweryfikowano co zaprezentowano na rys. 30 - 33. Maksymalne odchylenie temperatur zmierzonych i obliczonych nie było większe niż 3 K z



wyjątkiem czujnika nr 2.6. zainstalowanego bezpośrednio w pobliżu ścianki rury wymiennika dla którego odchylenie maksymalne wynosiło 5 K.

Dodatkowo uzyskane wyniki symulacji wraz z wynikami badań doświadczalnych posłużyły do wyznaczenia parametrów cieplnych gruntu. Za pomocą dopasowania wyników do siebie uzyskano następujące wartości tych parametrów:

- dyfuzyjność cieplna  $a = 0,89 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
- objętościowa pojemność cieplna  $c_v = 3,481 \cdot 10^6 \frac{J}{m^3 \cdot K}$ .

Odchylenia pomiędzy wartościami temperatur w gruncie otrzymanymi drogą eksperymentu i rozwiązania modelu RSM są spowodowane między innymi poprzez:

- niedoskonałe rozmieszczenie czujników w gruncie,
- relatywnie duże rozmiary czujnika względem dokładności jego położenia,
- niezerowa średnica rury wymiennika,
- niedoskonałe rozmieszczenie rury wymiennika w gruncie,
- nierównomierne zagęszczenie gruntu,
- obecność wody w postaci niezwiązanej w gruncie,
- niedoskonałe dopasowanie strumienia ciepła do gruntu funkcją aproksymującą [15].

Wykorzystany model matematyczny może mieć zastosowanie w wymiennikach slinky typu *extended* tj. przy zwojach nienakładających się na siebie, rozłącznych. Dla wymienników z gęściejszym upakowaniem zwojów należałoby uwzględnić zjawisko interferencji pomiędzy zwojami.

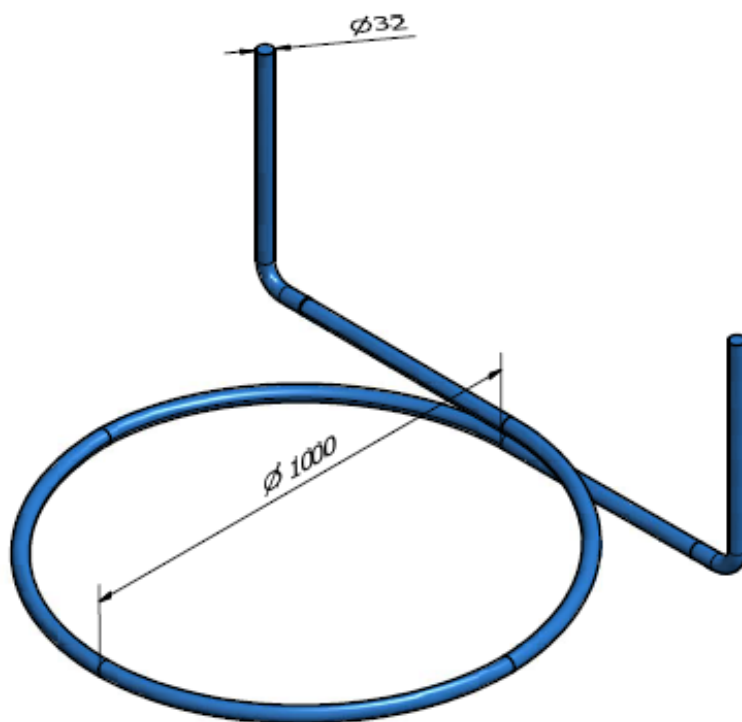
Stosowany model matematyczny dotyczy ciał nieskończonych, w których brak jest oddziaływań cieplnych z powierzchnią gruntu.

### 3.3. Badania CFD gruntowego wymiennika ciepła typu slinky

Modelowanie CFD przeprowadzono dla modelu 3D gruntowego wymiennika ciepła otoczonego modelem gruntu. Jako warunki początkowe i brzegowe wykorzystano dane z pomiarów terenowych w gruncie. Do warunków początkowych należała temperatura początkowa gruntu. Do warunków brzegowych należały temperatura powierzchni gruntu, temperatura wody zasilającej wymiennik, strumień objętościowy wody zasilającej wymiennik. Obliczenia symulacyjne wykonano w programie *CFX Flow* będącym częścią pakietu *Ansys*.

#### 3.3.1. Model obliczeniowy wraz z założeniami

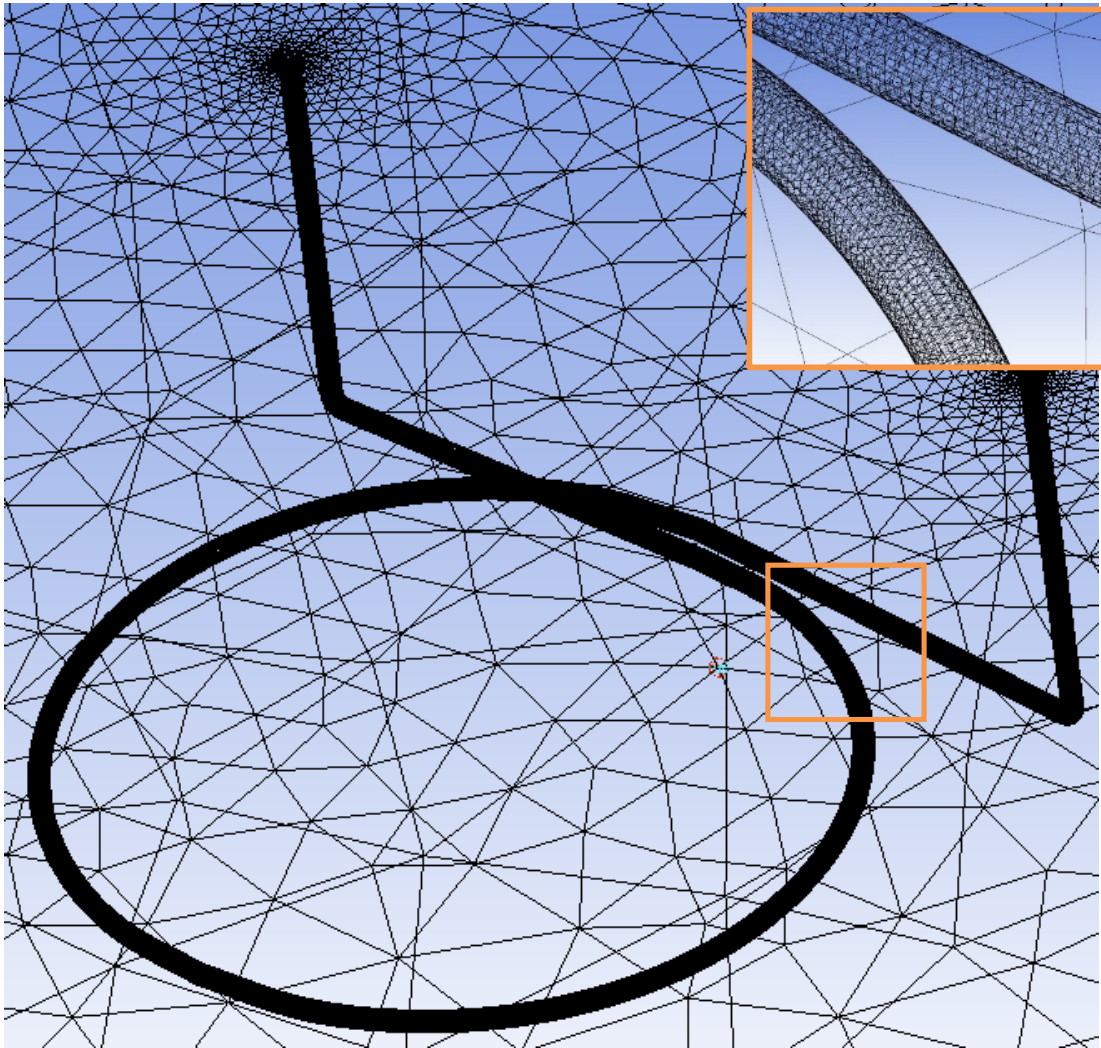
W celu wykonania symulacji CFD przygotowano model wymiennika odzwierciedlający geometrię rzeczywistego wymiennika ciepła zainstalowanego w gruncie. Model powstał jako złożenie dwóch brył. Pierwsza to bryła odzwierciedlająca otoczenie wymiennika czyli badany grunt. Natomiast druga to pętla gruntowego wymiennika ciepła. Geometrię wymiennika przedstawiono na rys. 34.



Rys. 34. Geometria pętli gruntowego wymiennika ciepła

Po wykonaniu modelu 3D dokonano jego siatkowania. Wybrano metodę automatyczną bez warstwy przyściennej. Powstała siatka modelu składa się z 1 751 031 elementów i 366 602

węzłów i cechuj się dobrą jakością. Poglądowy rysunek siatki powierzchniowej przedstawiono na rys. 35.



Rys. 35. Siatka obliczeniowa modelu CFD jednej pętli wymiennika slinky

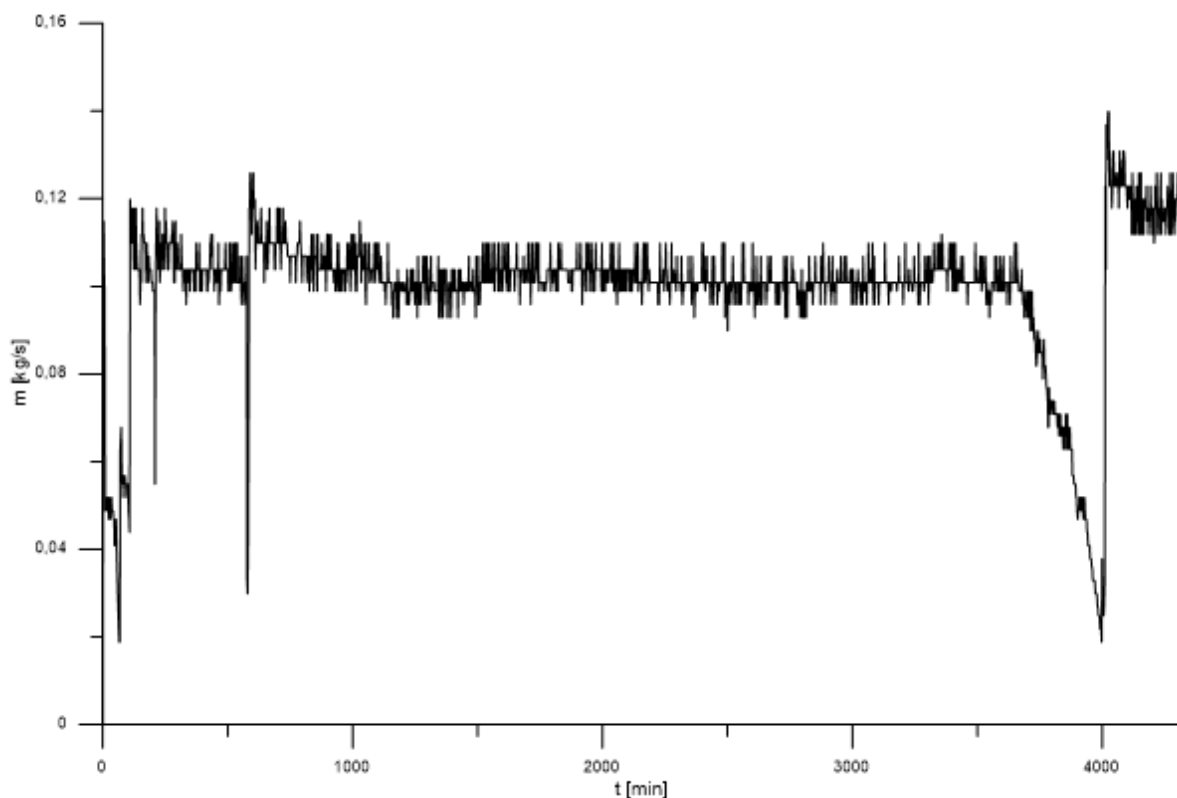
Materiałem który przyjęto dla rury wymiennika ciepła był PE o parametrach  $\rho = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  i  $c_p = 2,3027 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ . Ściankę rury wymiennika zdefiniowano jako *thin material* o grubości rury rzeczywistego wymiennika tj. 2 mm.

Model gruntu zdefiniowano jako tzw. *continous solid* z opcją *Heat Transfer – Thermal Energy* która jest wymagana w symulacji procesów nieustalonych w czasie.

Jako czynnik roboczy w wymienniku przyjęto wodę – *continous fluid* z opcją *heat transfer – Thermal Energy Model*. Przyjętym modelem turbulencji przepływu był model *k-epsilon*.

W następnym kroku sformułowano warunki brzegowe. Warunek brzegowy na wlocie do wymiennika przyjęto jako inlet i wprowadzono do niego zmiany temperatury i natężenia

przepływu czynnika grzewczego w czasie zmierzone przez ciepłomierz w rzeczywistym wymienniku ciepła. Rozkłady te przedstawiono na rys. 36 i 37.



Rys. 36. Strumień masowy wody na wlocie do wymiennika – warunek brzegowy modelu CFD



Rys. 37. Temperatura wlotowa cieczy do wymiennika – warunek brzegowy modelu CFD

Do określenia turbulencji wybrano opcję *Intensity and length scale* z parametrami:

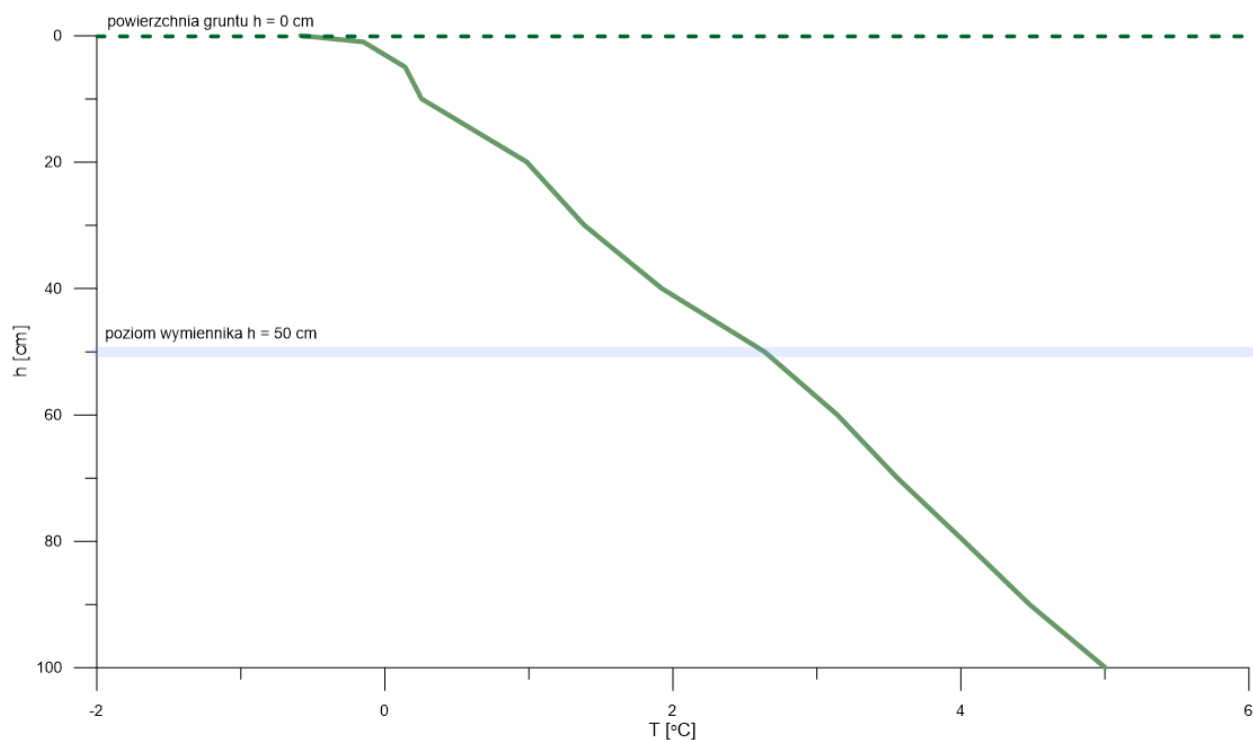
- *Fractional intensity*  $I = 0,055$ , wyliczonym ze wzoru [17] (46):

$$I = 0,16 \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}} = 0,16 \cdot 4905,487^{-\frac{1}{8}} = 0,055 \quad [17]$$

- *Eddy Length scale* = 28 mm (średnica hydrauliczna rury wymiennika).

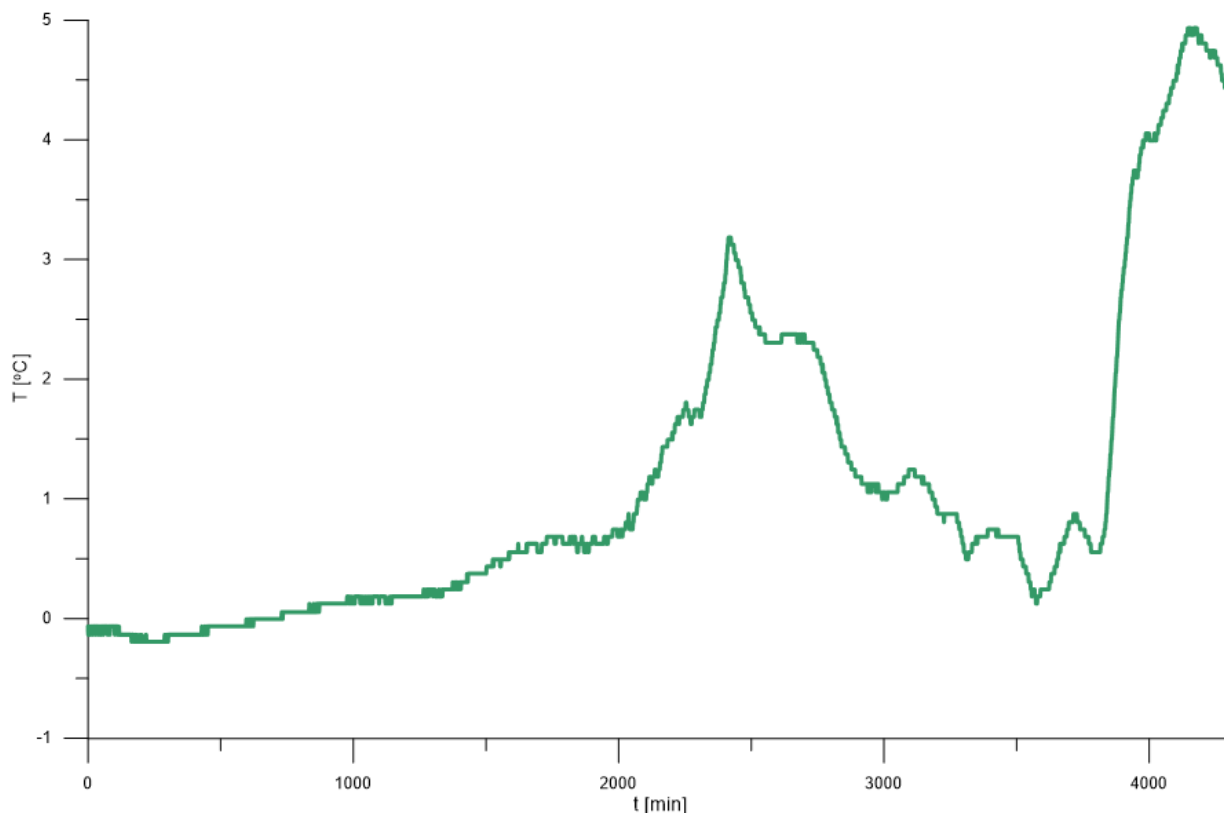
Warunek brzegowy na wylocie z wymiennika zdefiniowano jako *outlet*. Ścianki pionowych rurek wymiennika zdefiniowano jako przegrody adiabatyczne. Poziomy fragment wymiennika będący powierzchnią wymiany ciepła z gruntem zdefiniowano jako połączenie *fluid – solid* z opcją *Heat Transfer – Conservative Heat Flux* ze wspomnianym warunkiem brzegowym *thin material*.

Następnie sformułowano warunki początkowe symulacji. Jako temperaturę początkową gruntu przyjęto rozkład temperatury po głębokości będący średnią z trzech czujników zainstalowanych w bezpośrednim otoczeniu wymiennika (rys. 38).



**Rys. 38. Temperatura początkowa gruntu będąca średnią z temperatury początkowej z pomiarów terenowych dla linii 2,3 i 4 – warunek początkowy modelu CFD**

Jako temperaturę na powierzchni gruntu przyjęto przebieg temperatury przy powierzchni podczas dokonywania pomiarów odczytany z wskazań czujnika 3.12 (rys. 39).



**Rys. 39. Temperatura powierzchni gruntu – warunek brzegowy modelu CFD**

Temperaturę początkową płynu w rurze wymiennika założono 5 °C a jego turbulencję początkową 5 %. Do rozwiązania modelu wybrano analizę niestabilną w czasie – *transient*. Czas trwania symulacji to 72 godziny. Wyniki archiwizowano co 15 minut.

### 3.3.2. Wyniki symulacji CFD

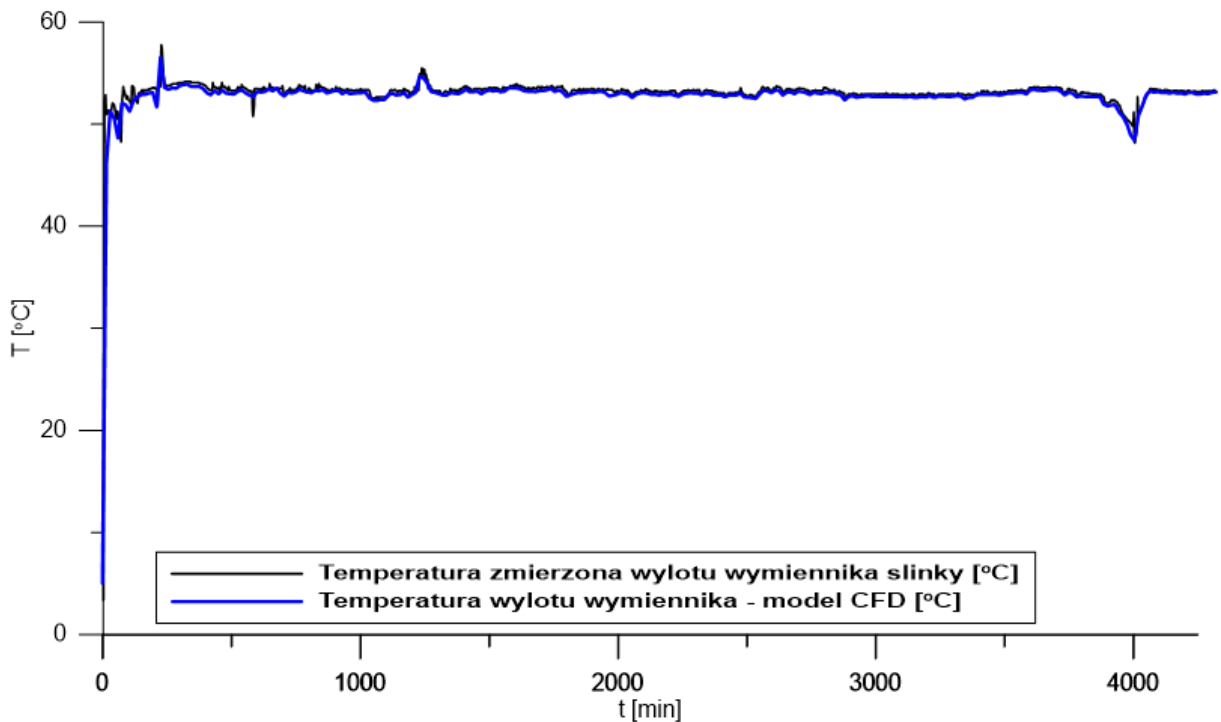
Symulacja CFD przeprowadzona dla modelu opisanego w poprzednim punkcie w porównaniu z wynikami otrzymanymi z doświadczeń terenowych stanowiła podstawę do przeprowadzenia jego walidacji. W tym celu podczas symulacji prowadzono akwizycję następujących wyników:

- temperatury wody opuszczającej gruntowy wymiennik ciepła,
- temperatur gruntu wokół wymiennika odzwierciedlających linie pomiarowe 2, 3 i 4,
- ilości ciepła dostarczonego do gruntu.

Następnie w celu przeprowadzenia walidacji dokonano analizy każdej wymienionej powyżej wielkości.

Przedstawiono porównanie serii czasowych temperatury wody opuszczającej wymiennik, otrzymane z pomiarów oraz jako wynik symulacji CFD (rys. 40).

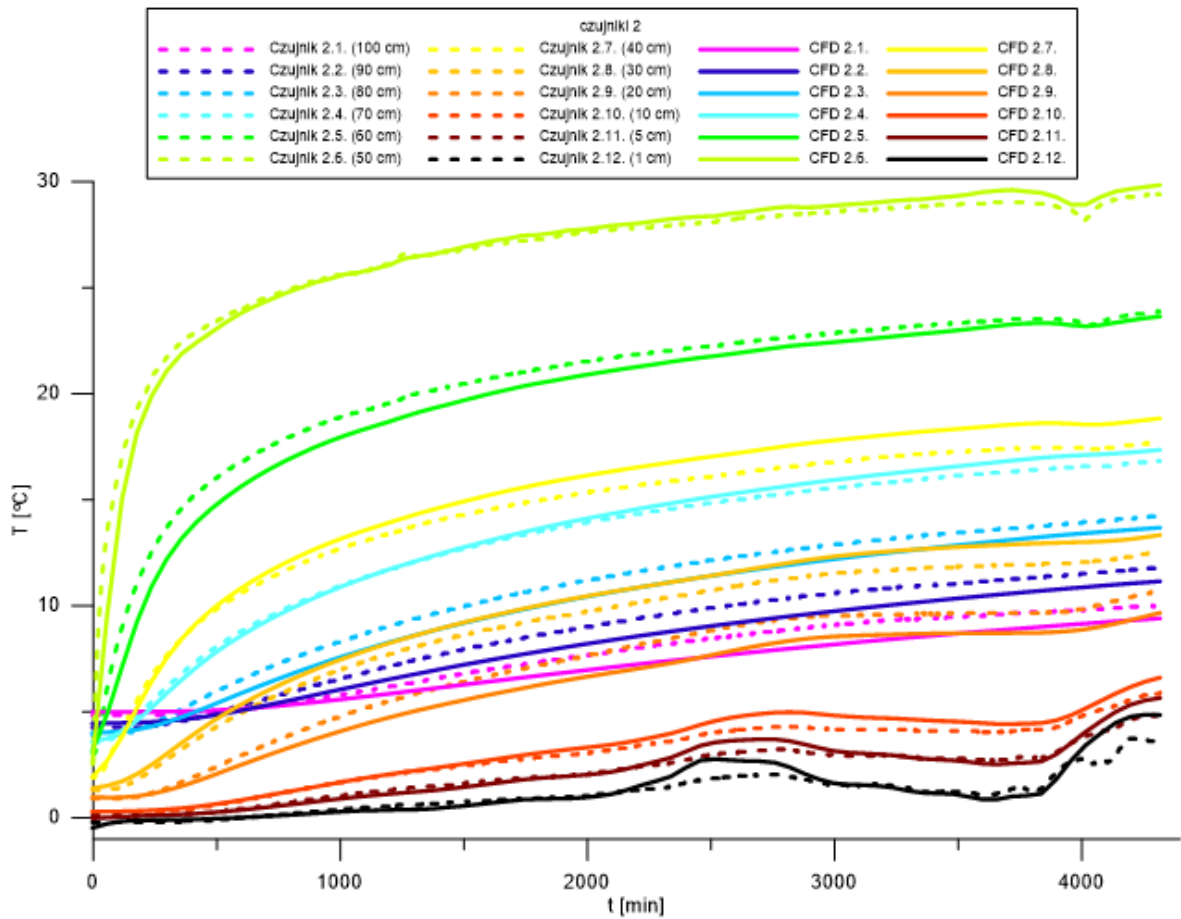
Wyniki modelowania CFD temperatury wylotowej wymiennika slinky mają bardzo dobrą zgodność z wynikami pomiarów. Maksymalna różnica temperatur między tymi wartościami wyniosła 0,1 °C. Minimalnie większe rozbieżności zanotowano dla początkowego okresu oraz sytuacji awaryjnej.



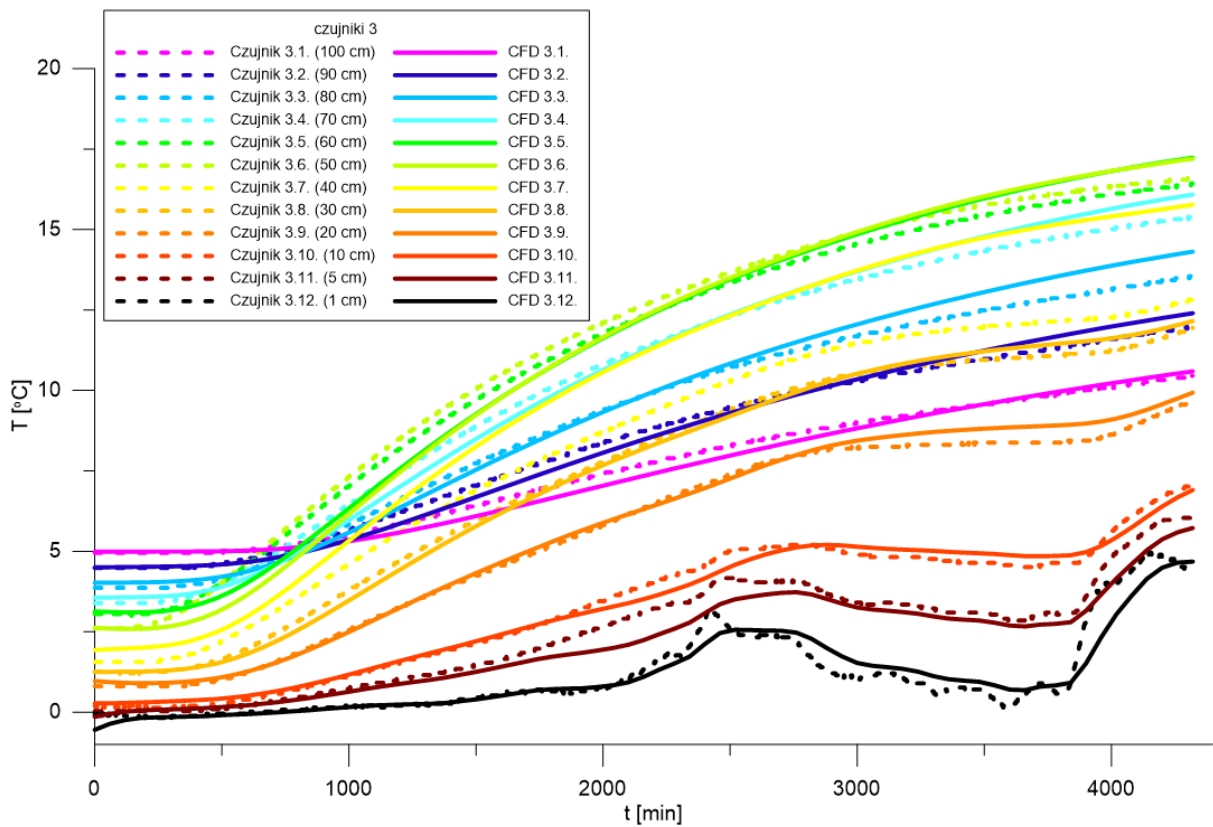
Rys. 40. Porównanie temperatur na wylocie z wymiennika doświadczalnej i CFD

Można zatem stwierdzić że symulacja CFD przy zastosowaniu realnych warunków eksploatacji wymiennika z bardzo dobrą dokładnością przewiduje zmiany temperatury czynnika roboczego na wylocie z wymiennika do pompy ciepła. Ma to szczególne znaczenie dla modelowania pracy projektowanych wymienników. Na uwagę zasługuje fakt, iż modelowanie CFD ukazało wpływ sytuacji awaryjnej na temperaturę wylotową wymiennika w okolicach 3800 minuty procesu.

Na rys. 41 - 43 przedstawiono porównanie zmian temperatur w gruncie w czasie całego okresu trwania badań, otrzymanych w wyniku pomiarów i symulacji CFD, dla drugiej, trzeciej i czwartej linii czujników.

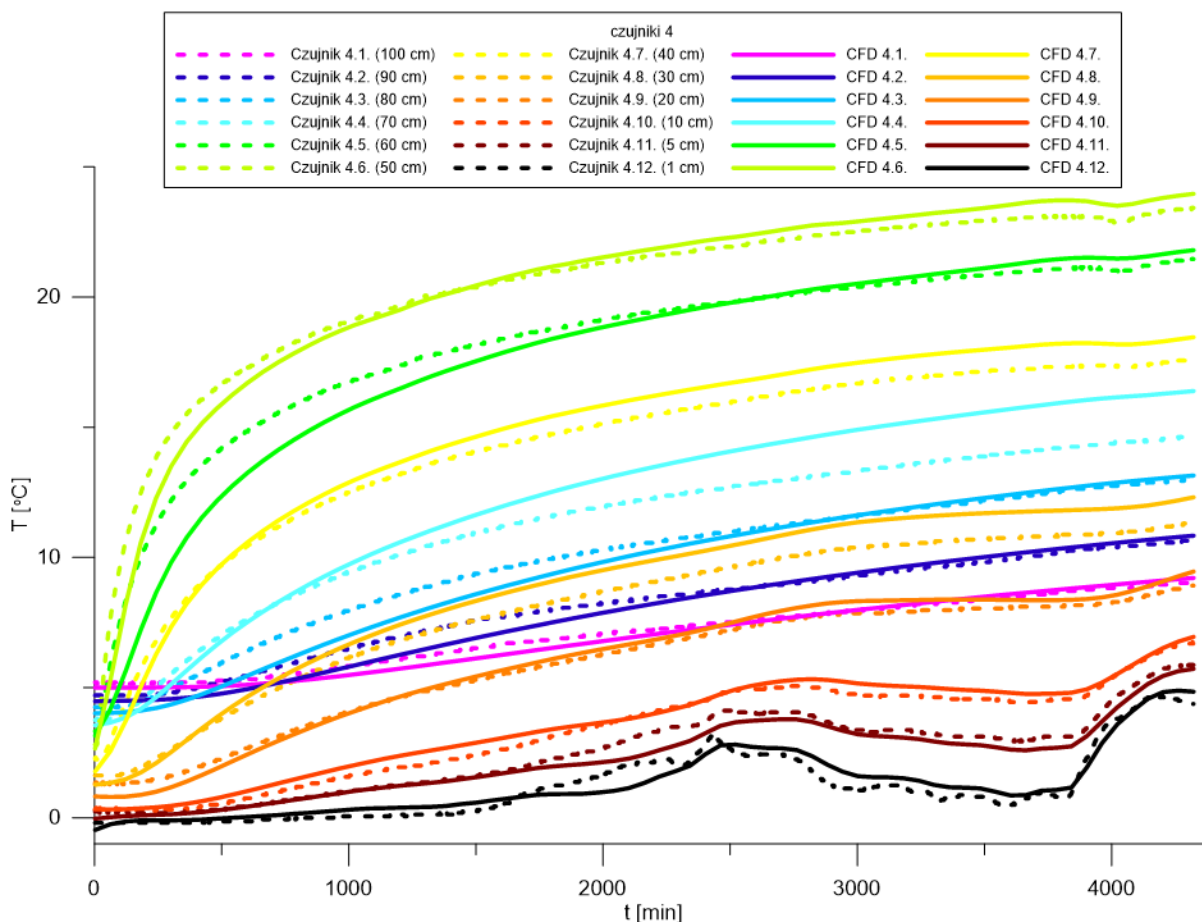


Rys. 41. Porównanie zmian temperatur w gruncie linia 2 - pomiary i symulacje CFD



Rys. 42. Porównanie zmian temperatur w gruncie linia 3 - pomiary i symulacje CFD





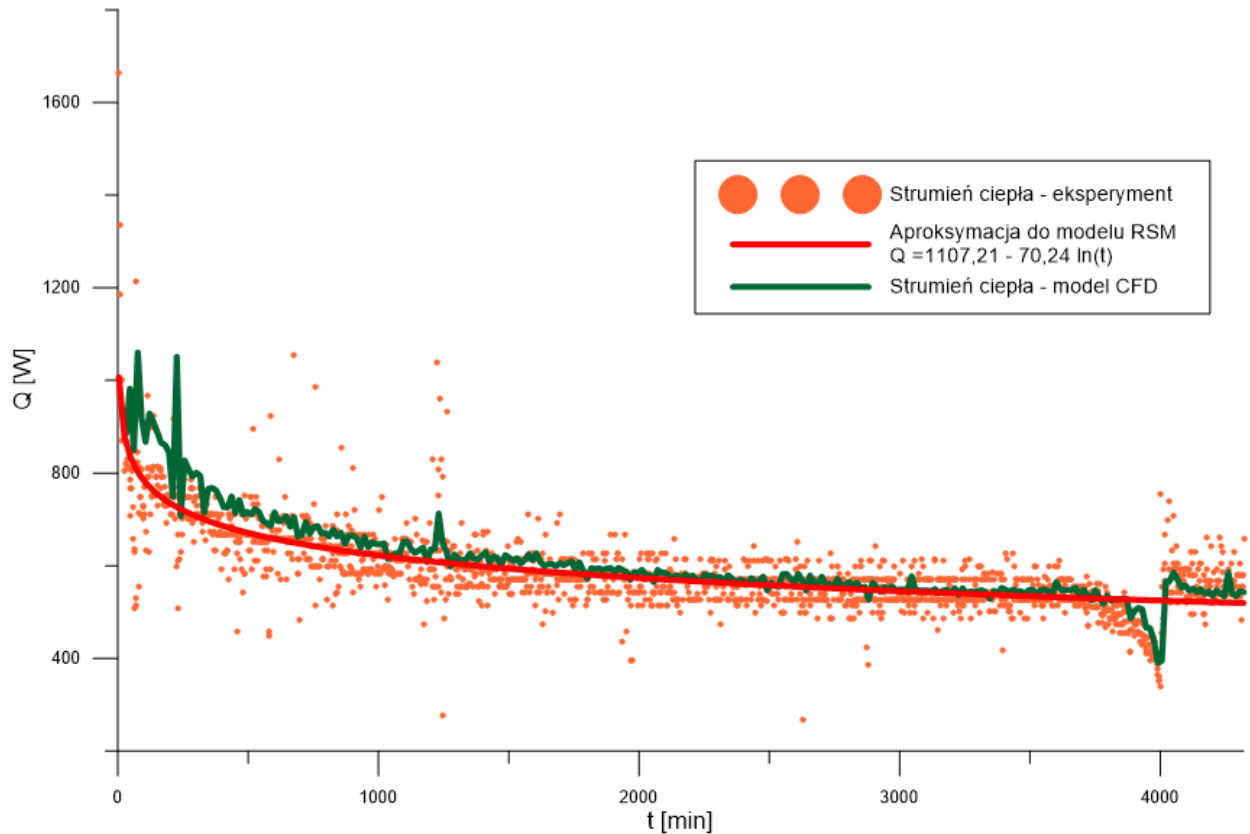
Rys. 43. Porównanie zmian temperatur w gruncie linia 4 - pomiary i symulacje CFD

Porównanie uzyskanych wyników wykazało dobrą zgodność ilościową. Zmiany temperatur gruntu w czasie pokrywają się z wynikami modelowania CFD. Dodatkowo można zaobserwować odwzorowanie przez symulacje CFD kilku zjawisk które zaszły podczas wykonywania doświadczeń na rzeczywistym wymienniku. Mianowicie z wykresów można odczytać, iż w czasie 3800 minut nastąpił chwilowy spadek temperatury gruntu w otoczeniu wymiennika, co ukazują wyniki m. in. z czujników 4.5. 4.6. i 4.7. W tym czasie nastąpiło chwilowe zapowietrzenie rzeczywistego wymiennika. Analogiczne zjawisko wykazała symulacja CFD. Symulacja wykazała jak krótkotrwałe zapowietrzenie wymiennika wpływa na temperaturę wody w wymienniku, jak i temperaturę w gruncie w którym zainstalowany jest on zainstalowany. Modelowanie CFD pozwala także na przewidywanie zmian temperatur gruntu przy jego powierzchni czyli tam, gdzie wpływ temperatury otoczenia jest największy. Wyniki pomiarów m. in. z czujników 4.10., 4.11. i 4.12. przedstawiają wpływ temperatury otoczenia na temperaturę w gruncie.

Porównując zmiany temperatury gruntu w czasie, uzyskane eksperymentalnie i poprzez symulacje CFD, zauważono rozbieżności wynoszące maksymalnie do 2 °C w otrzymanych

wynikach. Rozbieżności te spowodowane były niedokładnościami w instalacji czujników w gruncie, długością elementów pomiarowych (50 mm) a także uproszczeniami w modelu CFD, który nie uwzględniał wpływu wód gruntowych oraz migracji wilgoci w gruncie, jego niejednorodności i faktu, że struktura gruntu w obrębie wykopu była zmieniona względem gruntu nienaruszonego, poprzez oczyszczenie z kamieni i częściowe przesuszenie na czas wykonywania wykopu

Następnie analizowana była ilość ciepła dostarczonego do gruntu (rys. 44).



Rys. 44. Energia oddana do gruntu – porównanie wyników pomiarów i CFD

Z porównania (rys. 44) wynika iż modelowanie CFD jest w stanie bardzo dokładnie odwzorować strumień ciepła, jaki wymiennik slinky wymienia z gruntem. Wspomniany wcześniej stan awaryjny jest odwzorowany z dużą dokładnością a ogólny charakter przebiegu procesu jest oddany wiernie. Należy zaznaczyć, że w momencie kiedy front temperatury dociera do osi symetrii wymiennika ( $r = 0$ ) następuje działanie hamujące intensywność wymiany ciepła z gruntem.

### 3.3.3. Podsumowanie walidacji modelu CFD

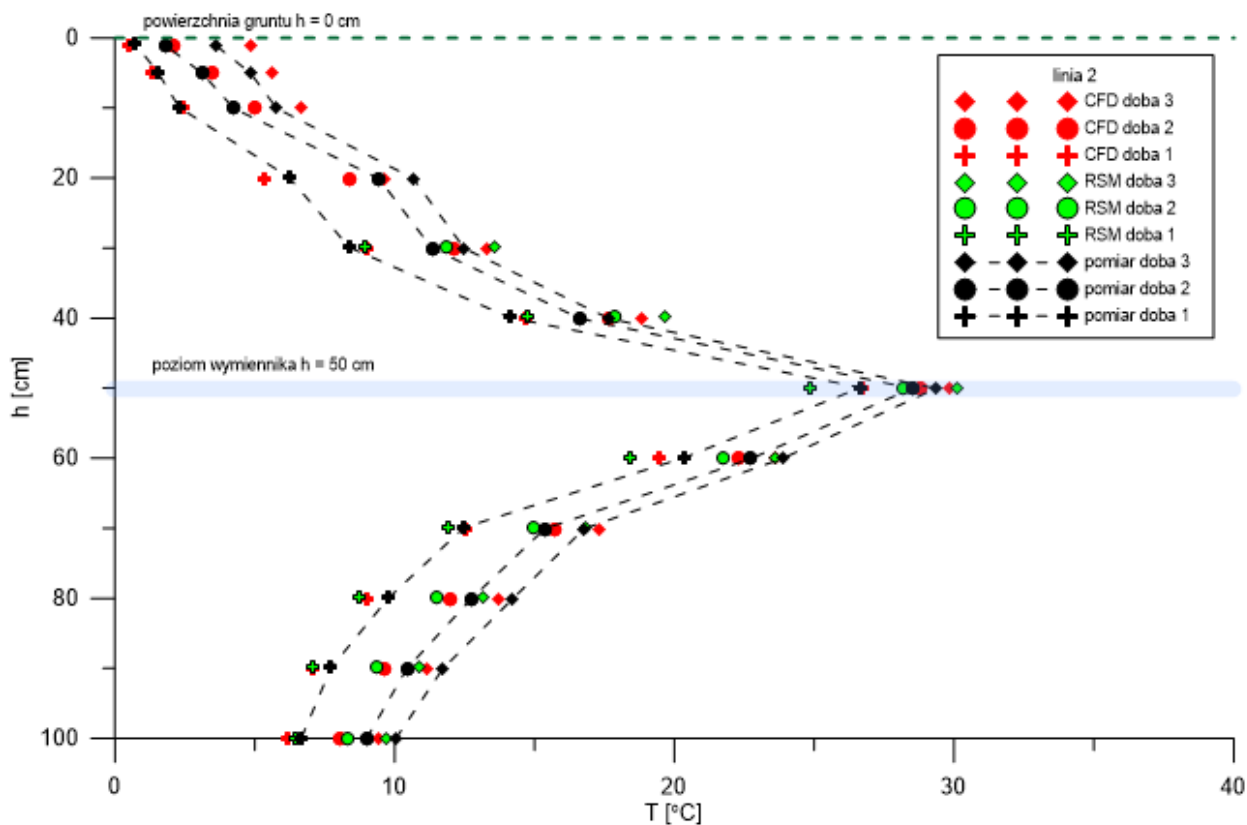
Analizując przedstawione w poprzednim punkcie porównanie wyników doświadczeń terenowych na rzeczywistym wymienniku ciepła z wynikami symulacji CFD, które przedstawiono w poprzednim punkcie, można sformułować następujące wnioski:

- stosując modelowanie CFD można w sposób realny oddać warunki i wyniki pracy gruntowego wymiennika ciepła,
- modelowanie CFD umożliwia analizę pracy GWC w stanie nieustalonym w czasie,
- przy użyciu obliczeń CFD można wyznaczyć wartości temperatur w dowolnym miejscu geometrii gruntu co może znaleźć zastosowanie przy analizie warunków eksploatacji wymiennika w niekorzystnych warunkach oraz sytuacjach ekstremalnych i awaryjnych, oraz w czynnościach projektowych,
- wyniki symulacji CFD umożliwiają wyznaczenie zmian mocy cieplnej dostarczanej lub pobieranej z gruntu podczas eksploatacji wymiennika oraz są w stanie dostarczyć informacji co do temperatur cieczy cyrkulującej w wymienniku co ma szczególne znaczenie w ocenie chwilowego współczynnika COP.

W ocenie autora walidacja modelu CFD wynikami doświadczeń na rzeczywistym wymienniku ciepła zakończona została sukcesem, zatem wnioski można rozszerzyć. Modelowanie i symulacja CFD może służyć do projektowania gruntowych wymienników ciepła typu slinky nie tylko dla pojedynczej pętli ale również dla bardziej skomplikowanych ich aranżacji w tym dla wymienników wielorzędowych. Umożliwia to przewidzenie wydajności takiego wymiennika w krótkim i wieloletnim okresie eksploatacji oraz pozwala na określanie temperatur cieczy roboczej w każdym punkcie geometrii, co jest szczególnie ważne dla parametrów pracy pompy ciepła. Modelowanie CFD może służyć do optymalizacji wymiennika ciepła na etapie jego projektowania oraz na etapie jego eksploatacji. Umożliwia także badania wpływu warunków atmosferycznych na jego pracę i na wydajność systemu.

### 3.4. Podsumowanie i dyskusja wyników walidacji modeli

Aby dokonać pełnej dyskusji otrzymanych wyników pomiarów terenowych, modelu RSM i modelowania CFD, dokonano analizy porównawczej wyników temperatur gruntu, odpowiednio po 1, 2 i 3 dobach procesu nagrzewania gruntu. Porównanie doświadczeń z wynikami obu symulacji dla trzech linii pomiarowych przedstawiono na rys. 45, 46 i 47.

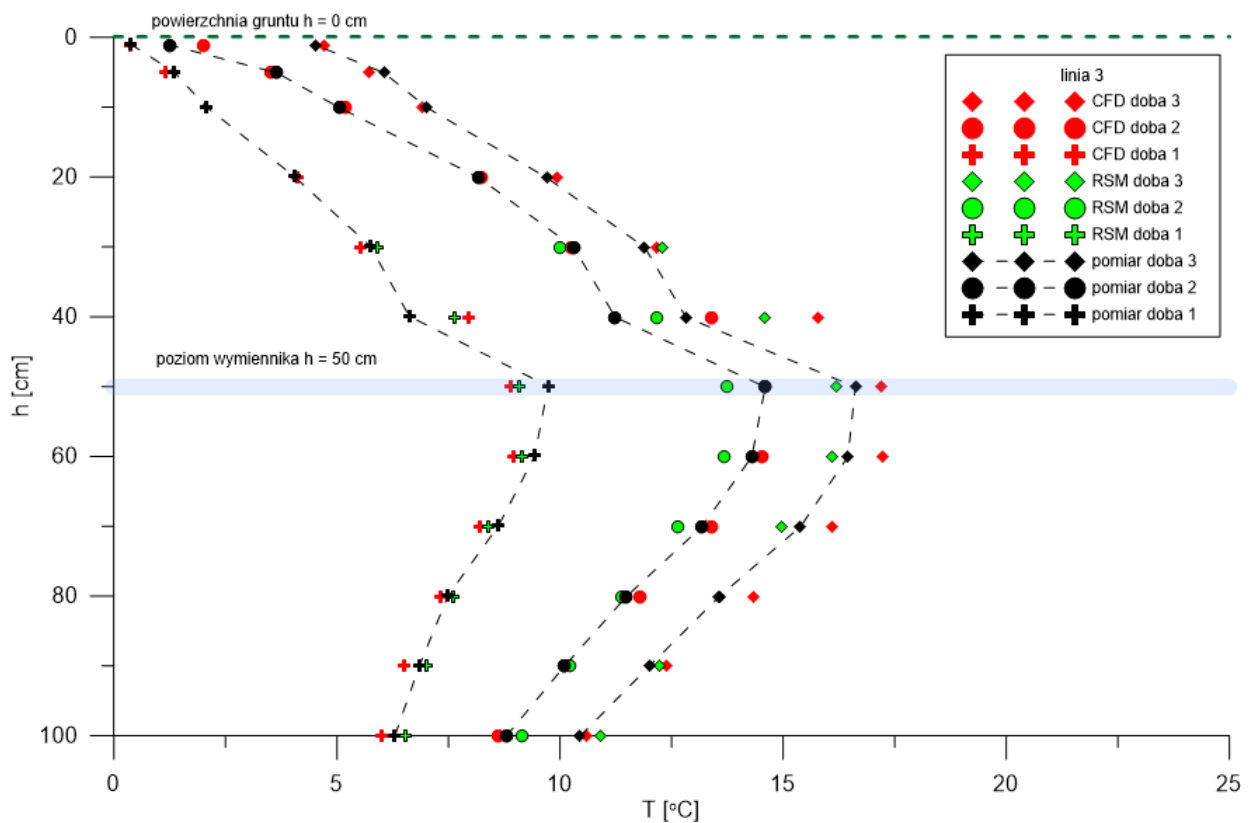


Rys. 45. Rozkłady temperatur w gruncie po 1, 2 i 3 dobach dla linii 2 – pomiary, RSM i CFD

Wyniki wykazują dobrą zgodność a różnice temperatur tak dla symulacji RSM jak i CFD są nie większe niż 3 °C względem wartości mierzonych. Dla linii 3 (rys. 47) wskazania czujnika zainstalowanego na głębokości 40 cm zaniżają odczyty względem modeli, co wskazuje na jego przemieszczenie. Objawia się to w formie załamania wykresu. Tego typu odchylenie wpływa na dokładność dopasowania minimum funkcji celu SS. Dla linii w pobliżu rury wymiennika tj. 2 (rys. 46) i 4 (rys. 48) rozkłady temperatur są zbliżone i prawie symetryczne. Co ciekawe w pobliżu wymiennika, czyli tam gdzie gradienty temperatur są największe zgodność wyników jest dla obu modeli dość duża. Dla modelu RSM ma to tym większe znaczenie ze względu na fakt, że nie uwzględnia on średnicy rury ( $d = 0$  mm).

W poprzednich punktach podsumowujących walidację modeli zarówno RSM jak i CFD omówiono zgodność wyników pomiarowych z obliczeniowymi. Wykazano, że pomimo dość skomplikowanej problematyki pomiarów terenowych można z powodzeniem stosować modele

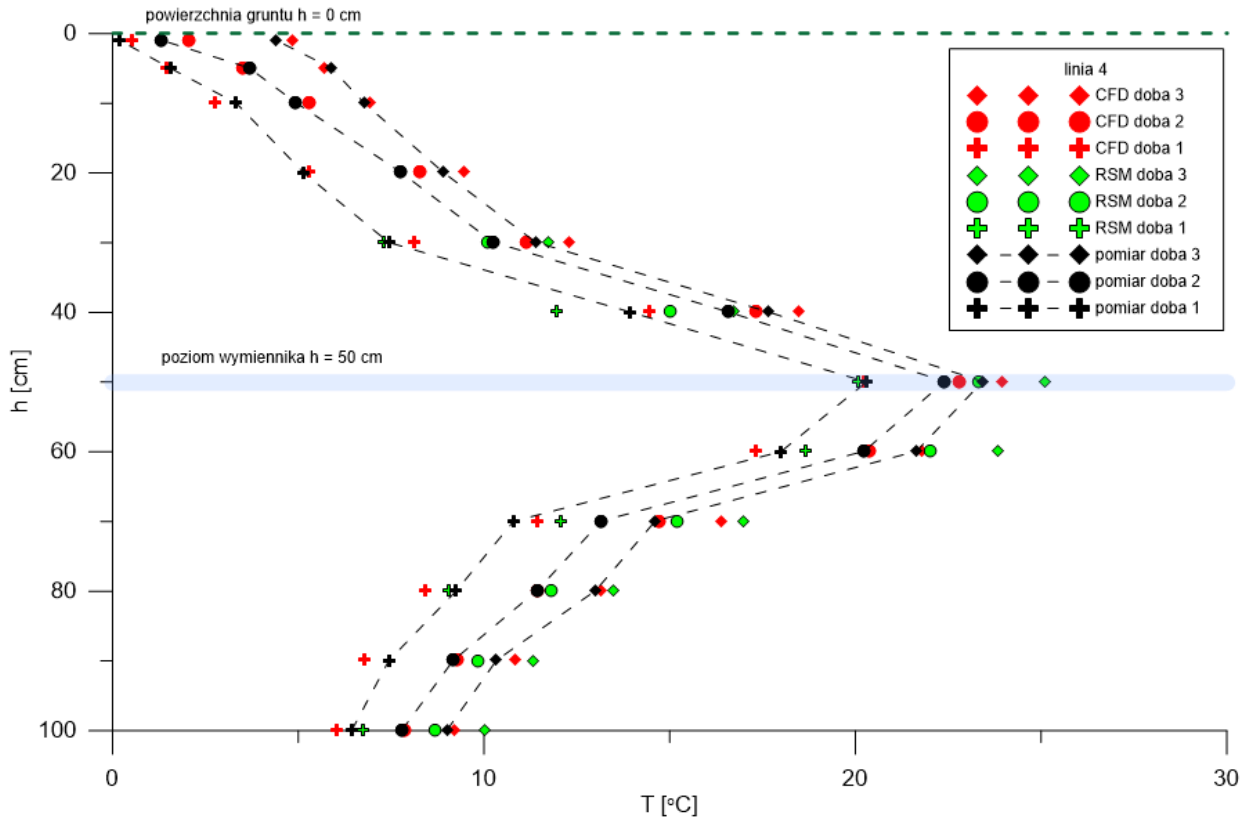
RSM i CFD do analizy pracy wymiennika ciepła typu slinky. W zastosowanej formie Model RSM posłużył do wyznaczenie parametrów cieplnych gruntu a jego danymi wejściowymi były strumień ciepła wymieniany z gruntem i temperatury pomiarowe. Ponieważ zastosowany model dał dobrą zgodność z wynikami pomiarów, stosując takie parametry wejściowe jak moc wymiennika, czy parametry cieplne gruntu można posłużyć się nim do przewidywania pola temperatur w otoczeniu wymiennika. A zatem może on służyć do określania maksymalnej wydajności cieplnej z jaką można eksploatować grunt aby zapobiec nadmiernemu wychłodzeniu oraz do określania dozwolonego czasu pracy takiego wymiennika.



Rys. 46. Rozkłady temperatur w gruncie po 1, 2 i 3 dobach dla linii 3 – pomiary, RSM i CFD

Inaczej sprawa ma się z modelowaniem CFD. W przeciwieństwie do modelu RSM strumień ciepła wymienianego z gruntem jest wynikiem modelowania a nie parametrem wejściowym. Został on, tak jak i profile temperatur w gruncie, wyznaczony w oparciu o przyjęte warunki początkowo brzegowe oraz parametry cieplne gruntu. Model RSM ma bezpośrednie zastosowanie w wyznaczaniu własności cieplnych gruntu w oparciu o pomiary i umożliwia przewidywanie rozkładu temperatur w oparciu o zadany strumień cieplny, co w prosty sposób umożliwia określenie krytycznych parametrów pracy wymiennika, tj. granicznych temperatur, strumieni ciepła i maksymalnych czasów eksploatacji. Wadą takiego modelowania jest brak możliwości oceny wpływu warunków na powierzchni gruntu na pracę układu oraz możliwości

przewidywania temperatur mediów w wymienniku. Zadawalająca zgodność wyników modelu RSM oraz pomiarów dla czujników w pobliżu rury wymiennika, pozwala na przewidywaniu temperatur w bezpośrednim otoczeniu rury z dokładnością umożliwiającą zastosowanie praktyczne, pomimo założenia o zerowej średnicy rury.



Rys. 47. Rozkłady temperatur w gruncie po 1, 2 i 3 dobach dla linii 4 – pomiary, RSM i CFD

Modelowanie CFD daje zupełnie inne możliwości. W oparciu o realne lub modelowe warunki początkowe i brzegowe dotyczące: temperatur w gruncie i otoczenia, powierzchni gruntu oraz parametrów cieczy cyrkulującej, daje ono wyniki opisujące strumień ciepła oddawany do gruntu, temperatury w każdym punkcie badanych geometrii oraz umożliwia analizę strumieni ciepła w dowolnych miejscach geometrii, tak gruntu jak i wymiennika. Modelowanie takie powinno wiernie oddawać realne działanie wymiennika, jak i jego interakcje z gruntem i otoczeniem. Za jego pomocą można także wyznaczyć parametry krytyczne, ale także można badać aktualnie pracujące instalacje.

Porównując czasochłonności wykonanych obliczeń zdecydowanie szybszym w zastosowaniu jest model RSM. Wynika to z faktu iż raz napisany program rozwiązywania tego modelu jest łatwo edytowalny i dotyczy w pierwotnej formie jednego zwoju. Natomiast stosując modele CFD można zastosować dowolną geometrię wymiennika jednak ich formułowanie jest czasochłonne i wymaga specjalistycznego oprogramowania, zarówno do modelowania geometrii

jak i do analizy numerycznej. Stosując je można uzyskiwać znacznie więcej informacji, które są możliwe do uzyskania po odpowiednim postprocesingu.

## 4. Modelowanie CFD wymienników gruntowych w pełnej skali

Jak opisano w poprzednich punktach, poziome gruntowe wymienniki ciepła instalowane są w gruncie w różnych konfiguracjach. Niestety należy zauważyć, iż w zasadzie brak jest usystematyzowanych metod praktycznego doboru dla większości rodzajów gruntowych wymienników ciepła w tym również dla wymienników slinky. W związku z tym porównanie różnych wymienników pomiędzy sobą jest utrudnione. Istnieją dobrze opisane metody doboru wymienników liniowych, zatem zaproponowano własną procedurę porównania przyjętego za wzorcowy wymiennika liniowego z wymiennikami slinky w różnych konfiguracjach. Wymiennik liniowy dobrano zgodnie z wytycznymi VDI. Następnie zweryfikowano poprawność wykonanego doboru wymiennika liniowego metodą modelowania CFD. W kolejnym etapie wykonano symulacje CFD dla wybranych konfiguracji wymienników slinky. Przeanalizowano rozkłady temperatur wokół wymienników w gruncie, porównano moce wymienników oraz ilości energii uzyskane z gruntu. Finalnie dokonano analizy porównawczej wyników symulacji wymienników slinky z wymiennikiem liniowym.

### 4.1. Problematyka doboru i badania wymienników slinky

W literaturze branżowej i fachowej podawane są wytyczne VDI oraz metody doboru liniowych gruntowych wymienników ciepła (47) (48) (49). Nie znaleziono metod obliczeniowych doboru wymienników typu slinky. Istniejące szcążkowe wytyczne dotyczą montażu wymienników tego typu i ograniczają się do informacji, że rura wymiennika nie może być dłuższa niż 125 m oraz, że poszczególne linie wymiennika slinky nie mogą być bliżej siebie niż 5 m. Można stwierdzić, że w obszarze doboru wymienników slinky istnieje biała plama w wiedzy inżynierskiej. Inżynierowie i projektanci nie mają żadnego prostego narzędzia które mogło by posłużyć do projektowania wymienników tego typu. Producenci systemów gruntowych wymienników ciepła i pomp ciepła dobierając je do konkretnego odbiorcy posługują się swoimi wewnętrznymi wytycznymi i/lub bazują na własnym doświadczeniu instalacyjnym.

Metodę rekomendowaną przez VDI oraz Polską Organizację Rozwoju Technologii Pomp Ciepła doboru liniowych gruntowych wymienników ciepła nazwano metodą PORT PC (50). Została ona zaimplementowana z prawa niemieckiego na rynek polski. Ta stosunkowo prosta, lecz szczegółowa metoda obliczeniowa, daje wartości całkowitej długości wymiennika liniowego, ilości jego biegów, powierzchni wymiany ciepła, powierzchni zabudowy gruntu i rozstawu rur w poszczególnych pętłach<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Szczegółowo chodzi tu o wytyczne VDI 4640 – w dalszej części pracy nazwano ją metodą PORT PC



Znane są ogólne wytyczne, co do instalacji gruntowych poziomych liniowych wymienników ciepła:

- wymiennik musi być umieszczony poniżej strefy przemarzania,
- długość przewodów nie powinna wynosić więcej niż 100 m na pętlę,
- Ze względu na regenerację gruntu, czas pracy sprężarki nie powinien wynosić więcej niż 1800 h w trybie monowalentym,
- odległość od granicy sąsiedniej posesji: > 3,0 m,
- minimalna odległość od fundamentów budynku: > 0,5 m,
- głębokość zabudowy, od 20 do 40 cm poniżej strefy przemarzania,
- minimalna odległość od instalacji wodociągowych, kanalizacyjnej, wody deszczowej: > 1,5 m,
- minimalna odległość od korony drzew o głębokich korzeniach: > 1,5 m,
- minimalna odległość od instalacji elektrycznych, gazowych, telekomunikacyjnych, ciepłowniczych > 1,5,
- przy krzyżowaniu się rur doprowadzających GWC należy je zaizolować na odcinku: > 3,0 m,
- odstęp między rurami doprowadzającymi (osiemi rur): > 70 cm (w przypadku nie zachowania tej odległości zaleca się zaizolowanie odcinków rur),

Zalecenia te można z powodzeniem przełożyć na wymienniki slinky, gdyż większość z nich ma charakter uniwersalny.

Należy postawić robocze pytanie. W jaki sposób należy badać i prowadzić analizę porównawczą wymienników typu slinky w różnych konfiguracjach z wymiennikiem liniowym dobranym wspomnianą wyżej metodą. Wymienniki slinky mają dużo większą niż wymiennik liniowy gęstość zabudowy gruntu rurkami a co za tym idzie przyjęcie do porównywania powierzchni zabudowy gruntu wydaje się nietrafione. Dla wymienników slinky oznaczałoby to długości rur rzędu wielu setek metrów lub nawet kilometrów (sic!). Metoda porównywania wymienników w oparciu o taką samą długość instalacji/wykopu w gruncie też wydaje się chybiona. Uznano zatem że należy porównywać wymienniki o jednakowych długościach rur i powierzchniach wymiany ciepła z gruntem. Przy takim porównaniu, powierzchnia zabudowy gruntu wymiennikiem jak i długość instalacji w gruncie będzie różna dla każdego układu, jednak długości rur wymiennika i powierzchnie wymiany ciepła będą do siebie zbliżone<sup>5</sup>. W metodzie

---

<sup>5</sup> W wymienniku slinky rura powrotna także wymienia ciepło z gruntem ale ma różną długość w zależności od gęstości upakowania zwojów poszczególnych aranżacji co wpływa na niemożność takiego zaprojektowania modelu aby powierzchnie wymiany ciepła różnych wymienników z gruntem były identyczne. Wymiennik liniowy wymienia

doboru liniowych wymienników gruntowych zdefiniowane są ograniczenia polegające na takim ich doborze, aby roczna praca sprężarki pompy ciepła nie przekraczała 1800 lub 2400 godzin, zależnie od trybu w jakim pompa ciepła pracuje. Ograniczenie to wynika z możliwości regeneracji cieplnej gruntu i żywotności sprężarki pompy ciepła. Kolejnym ograniczeniem jest rozstaw pętli wymiennika, który musi być tak zrealizowany, aby podczas eksploatacji wymiennika nie zamrzął grunt wokół niego. Kiedy ten odstęp będzie zbyt mały to istnieje ryzyko zamrożenia gruntu wokół wymiennika, co utrudni jego późniejszą regenerację.

Przeprowadzając analizę pracy wymiennika zaleca się aby uwzględnić dwa przypadki (51):

- krótkotrwały intensywny pobór ciepła z gruntu, np. ciągła praca pompy ciepła przez 48 godzin z mocą znamionową w warunkach obliczeniowych i z maksymalnym odbiorem ciepła z gruntu,
- długotrwały pobór ciepła z gruntu, np.: ciągła praca pompy ciepła z założonym średnim miesięcznym odbiorem ciepła z gruntu.

Ze względu na potrzeby porównywania wymienników slinky i liniowego oraz próbę sformułowania wytycznych doboru tychże wymienników przyjęto inną metodologię. Założono taki sposób modelowania pracy wymienników, aby sprawdzić jak będą się one zachowywały w warunkach krytycznych, czyli w takich gdy po rozpoczęciu okresu grzewczego wymiennik będzie musiał pracować w sposób ciągły przez 1800 h. Innymi słowy, wymienniki tak eksploatowany w rzeczywistości byłyby niedowymiarowane, co w praktyce instalacyjnej zdarza się i jest zjawiskiem niepożądanym. Przewiduje się, że tak przeprowadzona analiza umożliwi określenie granicznych warunków pracy, czyli takich które w praktyce nie powinny nigdy wystąpić oraz pozwoli ocenić ryzyko związane z eksploatacją wymienników slinky.

#### **4.2. Dobór gruntowego wymiennika liniowego w oparciu o metodę PORT PC i założoną wydajnością liniową**

Zgodnie z wytycznymi PORT PC oraz wytycznymi producentów, dobrano gruntowy wymiennik ciepła dla pompy ciepła o mocy chłodniczej  $\dot{Q}_k = 3,8kW$  i mocy grzewczej  $\dot{Q} = 5kW$ , wybrano rurę o średnicy zewnętrznej 32 mm i grubości ścianki 3 mm. Wymiennik dobrano dla czasu pracy sprężarki wynoszącego 1800 h/rok w nominalnych warunkach jej pracy, tzn. B0/W35. Poszczególne symbole oznaczają:

- B – rodzaj cieczy dolnego źródła ciepła - roztwór solanki

---

ciepło z gruntem poprzez linie proste oraz nawroty poszczególnych biegów wymiennika zaś wymienniki slinky poprzez zwoje i rurę powrotną.

- 0 – temperatura dolnego źródła ciepła –  $0^{\circ}\text{C}$
- W – rodzaj cieczy w obiegu grzewczym - woda
- 35 – temperatura zasilania obiegu grzewczego –  $35^{\circ}\text{C}$ .

Dla doboru wzorcowego wymiennika liniowego przyjęto, że rozstaw rur  $e_p = 0,8\text{m}$ .

W tabeli 2 zamieszczono jednostkowe wydajności cieplne dla różnych gruntów. Do obliczeń przyjęto najczęściej spotykany grunt w Polsce tj. podłoże spoiste, wilgotne.

**Tabela 2. Jednostkowa wydajność ciepła gruntu (48)**

Rodzaj podłoża	Moc poboru $q_h$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] dla $e_p = 0,8\text{m}$	
	1800 h	2400 h
Suche, nie związane podłoże	10	8
Podłoże związane, wilgotne	20-30	16-24
Podłoże nasycone wodą, piasek, żwir	40	32

Według danych z tabeli, przyjęto jednostkową wydajność cieplną:  $q_h = 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Stąd, minimalna powierzchnia zabudowy wymiennika liniowego to [18]:

$$A_0 = \frac{Q_k}{q_h} = 190\text{m}^2 \quad [18]$$

Zatem długość wymiennika wynosi [19]:

$$L = \frac{A_0}{e_p} = 243,75\text{m} \approx 237,5\text{m} \quad [19]$$

Wykorzystując wartość przewodnictwa cieplnego gruntu można określić jednostkową wydajność gruntu  $q_h$  w oparciu o wydajność liniową  $q_l$  wymiennika. Dla gruntu o przewodności cieplnej

$\lambda = 2,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  wydajność liniowa wymiennika wynosi:  $q_l = 12,5 \frac{\text{W}}{\text{m}}$  (52). Stąd jednostkowa

wydajność cieplna wynosi [20]:

$$q_h = \frac{q_l}{e_p} = 15,62 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad [20]$$

A zatem minimalna powierzchnia zabudowy takiego wymiennika zgodnie z wzorem [18] wynosi  $A_0 = 243,2\text{m}^2$  a jego całkowita długość wyliczona z wzoru [19] jest równa  $L = 304\text{m}$ .

Różnica długości wymiennika dobranego opisanymi wyżej metodami doboru dla przyjętych warunków pracy wynosi prawie 22 %. Uznano, iż bardziej dokładną metodą jest metoda oparta o współczynnik  $q_l$  i ją wybrano jako metodę odniesienia.

Maksymalną jednostkową ilość ciepła pobieranego z gruntu wyznaczono ze wzoru [21]

$$E_h = q_h \cdot t = 15,62 \frac{W}{m^2} \cdot 1800 \frac{h}{rok} = 28,116 \frac{kWh}{m^2 \cdot rok} \quad [21]$$

Szacowana całkowita ilość energii uzyskanej z wymiennika w ciągu roku to [22]:

$$E_g = E_h \cdot A_0 = 28,116 \frac{kWh}{m^2 \cdot rok} \cdot 243,2 m^2 = 6837,8 \frac{kWh}{rok} \quad [22]$$

Jest to wartość energii która dla budynku niskoenergetycznego o współczynniku

$$EUco = 25 \frac{kWh}{m^2 \cdot rok} \text{ wystarczy do ogrzania powierzchni ponad } 270 m^2.$$

**Tabela 3. Współczynnik EUco – zapotrzebowanie na energię użytkową budynków**

$EUco \left[ \frac{kWh}{m^2 \cdot rok} \right]$	Rodzaj budynku
powyżej 70	dom poza klasą energooszczędności
30-70	dom energooszczędny
15-30	dom niskoenergetyczny
1-15	dom pasywny
0	dom zero energetyczny

W literaturze branżowej podane są informacje o tym, że należy nie przekraczać 100 m długości rury dla jednej pętli wymiennika liniowego natomiast dla wymiennika slinky przyjmuje się wartość 125 m (49). Jednocześnie podawane są informacje, że całkowita długość przewodów doprowadzających i odprowadzających nie powinna przekraczać 30 m (48). Gdyby wartość ta została przekroczona, należy zwiększyć średnicę przewodów doprowadzających. Zatem, wyznaczony wymiennik ciepła o długości L podzielono na trzy odcinki, każdy o długości 101,3 m. Wymiennik liniowy o takiej długości został przyjęty jako wymiennik wzorcowy do porównania z wymiennikami typu slinky.

### 4.3. Założenia modelowania CFD

Kolejnym etapem było wykonanie modelowania CFD i analiza uzyskanych wyników dla liniowego wymiennika wzorcowego, którego długość wyznaczono rozdziale 4.2. oraz dla czterech konfiguracji wymiennika typu slinky. Badano wymienniki slinky o zwojach rozłącznych, stycznych, zachodzących na siebie o 250 mm i zachodzących na siebie o 500 mm. Długości wymienników typu slinky określono tak, aby czynna długość rury wymieniającej ciepło była taka sama, jak długość rury wymieniającej ciepło we wzorcowym wymienniku linowym. Model 3D liniowego wymiennika gruntowego przygotowano dla jednej nitki wymiennika, czyli dla długości  $l = 101,3$  m. Założono że poszczególne nitki wymiennika nie wpływają wzajemnie

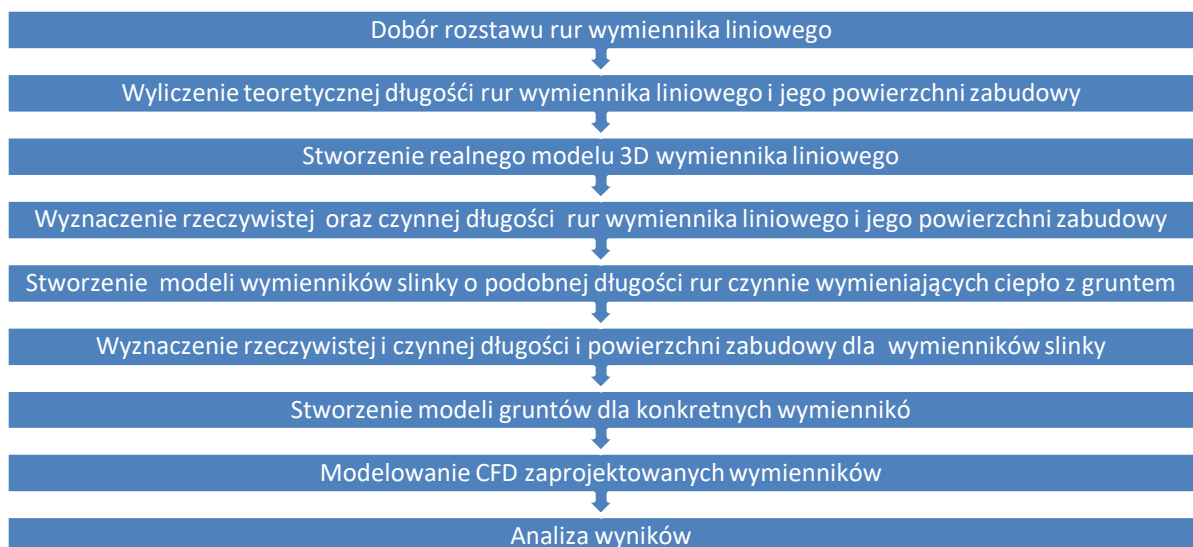
na siebie. Ze względów konstrukcyjnych, konieczne było urealnienie geometrii wymiennika związane z przewodami doprowadzającymi tak, aby całkowita długość nitki nie przekraczała zalecenia montażowego, czyli maksymalnie 135 m.

Model 3D wymiennika liniowego, jak i modele wymienników slinky, składają się z części wymieniającej ciepło z gruntem oraz z adiabatycznych pionowych i poziomych rur doprowadzających. Na powierzchnię wymiany ciepła wymiennika liniowego składają się proste odcinki rur oraz łączące je łuki. Z kolei na powierzchnię wymiany ciepła wymienników slinky składają się spirale, łączące je elementy oraz rura powrotna biegnąca wzdłuż wymiennika.

Tok czynności podczas wykonywanych badań przedstawiał się następująco:

1. Utworzenie trójwymiarowego modelu gruntowego liniowego horyzontalnego wymiennika ciepła oraz modeli wymienników slinky o różnych odstępach pomiędzy spiralami w skali 1:1. Modele wykonano tak, aby czynna długość rurek wymienników slinky była zbliżona do czynnej długości rurek wymiennika liniowego.
2. Po utworzeniu modeli 3D wyznaczenie takich parametrów jak: powierzchnia zabudowy, całkowita długość i całkowita powierzchnia wymiany ciepła, całkowita powierzchnia zabudowy w gruncie, a także wielkości wynikające z długości rury czynnie wymieniającej ciepło.
3. Utworzenie modelu gruntu dla każdego z analizowanych wymienników.
4. Wykonanie symulacji CFD dla przyjętego czasu pracy wymienników tj. dla ciągłego okresu pracy sprężarki równego 1800 h.
5. Przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników.

Proces doboru wymiennika liniowego, tworzenia geometrii i modelowania CFD obrazuje diagram na rys 48.



Rys. 48. Sposób tworzenia modeli CFD

#### 4.4. Geometria modeli CFD

W skład geometrii wymienników stosowanych do symulacji CFD wchodziły następujące elementy:

- geometria gruntu,
- geometria gruntu w otoczeniu wymiennika,
- geometria wymiennika.

Podziału geometrii gruntu dokonano w celu późniejszej możliwości nałożenia dokładniejszej siatki obliczeniowej, bezpośrednio w otoczeniu wymiennika.

Zbiorcze parametry geometryczne modeli gruntów i wymienników gruntowych przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4. Objętości i wymiary badanych geometrii**

Parametr	Jednostka	Model wymiennika				
		Płaski liniowy	Slinky rozłączny	Slinky styczny	Slinky zachodzący o 250 mm	Slinky zachodzący o 500 mm
Objętość całości modelu	$m^3$	4400	5000	4000	4000	4000
Objętość gruntu bez części wokół wymiennika	$m^3$	3812	449	3640	3640	3640
Objętość części gruntu wokół wymiennika	$m^3$	587,94	449,93	359,94	359,94	359,94
Objętość gruntowego wymiennika ciepła	$m^3$	0,059766	0,065466	0,063143	0,06197	0,057613
Szerokość całości gruntu	$m$	20	10	10	10	10
Długość całości gruntu	$m$	22	50	40	40	40
Głębokość całości gruntu	$m$	10	10	10	10	10
Głębokość posadowienia wymiennika	$m$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

W tabeli 5 przedstawiono charakterystykę geometryczną modeli wymienników ciepła.

**Tabela 5. Charakterystyka geometryczna różnych modeli wymienników**

	Symbol	Jednostka	Model wymiennika				
			Płaski liniowy	Slinky rozłączny	Slinky styczny	Slinky zachodzący o 250 mm	Slinky zachodzący o 500 mm
Dobór wymiennika liniowego metodą analityczną							
Moc chłodnicza	$Q_k$	$kW$	3,8				
Jednostkowy strumień ciepła	$q_h$	$W / m^2$	15,625				
Odstęp między rurami wymiennika [m]	$e_p$	$m$	0,8				
Powierzchnia obliczeniowa zabudowy wymiennika	$A_0 = \frac{Q_k}{q_h}$	$m^2$	243				
Długość obliczeniowa rur całego wymiennika liniowego	$l = \frac{A_0}{e_p}$	$m$	304	304	304	304	304
Długość całkowita rur wymiennika slinky taka sama jak wymiennika liniowego							
Maksymalna długość jednego obiegu	$l'_{max}$	$m$	100	100	100	100	100
Długość rury w jednym obiegu wymiennika obliczeniowa	$l'_{ob}$	$m$	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Długość obliczeniowa rur całego wymiennika po zaokrągleniu	$l_{wym}$	$m$	300	300	300	300	300
Długość rury w jednym obiegu wymiennika obliczeniowa po zaokrągleniu	$l'$	$m$	100	100	100	100	100
Ilość obiegów wymiennika	$n = \frac{l_{wym}}{l'}$	szt.	3	3	3	3	3
Współczynnik zabudowy	$a_p$	$\frac{m}{m^2}$	1,25	3,09	4,14	5,19	7,28
Pole zabudowy gruntu dla 300 m rury	$A$	$m^2$	240	97,1	72,46	57,8	41,21
Powierzchnia zabudowy gruntu spiral jednego obiegu wymiennika obliczeniowa	$a'$	$m^2$	80	32,362	24,155	19,268	13,736
Ilość zwojów na m <sup>2</sup> gruntu	$n_z$	$\frac{1}{m^2}$	N/D	0,66	1	1,33	2
Ilość obliczeniowa pętli wymiennika slinky w jednym obiegu	$n = n_z \cdot A'$	szt.	N/D	21,36	24,1	25,63	27,47
Średnica wewnętrzna rurki wymiennika	$d_w$	$mm$	25	25	25	25	25
Obwód zwilżany rurki wymiennika	$o = \pi \cdot d_w$	$m$	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079
Obliczeniowa powierzchnia wymiany ciepła jednego obiegu wymiennika	$f = a' \cdot a_p \cdot o$	$m^2$	7,854	7,854	7,854	7,854	7,854

W tabeli 6 zamieszczono parametry rzeczywistych geometrii stworzonych modeli wymienników. Zaprojektowane wymienniki są to układy o długości około 100 m będące 1/3 modeli.

**Tabela 6. Parametry jednego obiegu modelowanych wymienników – modele CFD**

Parametry rzeczywiste badanych modeli CFD wymienników							
	Symbol	Jednostka	Model wymiennika				
			Płaski liniowy	Slinky rozłączny	Slinky styczny	Slinky zachodzący o 250 mm	Slinky zachodzący o 500 mm
ilość pętli wymiennika slinky w jednym obiegu	$n_p$	szt.	N/D	21	24	26	27
długość rury całkowita rzeczywista	$l'_{rzech}$	$m$	125,823	127,47	128,779	126,309	117,46
długość czynna rzeczywista <sup>6</sup>	$l'_{czrzech}$	$m$	111,323	124,36	125,672	123,202	114,353
długość części spiralnej rzeczywista	$l'_{sp}$	$m$	N/D	92,83	99,647	101,608	98,679
powierzchnia czynna wymiany ciepła	$f'$	$m^2$	8,743	9,767	9,870	9,677	8,981
Powierzchnia czynna spiral	$f'_{sp}$	$m^2$	N/D	7,03	7,826	7,980	7,75
Powierzchnia adiabatyczna	$f'_{ad}$	$m^2$	0,821	0,224	0,224	0,224	0,224
powierzchnia całkowita rur wymiennika	$f'_{tot}$	$m^2$	9,564	9,991	10,114	9,92	9,225
Średnica wewnętrzna rur	$d_w$	$mm$	25	25	25	25	25
Powierzchnia zabudowy gruntu jednego rzędu wymiennika rzeczywista <sup>7</sup>	$a'_{rzech}$	$m^2$	78,211	32,530	26,673	21,878	15,487

Model każdego gruntowego wymiennika ciepła umieszczono w modelu gruntu tak by znajdował się w osiach symetrii geometrii gruntu. Dla wszystkich wymienników slinky przyjęto zwoje o średnicy 1 m. Poniżej przedstawiono utworzone modele wymienników wraz z gruntem.

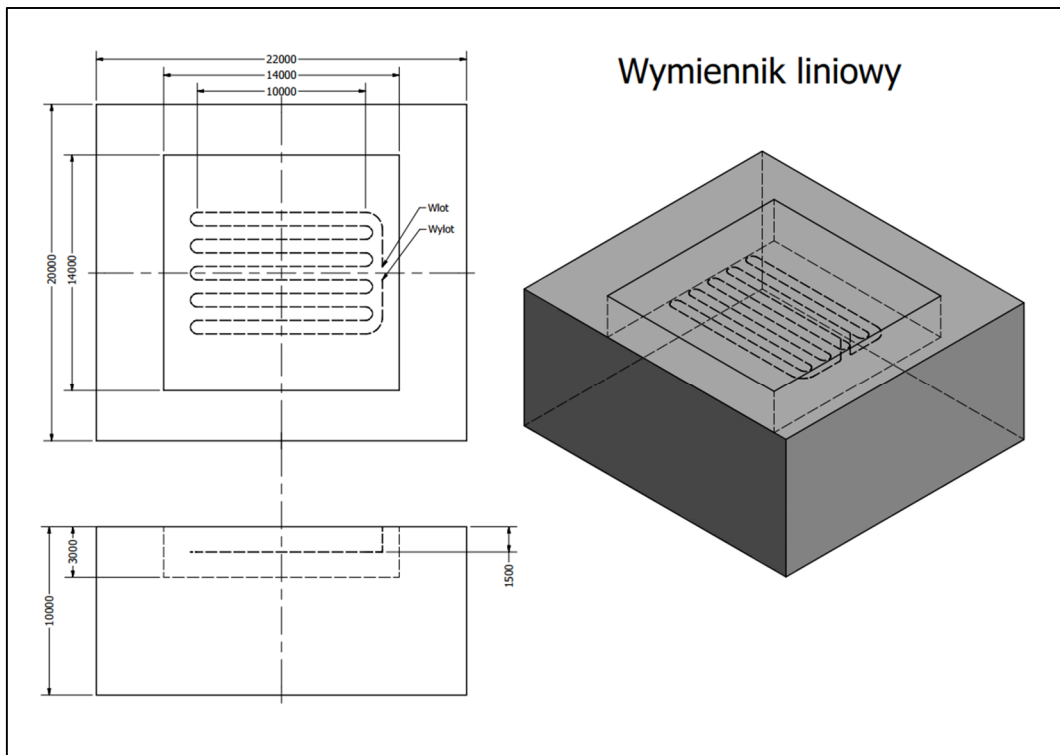
<sup>6</sup> Długość czynna rury to długość rury wymiennika z wyłączeniem adiabatycznych dopływów i odpływów. Na tej długości wymiennik wymienia ciepło z gruntem. Rura powrotna wymiennika slinky biegnąca wzdłuż spiral traktowana jest jako element wymieniający ciepło.

<sup>7</sup> Jest to powierzchnia gruntu mierzona w świetle wymiarów zewnętrznych całego wymiennika z wyłączeniem adiabatycznych odcinków

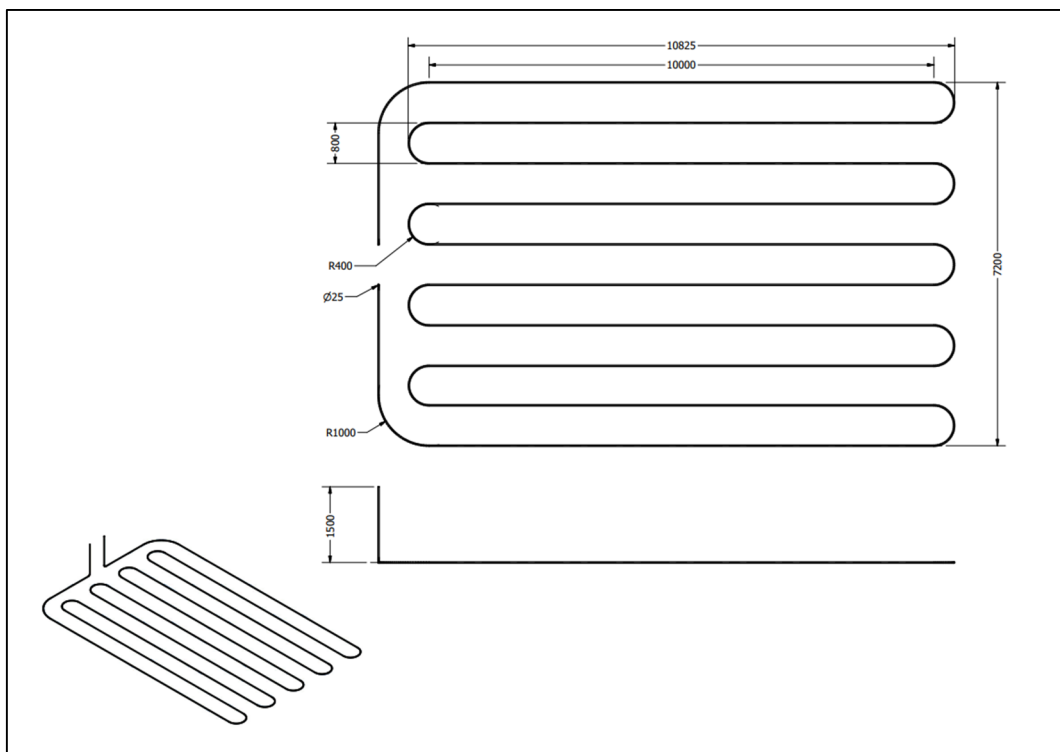


#### 4.4.1. Model wymiennika liniowego

Wymiennik liniowy umieszczono w geometrii gruntu o wymiarach 22 m x 20 m x 10 m. Orientację przestrzenną modelu i jego szczegółowe wymiary przedstawiono na rys. 49 i 50.



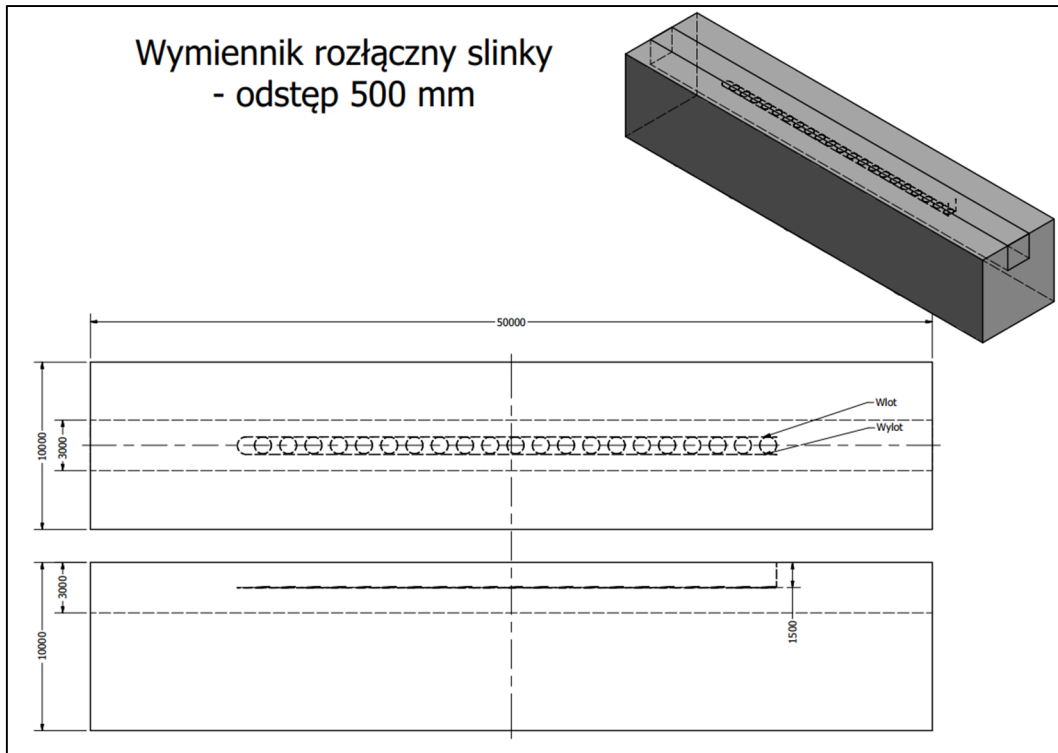
Rys. 49. Model wymiennika liniowego umieszczony w gruncie



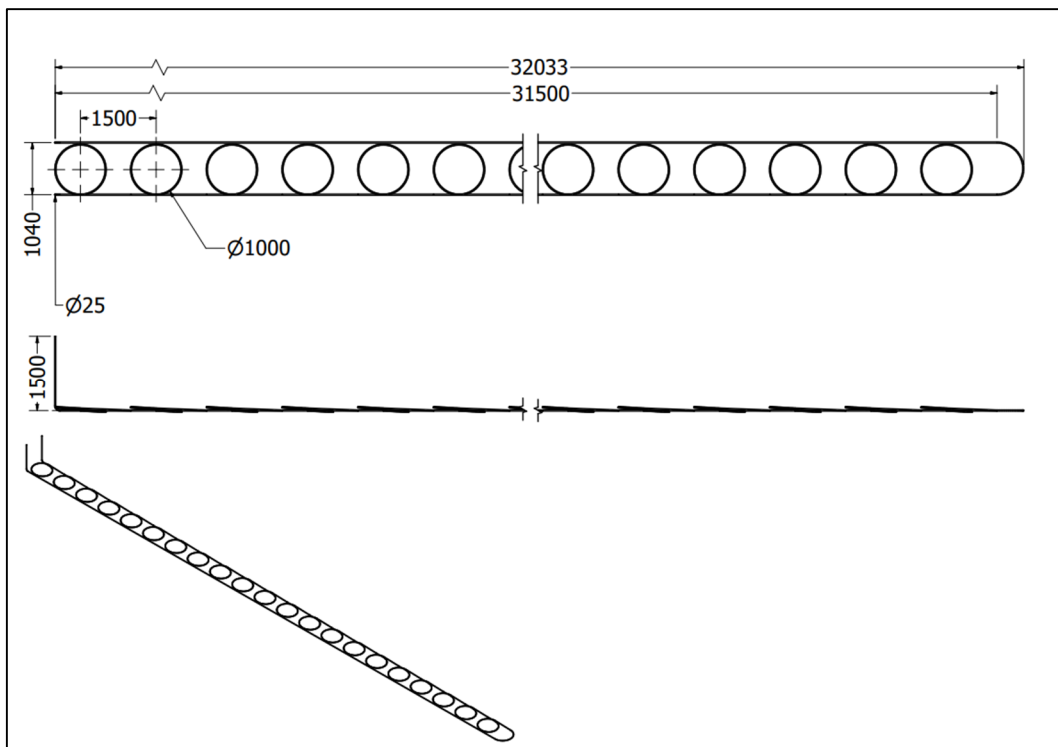
Rys. 50. Model wymiennika liniowego

#### 4.4.2. Model wymiennika slinky w konfiguracji rozłącznej

W konfiguracji rozłącznej, zwoje wymiennika slinky są oddalone od siebie o 500 mm. Wymiennik został umieszczony w geometrii o wymiarach 50 m x 10 m x 10 m. Orientację przestrzenną modelu i jego szczegółowe wymiary przedstawiono na rys 51 i 52.



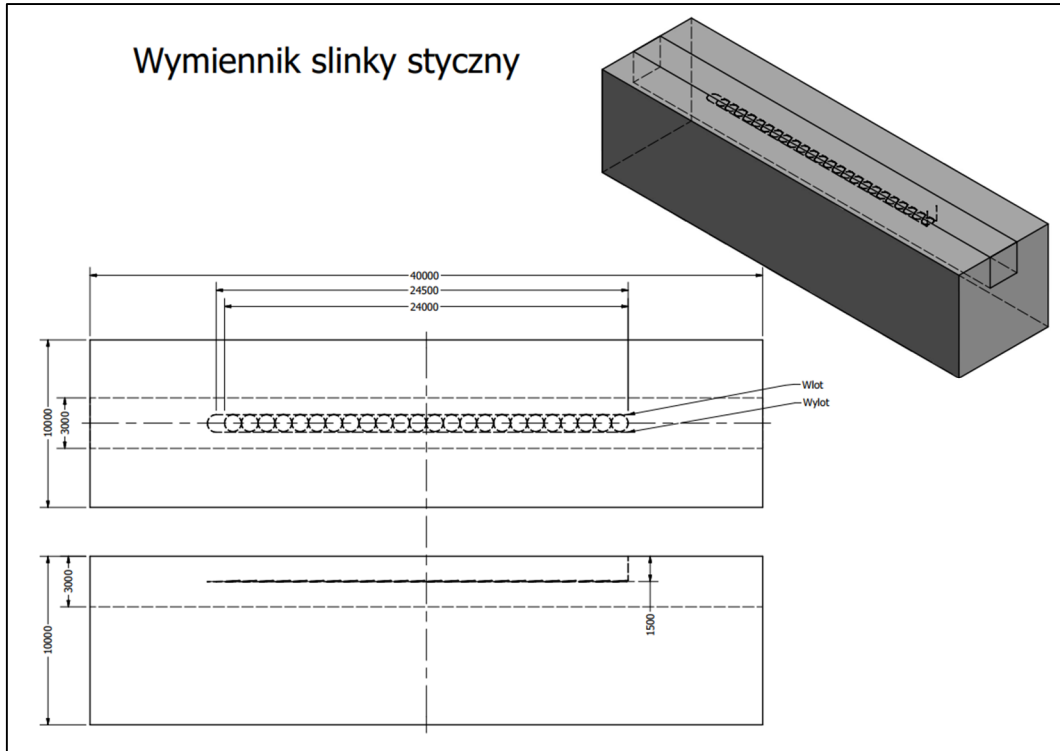
Rys. 51. Model wymiennika slinky o zwojach rozłącznych umieszczony w gruncie



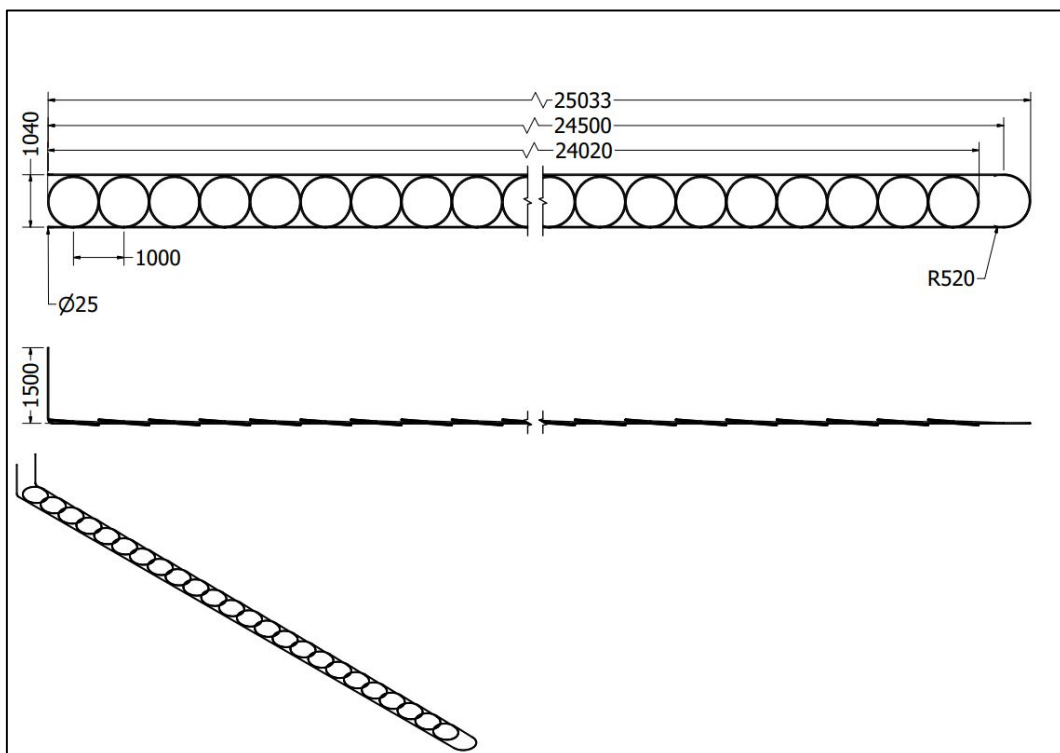
Rys. 52. Model wymiennika slinky rozłącznego

#### 4.4.3. Model wymiennika slinky w konfiguracji stycznej

Wymiennik slinky w konfiguracji stycznej umieszczono w geometrii gruntu o wymiarach 40 m x 10 m x 10 m. Orientację przestrzenną modelu i jego szczegółowe wymiary przedstawiono na rys. 53 i 54.



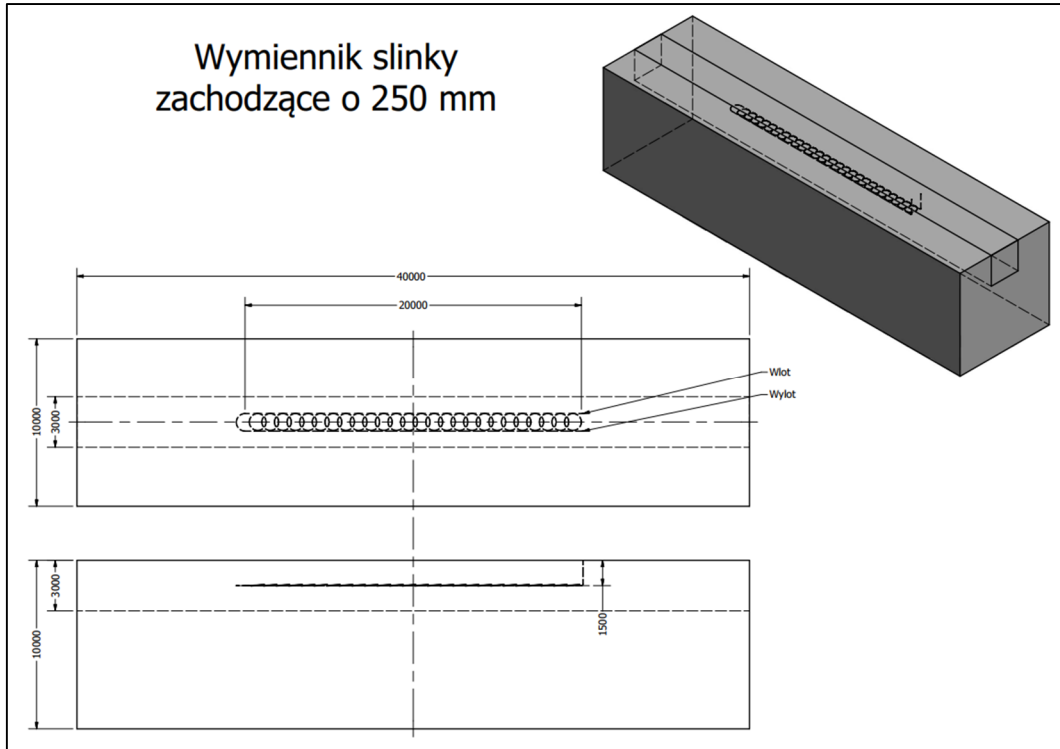
Rys. 53. Model wymiennika slinky o zwojach stycznych umieszczony w gruncie



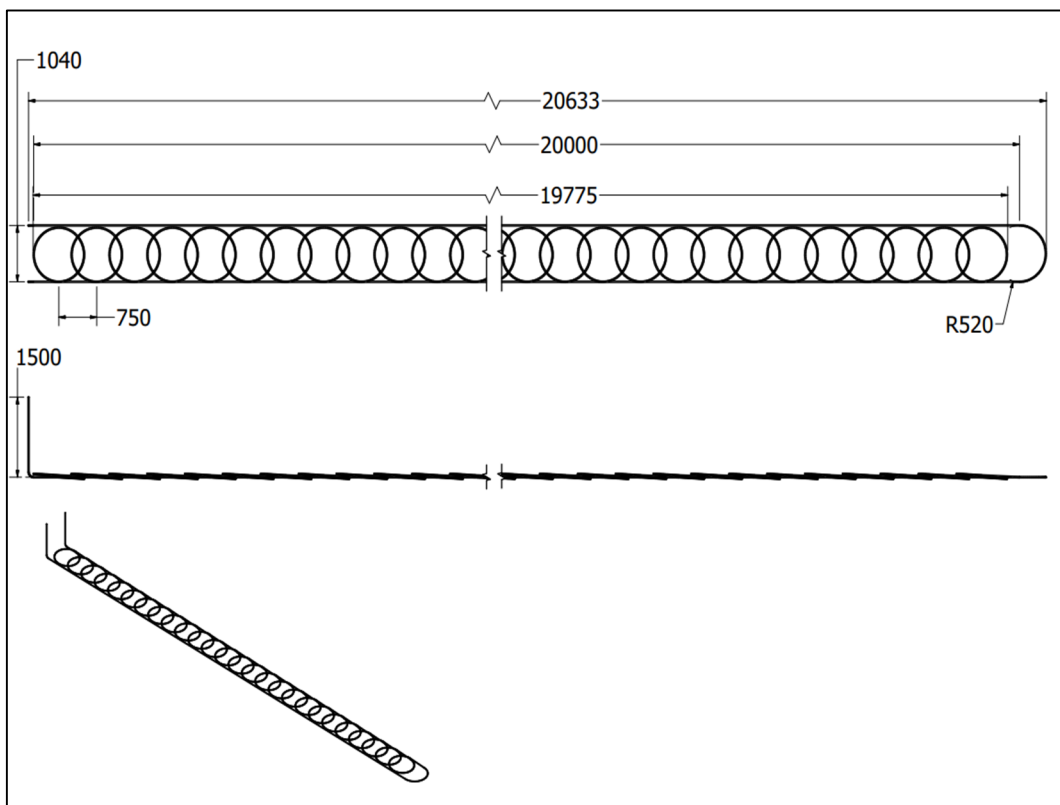
Rys. 54. Model wymiennika slinky o zwojach stycznych

#### 4.4.4. Model wymiennika slinky w konfiguracji zwojów zachodzących o 250 mm.

Wymiennik slinky w konfiguracji zachodzącej na siebie przygotowano dla dwóch wymiarów. W pierwszej konfiguracji zwoje zachodziły na siebie o 250 mm. Wymiennik umieszczono w geometrii gruntu o wymiarach 40 m x 10 m x 10 m (rys. 55 i 56).



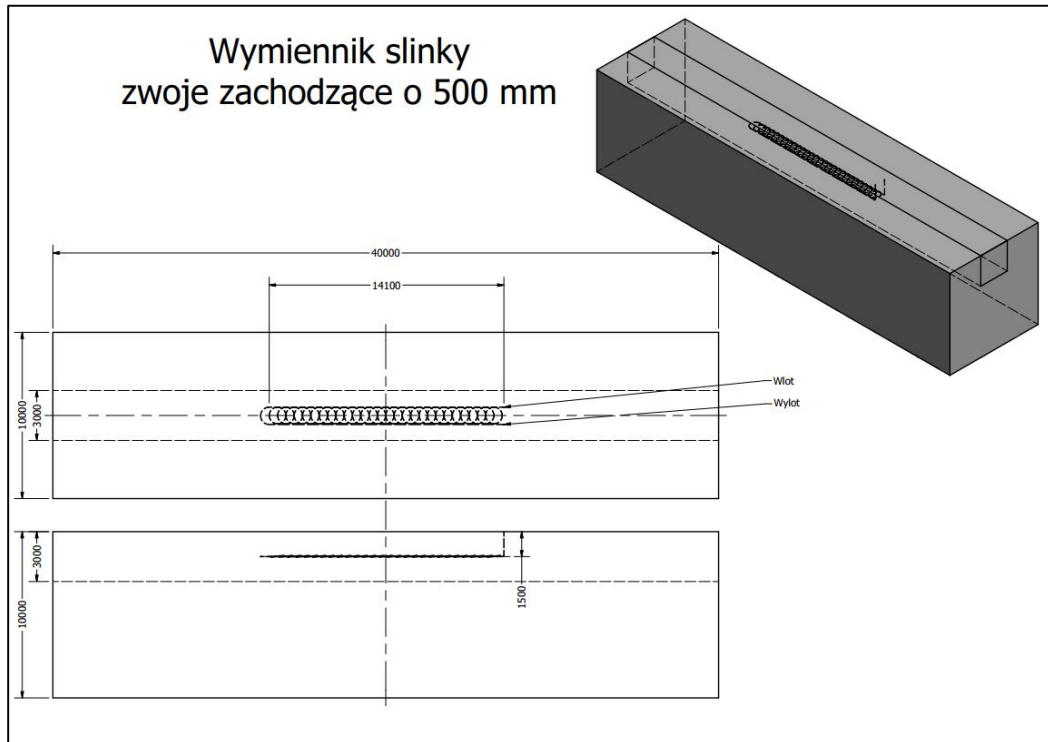
Rys. 55. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 250 mm umieszczony w gruncie



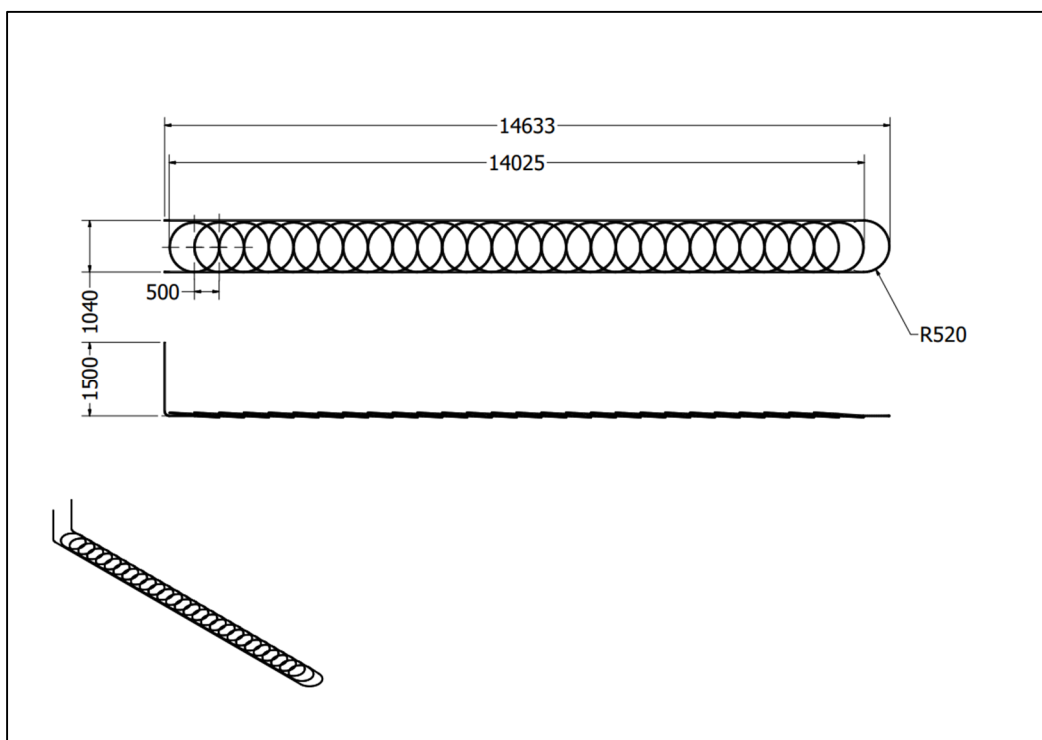
Rys. 56. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 250 mm

#### 4.4.5. Model wymiennika slinky w konfiguracji zwojów zachodzących o 500 mm.

Drugi wymiennik slinky w konfiguracji rozłącznej zaprojektowano tak aby zwoje zachodziły na siebie o 500 mm. Wymiennik umieszczono w geometrii gruntu o wymiarach 40 m x 10 m x 10 m. Orientację przestrzenną modelu i jego szczegółowe wymiary przedstawiono na rys. 57 i 58.



Rys. 57. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 500 mm umieszczony w gruncie



Rys. 58. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 500 mm

#### 4.5. Przygotowanie siatek obliczeniowych

Kolejnym etapem formułowania modeli CFD było przygotowanie siatek obliczeniowych (*meshing*). Siatkę obliczeniową dla geometrii poszczególnych modeli wykonano przy użyciu takich samych opcji. Parametry siatkowania zamieszczono w tabelach 7 i 8:

**Tabela 7. Opcje ogólne nakładania siatki obliczeniowej**

Opcja	Wartość
Relevance	5
Size Function	Proximity and curvature
Relevance center	Fine
Transition	Slow
Proximity size function sources	Faces and Edges
Smoothing	High
Triangle surface mesher	Advancing front

**Tabela 8. Opcje siatki obliczeniowej dla ilości elementów po obwodzie wymiennika – opcja *Edge sizing***

Opcja	Wartość
Numer of divisions	24
Size function	Curvature

Do tworzenia siatek wymienników użyto opcji *Sweep method* ze zdefiniowanym źródłem i celem czyli odpowiednio od wlotu do wylotu rury wymiennika. Warstwę przyścienną zdefiniowano w sposób automatyczny. Dla gruntu przyjęto metodę tworzenia siatki *Patch Conforming Method* z opcją *Tetrahedrons*. Przyjęto współczynnik *Body Sizing* z opcją *element size = 0,3 m*.

W tabelach 9 – 13 przedstawiono własności siatek obliczeniowych modelowanych wymienników gruntowych.

**Tabela 9. Własności siatki obliczeniowej wymiennika liniowego**

Geometria	Grunt duży	Grunt mały	Wymiennik liniowy	Suma
Objętość [m <sup>3</sup> ]	3812	587,94	5,9767e-2	N/D
Wymiary w świetle [m] X	22	14	11,425	N/D
Wymiary w świetle [m] Y	10	3	1,5125	N/D
Wymiary w świetle [m] Z	20	14	7,225	N/D
Węzły	18414	7854071	6624800	1 449 901
Elementy	93300	43 750 999	6252815	50 097 114

**Tabela 10. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky rozłącznego**

Geometria	Grunt duży	Grunt mały	Wymiennik slinky	Suma
Objętość [m <sup>3</sup> ]	4550	449,93	6,5466e-2	N/D
Wymiary w świetle [m] X	50	50	32,045	N/D
Wymiary w świetle [m] Y	10	3	1,5125	N/D
Wymiary w świetle [m] Z	10	3	1,065	N/D
Węzły	182 600	7 417 175	5 273 373	12 868 002
Elementy	168 630	41 274 124	4 924 002	46 366 756

**Tabela 11. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky styczego**

Geometria	Grunt duży	Grunt mały	Wymiennik liniowy	Suma
Objętość [m <sup>3</sup> ]	3640, m <sup>3</sup>	359,94 m <sup>3</sup>	6,3143e-002 m <sup>3</sup>	N/D
Wymiary w świetle [m]	40, m		25,045 m	N/D
	10, m	3, m	1,065 m	N/D
	10, m	3, m	1,5477 m	N/D
Węzły	56 028	4 355 989	5 757 864	10 169 881
Elementy	21 243	22 893 423	5 346 432	28 261 098

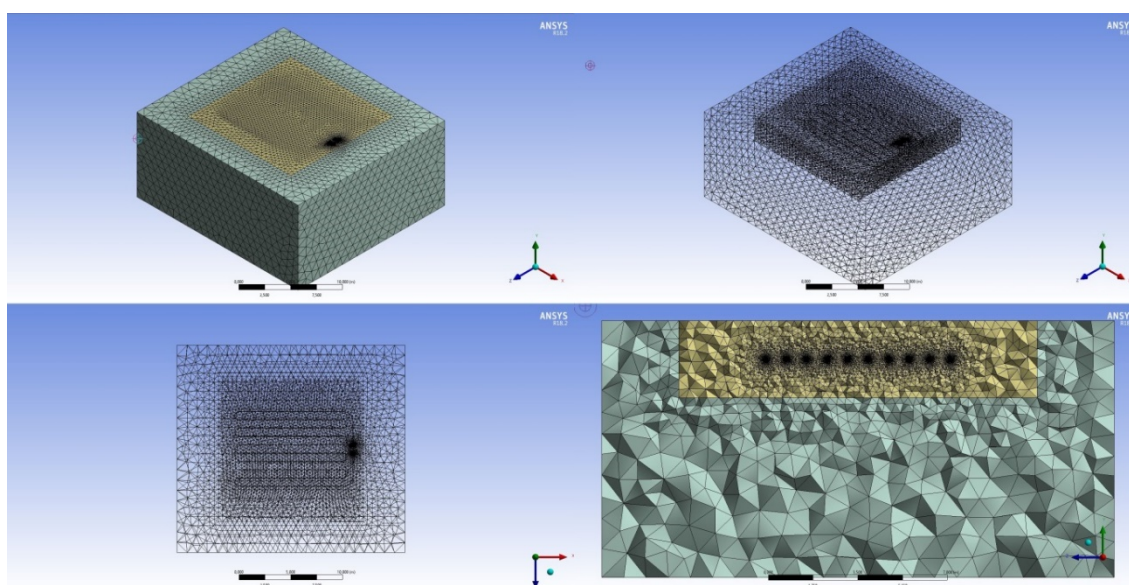
**Tabela 12. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky styczego**

Geometria	Grunt duży	Grunt mały	Wymiennik liniowy	Suma
Objętość [m <sup>3</sup> ]	3640, m <sup>3</sup>	359,94 m <sup>3</sup>	6,197e-002 m <sup>3</sup>	N/D
Wymiary w świetle [m]	40, m		20,645 m	N/D
	10, m	3, m	1,065 m	N/D
	10, m	3, m	1,5393 m	N/D
Węzły	55 062	4 344 842	5 580 090	9 979 994
Elementy	50 344	22 801 835	5 235 488	28 087 667

**Tabela 13. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky styczego**

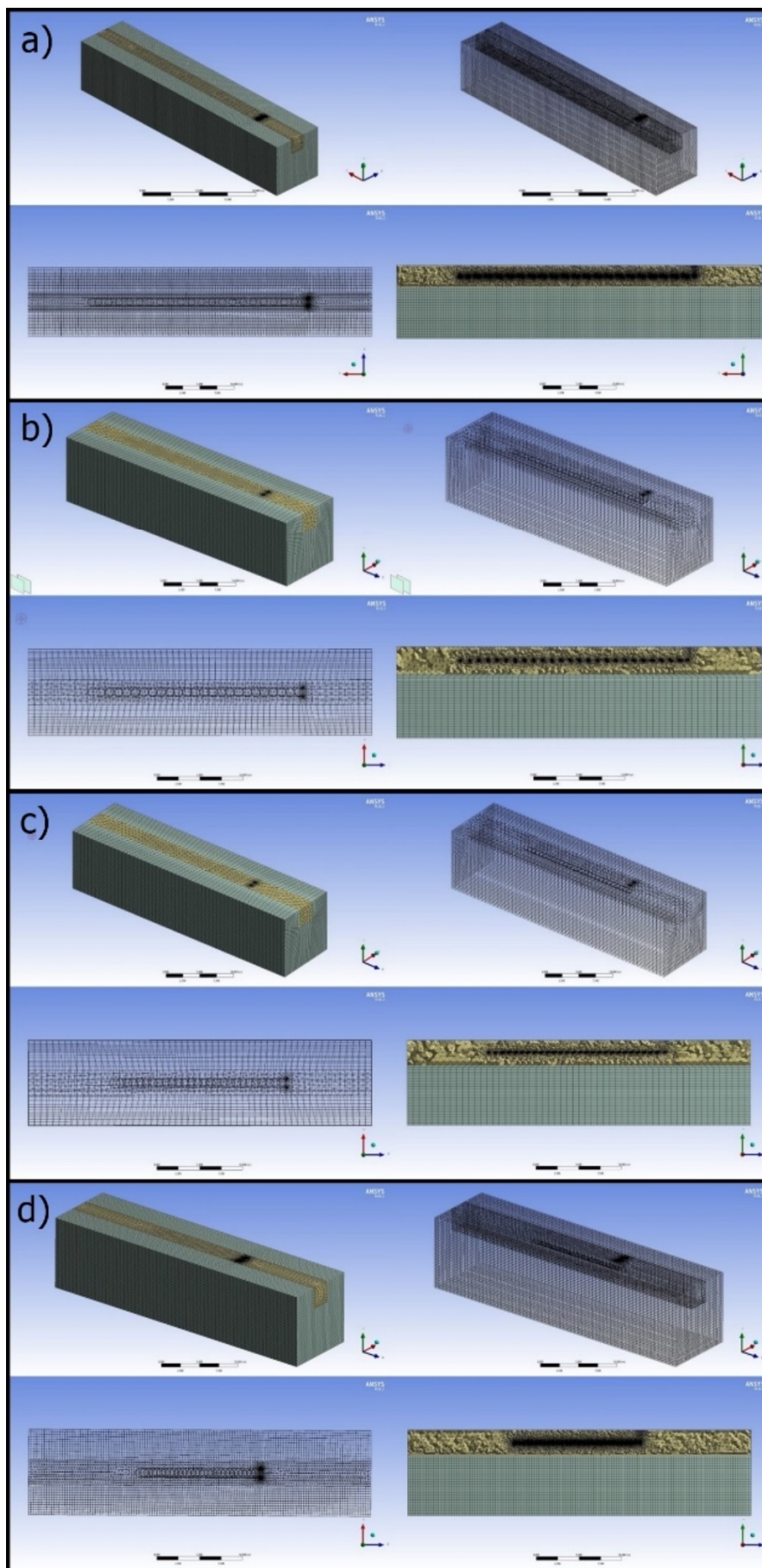
Geometria	Grunt duży	Grunt mały	Wymiennik liniowy	Suma
Objętość [m <sup>3</sup> ]	3640, m <sup>3</sup>	359,94 m <sup>3</sup>	5,7613e-002 m <sup>3</sup>	N/D
Wymiary w świetle [m]	40, m		14,645 m	N/D
	10, m	3, m	1,065 m	N/D
	10, m	3, m	1,5391 m	N/D
Węzły	147 400	6 480 495	5 604 900	12 232 795
Elementy	135 926	35 876 310	5 316 482	41 328 718

Na rys. 59 zamieszczono widok siatki obliczeniowej utworzonej dla modelu liniowego wymiennika płaskiego.



**Rys. 59. Siatka obliczeniowa modelu wymiennika płaskiego**

Natomiast rys. 60 przedstawia widoki siatek modeli slinky w różnych konfiguracjach.



Rys. 60. Siatki obliczeniowe modeli wymienników slinky a) zwoje rozłączne, b) zwoje styczne, c) zwoje zachodzące o 250 mm, zwoje zachodzące o 500 mm



Siatkowane modele składają się z trzech części: wymiennika, gruntu „małego”, który otacza bezpośrednio wymiennik i gruntu „dużego”. Podział geometrii gruntu został zorganizowany w taki sposób, gdyż skomplikowana geometria wymiennika generuje znaczne deformacje siatki modelu. Rozdzielenie geometrii gruntu umożliwiło nadanie fragmentowi wokół wymiennika siatki obliczeniowej o wielomilionowej ilości elementów a co za tym idzie dostatecznej dokładności. Zagęszczenie siatki obliczeniowej jest największe tam, gdzie przewidywane są największe gradienty temperatur. Uzyskano siatki obliczeniowe o zadawalającej jakości i niskiej skośności. Siatki o lepszych parametrach i większej ilości elementów nie były możliwe do wykonania, gdyż moc obliczeniowa komputera na którym wykonywano obliczenia nie pozwalała na obliczanie modeli w czasie krótszym niż 4 doby dla jednego modelu gruntu wokół niego.

#### 4.6. Warunki początkowe i brzegowe zastosowane w symulacji CFD

Na potrzeby prowadzenia obliczeń symulacyjnych warunki zewnętrzne powietrza przyjęto jak dla Krakowa. Symulacje prowadzono przez okres 1800 h ciągłej pracy badanego układu. Założono, że początek symulacji przypada na 274 dzień roku czyli 1 października.

Właściwości cieplne dla gruntu przyjęto takie jakie dla modelu CFD opisującego jedną pętlę wymiennika zastosowanego do badań terenowych:

$$k = 2,1 \frac{W}{m \cdot K}, \rho = 1764 \frac{kg}{m^3}, c_p = 1950 \frac{J}{kg \cdot K}$$

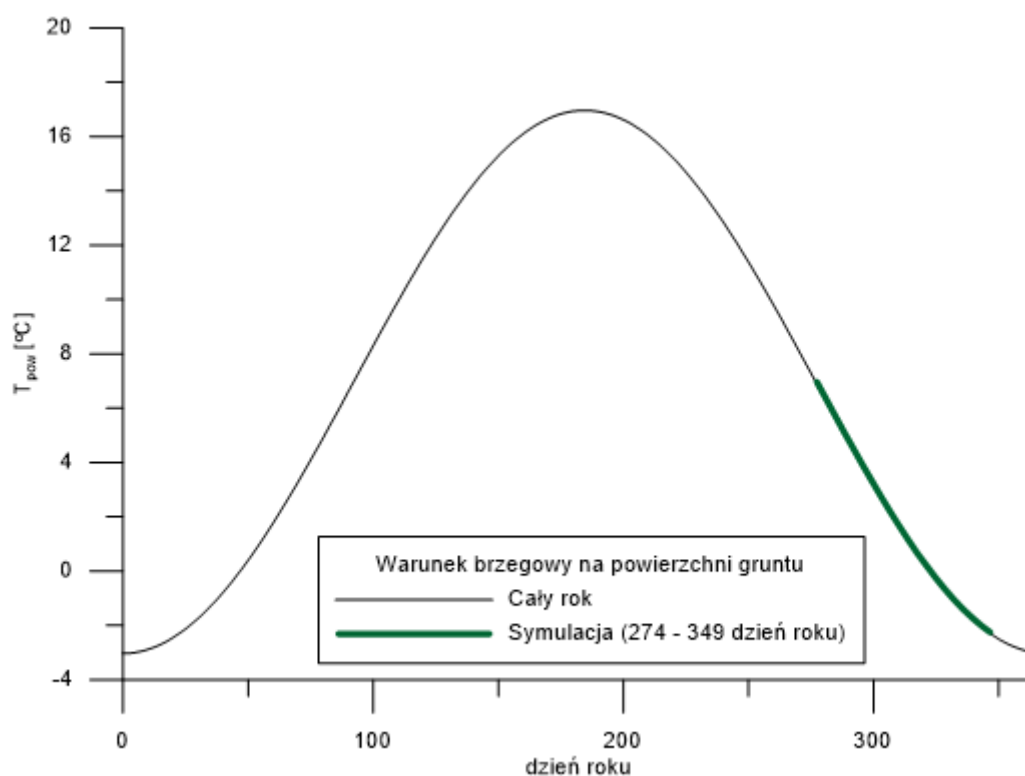
Stąd dyfuzyjność cieplna gruntu wynosiła [23]:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c_p} = 6,105 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad [23]$$

Warunek brzegowy na powierzchni gruntu określono wzorem [24] wyznaczającym temperaturę tej powierzchni w funkcji czasu dla okresu roku (45).

$$T_{pow}(t) = T_{sm} - A_s \cdot \exp\left(\frac{-x}{L}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{x}{L}\right) \quad [24]$$

Wykres funkcji [24] Przedstawiono wykres na rys. 61.



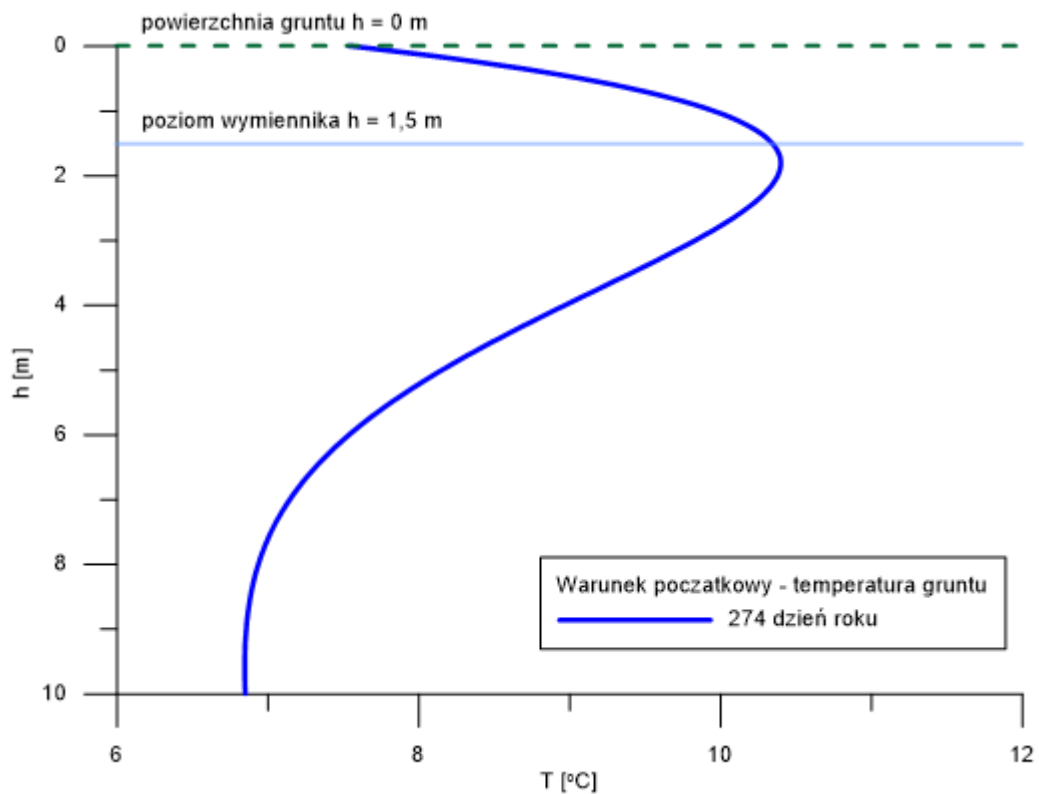
Rys. 61. Warunek brzegowy na powierzchni gruntu

We wzorze [24] poszczególne parametry przyjmują wartości:  $-A_s = 10K$ ,  $T_{sm} = 7^\circ C$ ,

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{\omega}} = 2,476m \quad [25]$$

Początkowy rozkład temperatura gruntu wzdłuż głębokości opisano wzorem [26]. Dla 274 dnia roku czyli 1 października, rozkład ten graficznie przedstawiono na rys. 62.

$$T(x) = T_{sm} - A_s \cdot \exp\left(\frac{-x}{L}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{x}{L}\right) \quad [26]$$



Rys. 62. Warunek początkowy - temperatura gruntu na dzień 1 października

Zewnętrzne ściany obszarów modelowych gruntu, niebędące jego powierzchnią, określono jako przegrody adiabatyczne [27].

$$\frac{dT}{dx} = 0 \quad [27]$$

Temperaturę i przepływ masy ciecży roboczej na wlocie do wymiennika określono jako:

$$t_{wlot} = 0^{\circ}C, \dot{m} = 0,154 \frac{kg}{s}$$

Dla ciecży roboczej, obecnej w wymienniku na początku procesu, przyjęto temperaturę równą wartości temperatury gruntu na dzień rozpoczęcia symulacji tj. 1 października, wyznaczoną dla głębokości posadowienia wymiennika tj. dla 1,5 m.

$$T(x = 1,5m) = T_{sm} - A_s \cdot \exp\left(\frac{-x}{L}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{x}{L}\right) = 10,1^{\circ}C \quad [28]$$

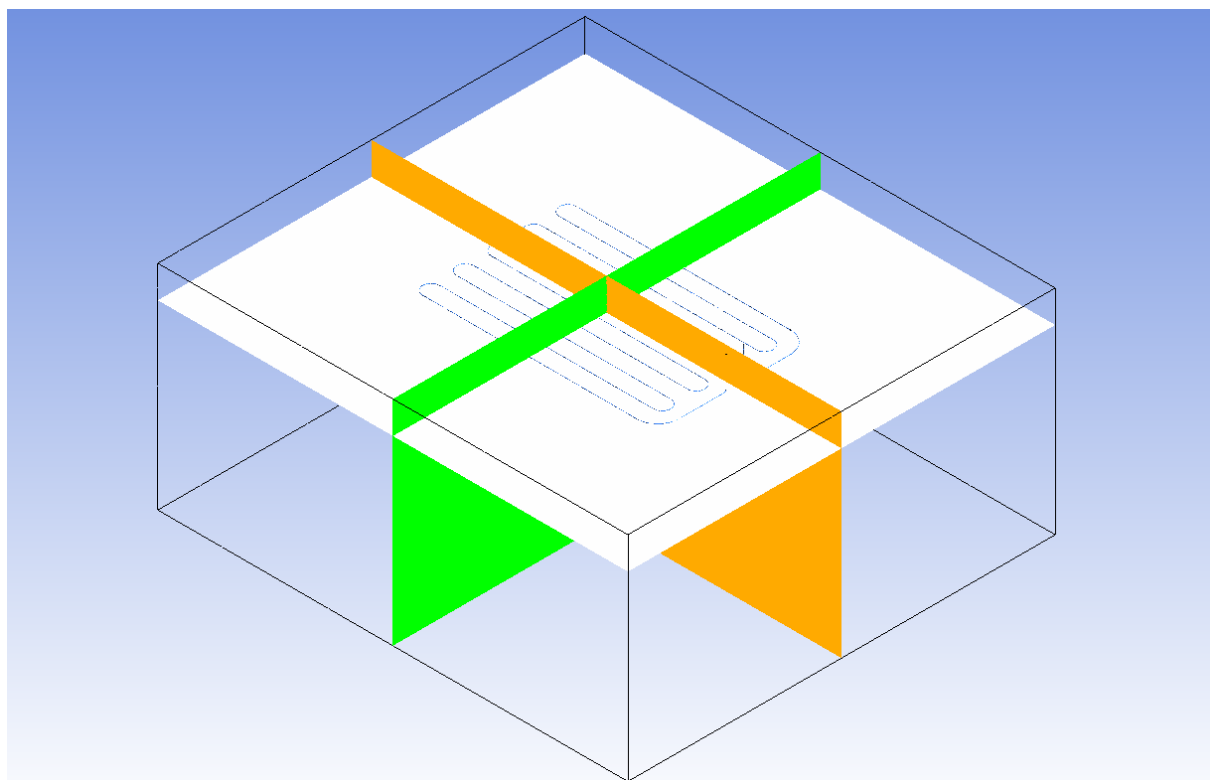
Pomiędzy wymiennikiem a gruntem przyjęto warunek wymiany ciepła poprzez ściankę wykonaną z PE o grubości 3 mm. Wykorzystano opcję *thin material*. Warunek ten dotyczy czynnej części wymiennika tj. z pominięciem odcinków rur pionowych i fragmentów doprowadzających. Te odcinki rur zdefiniowano jako ścianki adiabatyczne.

## 4.7. Wyniki symulacji CFD wymiennika liniowego oraz wymienników slinky w różnych konfiguracjach

W kolejnym etapie badań wykonano symulacje pracy wyszczególnionych wyżej wymienników ciepła. Uzyskane rozwiązania zobrazowano w postaci map temperatur i wykresów, które poddano analizie. Następnie dokonano porównania uzyskanych wyników. Porównanie to obejmowało analizę efektów cieplnych zaobserwowanych w gruncie wywołanych różnymi konfiguracjami przestrzennymi wymienników o zbliżonych powierzchniach wymiany ciepła. Kryteria porównawcze jakie brano pod uwagę to wydajność cieplna wymienników, różnice temperatur w gruncie oraz powierzchnia zabudowy wymienników, gęstość zabudowy i inne. W pierwszej części rozdziału 4.7. wykonano analizę jakościową a w drugiej analizę ilościową uzyskanych wyników.

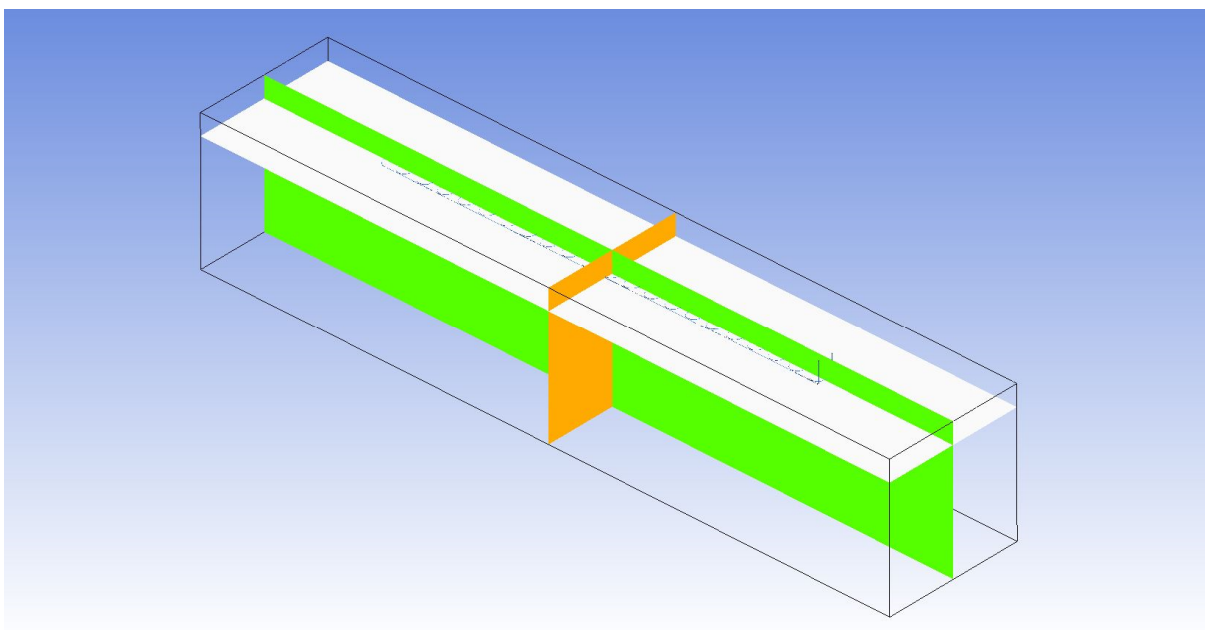
### 4.7.1. Mapy rozkładu temperatur w gruncie

Pierwszym etapem analizy było wykonanie i porównanie rozkładów temperatur w gruncie podczas działania wymienników. Zamieszczone mapy temperatur wykonano dla wybranych czasów eksploatacji wymienników, odpowiednio dla 450, 900, 1350 i 1800 godzin trwania procesu. Mapy temperatur wykonano w trzech płaszczyznach przecinających geometrie badanych modeli (rys. 63 - 67).



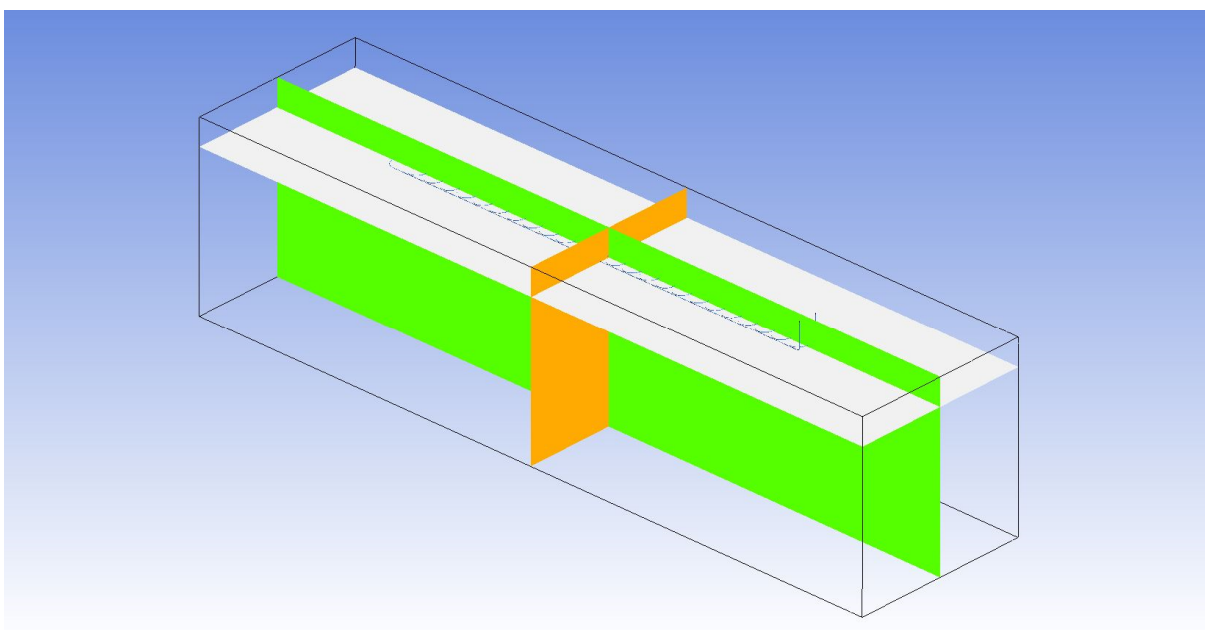
Rys. 63. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur - wymiennik liniowy

Płaszczyzna pomarańczowa posadowiona jest w poprzecznej osi symetrii wymiennika, zielona w osi wzdłużnej symetrii wymiennika, oraz biała która przecina grunt w płaszczyźnie poziomej na głębokości na której umieszczono wymiennik tj. 1,5 m poniżej powierzchni.



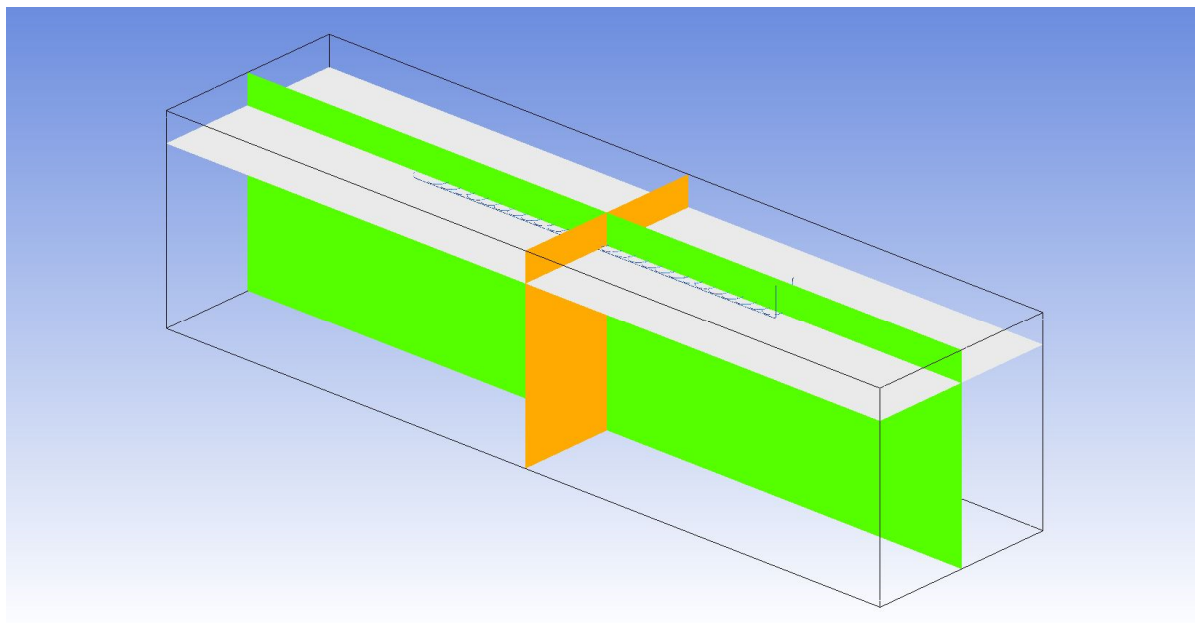
Rys. 64. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur – wymiennik slinky rozłączny

Na płaszczyźnie pomarańczowej w przypadku wymiennika liniowego możliwa będzie obserwacja wpływu, jaki na rozkład temperatury w gruncie ma kierunek przepływającej cieczy a dla wymienników slinky uwidocznione będą poprzeczne profile temperatur.



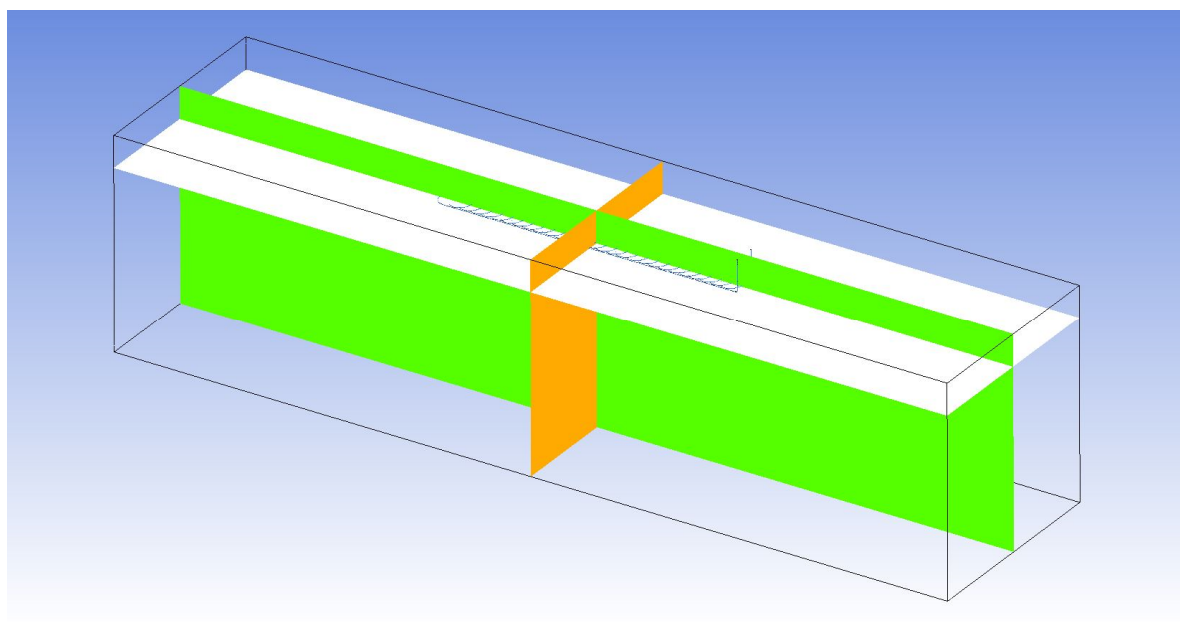
Rys. 65. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur – wymiennik slinky styczny

Na płaszczyźnie zielonej będzie możliwa obserwacja zmian rozkładu temperatury w gruncie wzdłuż osi symetrii wymienników. Porównywać będzie można także wpływ pracy wymienników na rozkład temperatur w głąb gruntu oraz w przestrzeni między wymiennikiem a powierzchnią gruntu.



Rys. 66. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur - wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm

Na płaszczyźnie białej możliwe będzie porównanie rozkładów temperatur zarówno wzdłuż jak i w poprzek wymiennika na głębokości jego posadowienia w gruncie oraz wychłodzenie gruntu pomiędzy rurkami wymiennika liniowego, czy pętlami wymienników slinky.

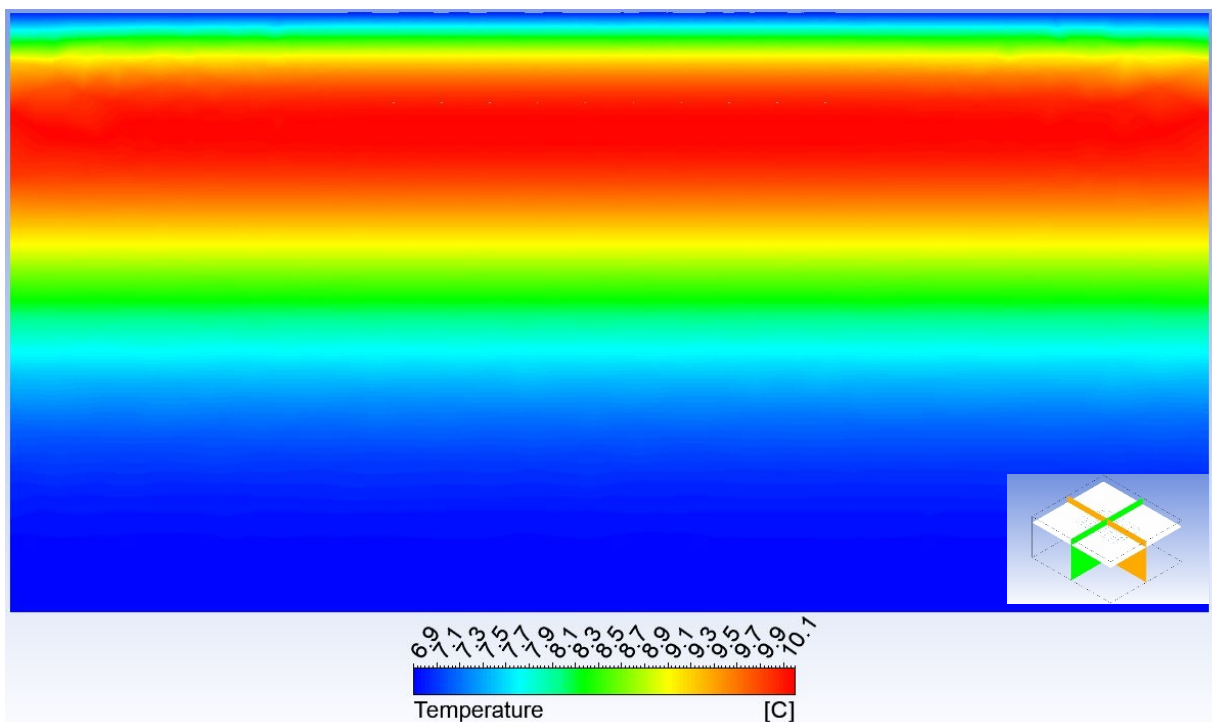


Rys. 67. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur - wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm

Ponieważ charakter zmian temperatur w gruncie dla wymienników slinky niezależnie od badanej konfiguracji są jakościowo bardzo podobne, omówiono wyniki obliczeń uzyskane dla wymiennika liniowego i wymiennika slinky o zwojach rozłącznych. Zmiany temperatury gruntu obserwowane dla pozostałych konfiguracji wymienników slinky różnią się wartościami a rozkłady przestrzenne są podobne. Zamieszczono więc jedynie ich mapy bez opisu. Całość wyników obliczeń podsumowano zbiorczo w zakończeniu rozdziału 4.7.1.

#### *Warunek początkowy – temperatura w gruncie*

Dla wszystkich omawianych przypadków wykonanych symulacji, przyjęto jako warunek początkowy rozkład temperatury w gruncie opisany wzorem [26] (rys. 68). Początkowa temperatura w gruncie zawierała się w przedziale od 6,9 °C do 10,1 °C.



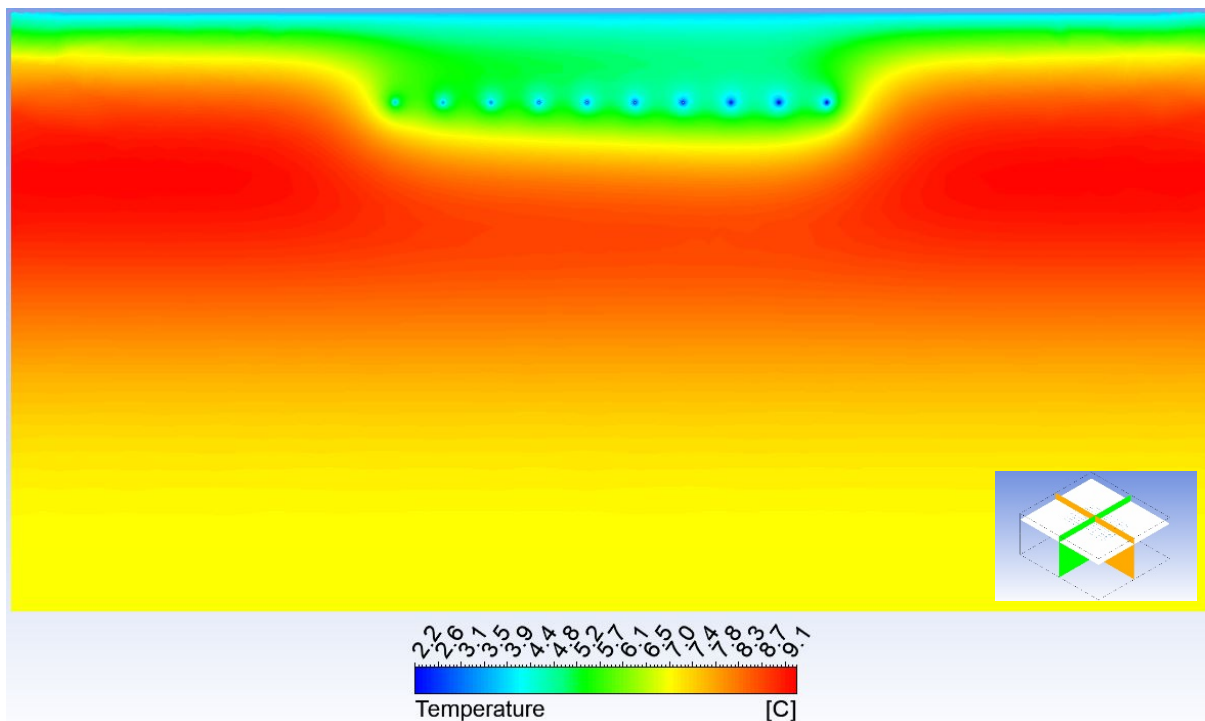
**Rys. 68. Początkowy rozkład temperatur w gruncie - na przykładzie modelu wymiennika liniowego - płaszczyzna zielona**

Dla omawianego przypadku, w okresie jesiennym, najwyższe temperatury w gruncie znajdują się na głębokości 0,5 do 5 m. Grunt jest tam zregenerowany cieplnie po okresie letnim, jednakże przy powierzchni widoczny jest już wpływ niższych jesiennych temperatur powietrza. Maksimum temperatury w gruncie znajduje się na głębokości  $h \approx 2m$ , czyli poniżej głębokości posadowienia wymiennika tj.  $h = 1,5m$ .



### Mapy temperatur wymiennika liniowego

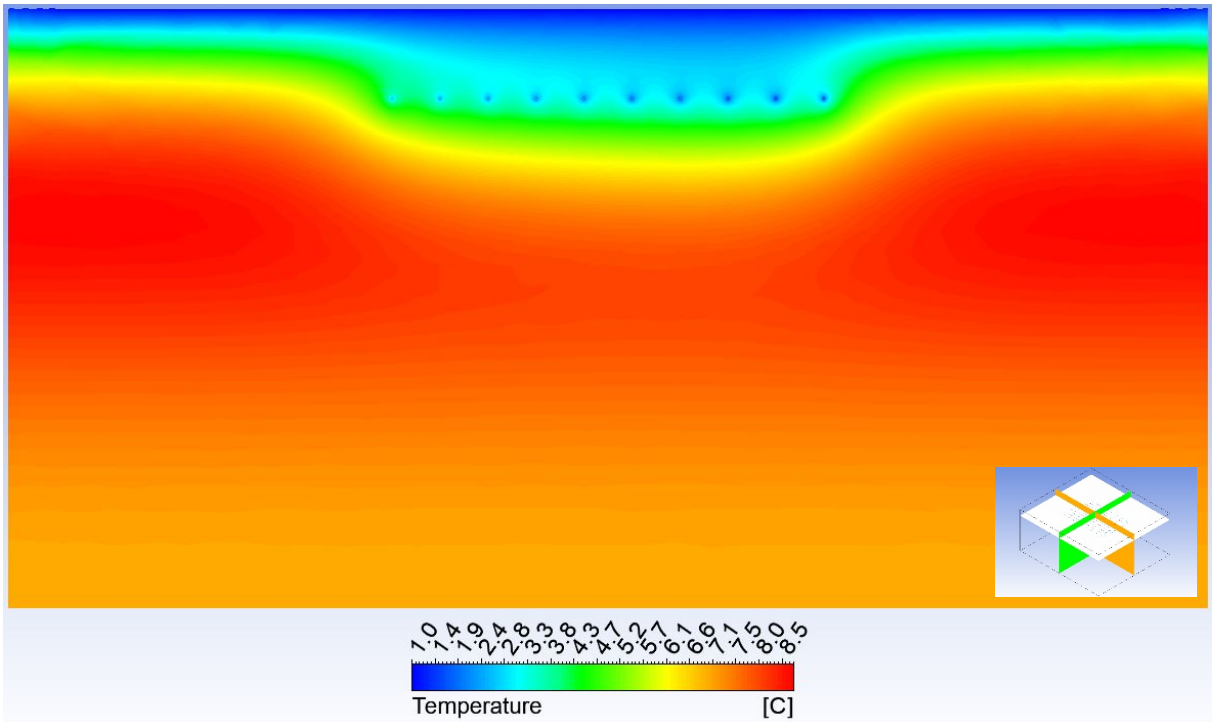
Poniżej przedstawiono rozkłady temperatur w gruncie wokół wymiennika liniowego na płaszczyźnie zielonej dla wybranych czasów trwania procesu (rys. 69 - 72). Płaszczyzna ta znajduje się w poprzecznej osi symetrii wymiennika<sup>8</sup>.



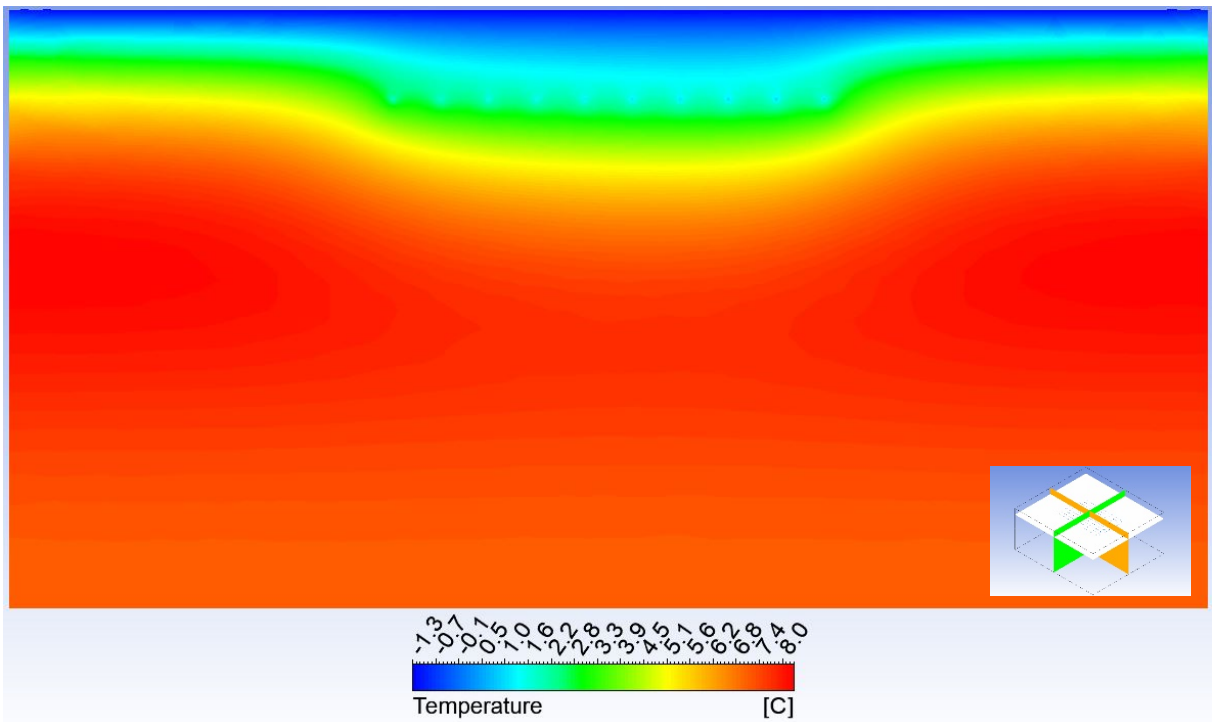
Rys. 69. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna zielona – 450 h

Dla 450 h procesu, temperatury w gruncie zawierają się w przedziale od 2,2 °C – 9,1 °C. Można zaobserwować wpływ przepływającej cieczy na odbiór ciepła z gruntu. Z prawej strony wymiennika, czyli od strony dopływu cieczy roboczej, następuje intensywniejsza eksploatacja cieplna gruntu. Płynąca w rurkach wymiennika ciecz stopniowo ogrzewa się od temperatury na wlocie równej 0 °C i w konsekwencji coraz słabiej odbiera ciepło z gruntu. Spowodowane jest to spadkiem różnicy temperatur między medium i temperaturą gruntu w otoczeniu wymiennika. Można stwierdzić, że w początkowym okresie eksploatacji wymiennik od strony wlotu cieczy cyrkulującej ma większy wpływ na rozkład temperatury w gruncie niż od strony wylotu.

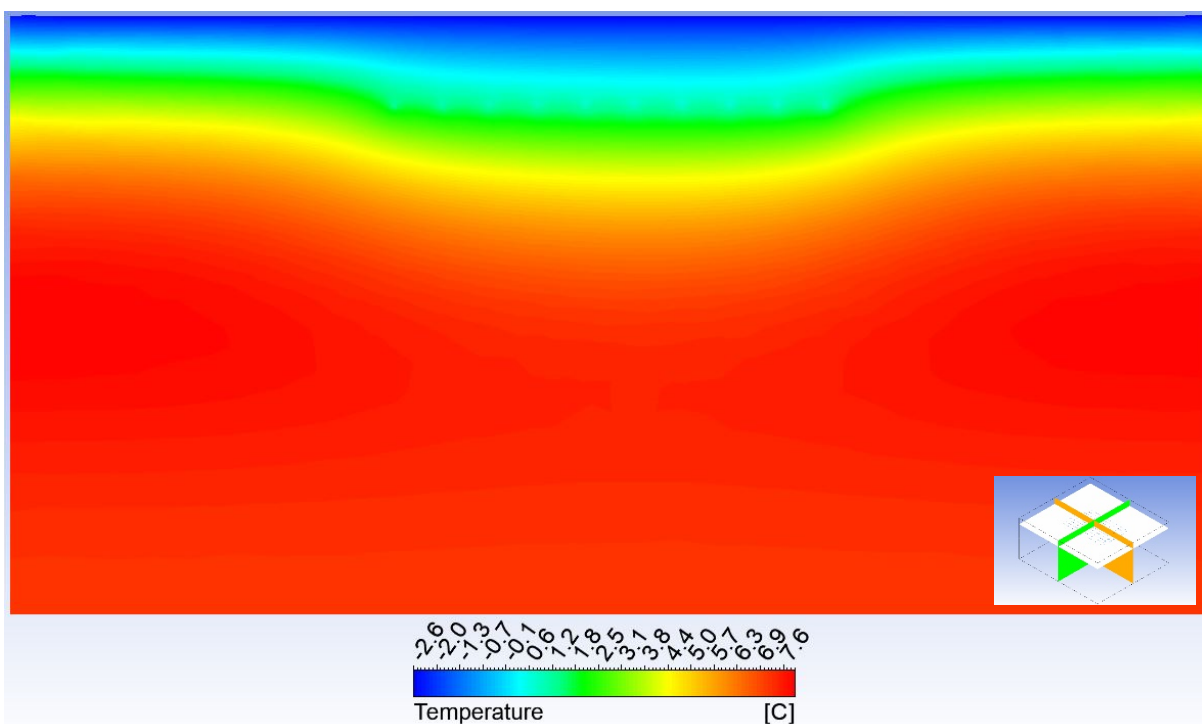
<sup>8</sup> Zapoznając się z dalszymi częściami opracowania czytelnik zauważy pozorną niekonsekwencję w oznaczeniu kolorów płaszczyzn i opisach wymiennika płaskiego względem wymienników slinky. Otóż płaszczyzna zielona, przecinająca każdy z wymienników slinky wzdłuż jego wymiaru podłużnego, umożliwia zobrazowanie zmiany temperatur w otaczającym gruncie wywołane przepływem cieczy, przez wymiennik, który to przepływ w skali całego wymiennika zachodzi niejako wzdłuż jego geometrii. W miarę jak ciecz cyrkulująca w wymienniku zwiększa swoją temperaturę coraz słabiej wychładza grunt. W przypadku wymiennika liniowego, szukając analogii geometrycznych do wymiennika slinky jako całego układu, uznano, że rozstaw rur wymiennika determinuje długość całego układu a długości linii determinują szerokość całej instalacji. W tym sensie długość instalacji wymiennika liniowego jest mniejsza niż jej szerokość. Przyjęte zmiany dotyczą tylko map temperatur i wykresów dot. temperatur w gruncie. Dane w tabelach i innych rozdziałach zostały niezmienione.



Rys. 70. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna zielona - 900 h



Rys. 71. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna zielona - 1350 h



**Rys. 72. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna zielona - 1800 h**

W czasie 900 h temperatury gruntu zawierają się między 1 °C do 8,5 °C. Zamieszczona mapa (rys. 70) ukazuje postępujący wpływ kolejnych rurek wymiennika na zmiany temperatur gruntu. Uwagę zwracają zmiany temperatur w gruncie, znajdującym się pomiędzy poziomem wymiennika a powierzchnią. Temperatura gruntu wokoło wymiennika obniża się. Zaznacza się dysproporcja pomiędzy temperaturą gruntu nad i poniżej poziomu instalacji wymiennika. Wyraźna jest różnica pomiędzy obszarem gruntu w pobliżu pierwszego biegu znajdującą najbliżej wlotu (pierwsza od prawej) która nie wychładza gruntu nad sobą tak jak kolejne rury. Skrajne rurki sąsiadują tylko z jedną rurką i wokół nich grunt „łatwiej” się regeneruje, gdyż ciepło jest dostępne zarówno z góry, z dołu, jak i z boku wymiennika. Rury wewnątrz wymiennika mają dostęp do ciepła tylko z góry i z dołu. Dodatkowo warunek brzegowy na powierzchni gruntu działa niekorzystnie wychładzając go ponad wymiennikiem. W miarę postępowania procesu tendencje do wyrównywania się temperatur w poprzek wymiennika są coraz mocniej widoczne, co można interpretować faktem, że główny opór przenoszenia ciepła jest w gruncie. Widoczny jest wpływ warunku brzegowego oraz eksploatacji gruntu na temperaturę w obszarze ponad wymiennikiem. Porównując rozkłady temperatur gruntu w czasie 450 i 900 godzin trwania procesu obserwuje się że dla czasu 450 godzin temperatura wokół wymiennika zarówno z góry jak i z dołu jest wyrównana, choć nad wymiennikiem od strony rury wlotowej zaznaczać zaczyna się wpływ zimnej wody wpływającej do wymiennika. W czasie 900 godzin widać wyraźnie zróżnicowanie pomiędzy temperaturami nad i pod wymiennikiem, które

w odległości 0,5 m od osi wymiennika wynosi około 2 stopnie. Grunt wokół wymiennika regeneruje się głównie od dołu, stąd jego warstwa ponad poziomem instalacji wymiennika jest coraz bardziej wychłodzona.

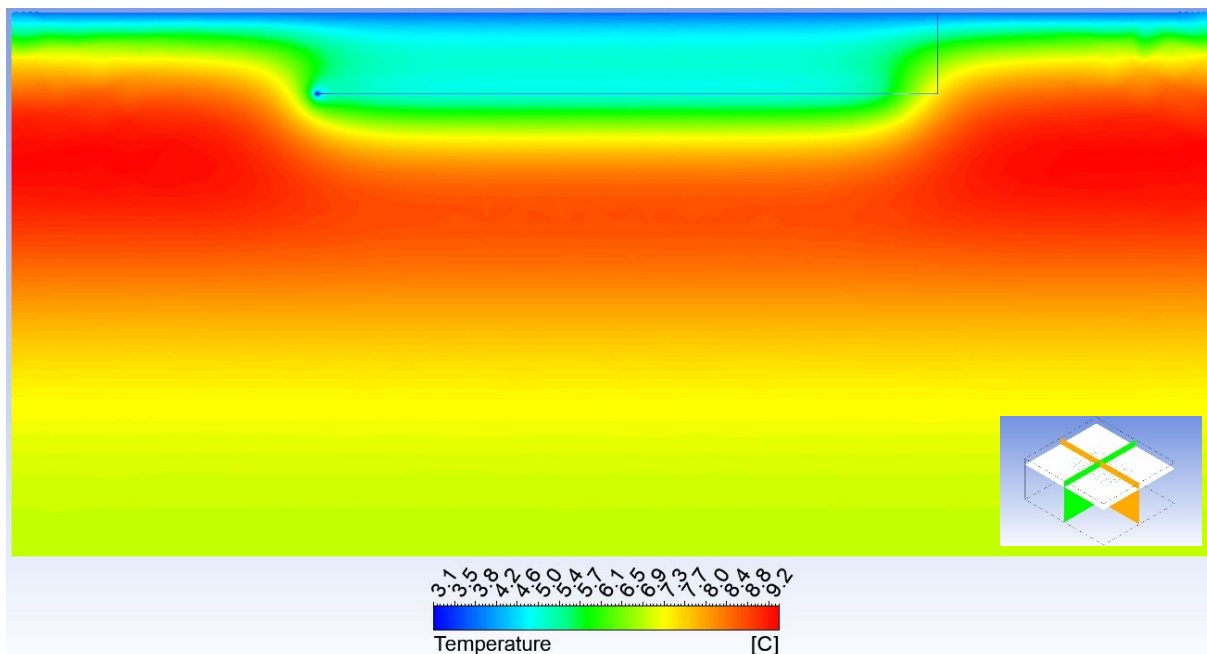
W 1350 h procesu zakres obserwowanych temperatur wynosi  $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Maksymalna temperatura w gruncie maleje. W miarę trwania procesu coraz silniej zaznacza się wpływ warunku brzegowego na grunt pod powierzchnią. Grunt nie tylko jest wychładzany jest przez wymiennik ale także ciepło jest odbierane przez, obniżającą swoją temperaturę, powierzchnię gruntu. Jest to swoista konkurencja powierzchni gruntu i wymiennika o ciepło w zakresie głębokości 0 – 1,5 m. Podczas całego okresu symulacji temperatura powierzchni jest niższa niż temperatura w głębi gruntu. W przypadku gdy temperatura powierzchni gruntu spadnie poniżej temperatury rury wymiennika może nastąpić taka sytuacja że wymiennik będzie odbierał ciepło od gruntu tylko od spodu sam natomiast będzie je oddawał do gruntu wychładzanego wcześniej przez tenże wymiennik oraz powierzchnię gruntu. Asymetryczny rozkład temperatur nad i pod wymiennikiem pogłębiający się z czasem (rys. 71 – 72) powoduje że im dłużej jest prowadzony proces eksploatacji ciepłego gruntu tym bardziej następuje dysproporcja między ilością ciepła dostarczaną do wymiennika od góry a od dołu.

Jak opisano wyżej na początku procesu grunt jest intensywnie eksploatowany cieplnie od strony wlotu cieczy do wymiennika. Widać to szczególnie dobrze dla 450 i 900 godziny procesu. Jak można zaobserwować w kolejnych rejestrowanych czasach procesu tj. w 1350 i 1800 godzinie jego trwania różnice te zacierają się i grunt jest eksploatowany cieplnie z jednorodnym obciążeniem w analizowanej płaszczyźnie. Jest to spowodowane faktem, iż wymiennik tak schłodził grunt po stronie prawej płaszczyzny zielonej tj. od strony wlotu, że ciecz ogrzewa się słabiej i różnica temperatur między wymiennikiem a gruntem zmniejsza się szybciej przy jego początku niż przy końcu. Można stwierdzić także, iż dla początkowych czasów trwania symulacji istnieją znaczne różnice w ilości ciepła pobieranego z gruntu wzdłuż długości rurek wymiennika. Objawia się to w różnicach w rozchodzeniu się frontów temperatur wokół rurek. Rurki z prawej strony osi symetrii, tj. bliżej wlotu cieczy do wymiennika, odbierają ciepło mocniej niż rurki z lewej strony (bliżej wylotu). Dzieje się tak dlatego, gdyż ciecz cyrkulująca w wymienniku ogrzewa się a różnica temperatur między cieczą w wymienniku i gruntem maleje wzdłuż ułożenia rur. Można stwierdzić, że w miarę trwania procesu różnice te maleją. Zatem głównym czynnikiem limitującym wymianę ciepła między gruntem a wymiennikiem jest opór cieplny w warstwie gruntu.

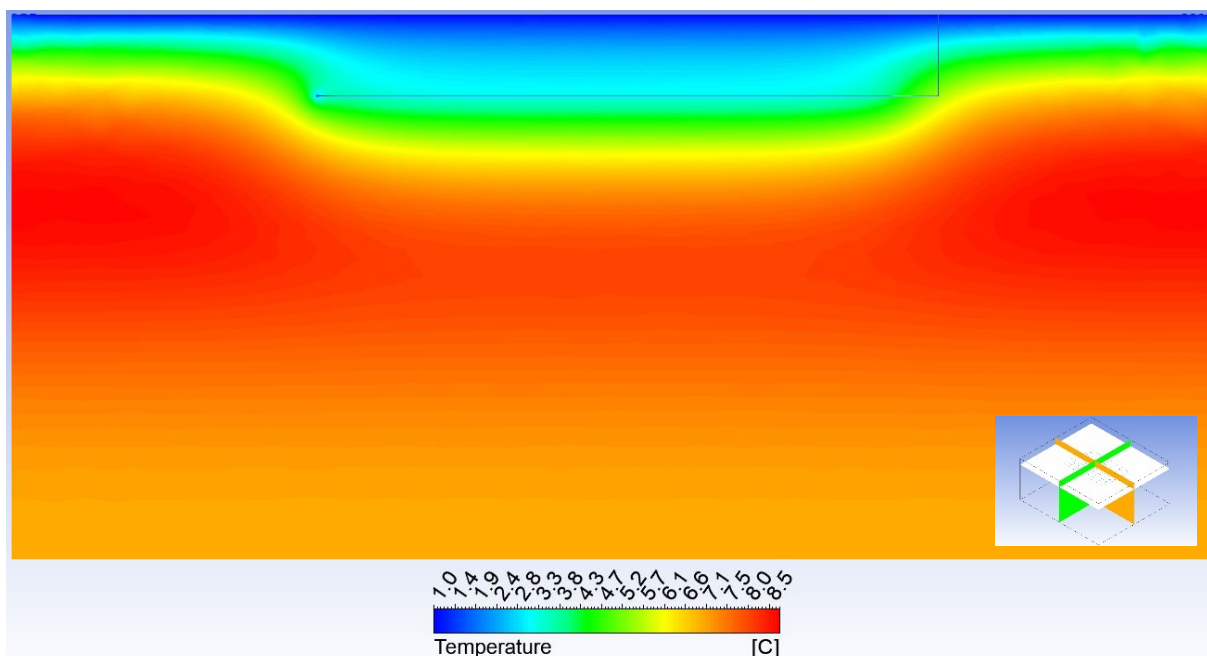
Jak wspomniano w miarę postępu procesu grunt jest eksploatowany cieplnie i jego temperatura w otoczeniu wymiennika spada. Wpływ na to ma także przyjęty warunek brzegowy

który dla analizowanego przedziału czasowego powoduje, że temperatura powierzchni gruntu spada.

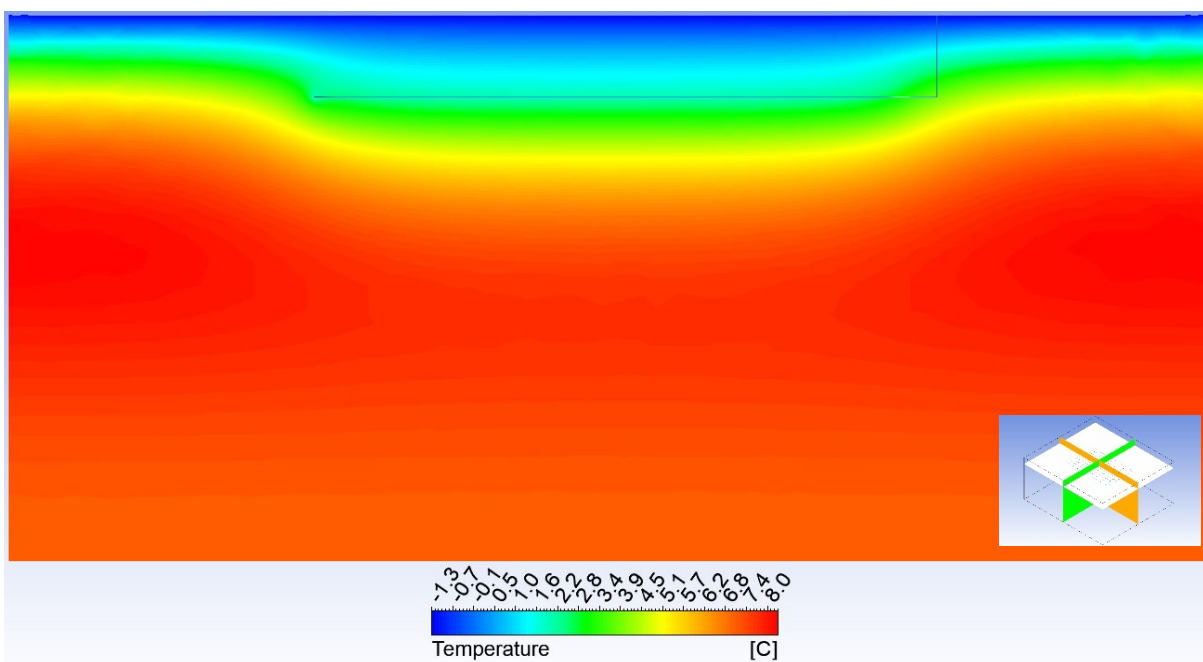
Na kolejnych mapach zamieszczono rozkłady temperatur w gruncie dla analizowanego wymiennika liniowego na płaszczyźnie pomarańczowej w takich samych, jak powyżej czasach procesu (rys. 73 – 76).



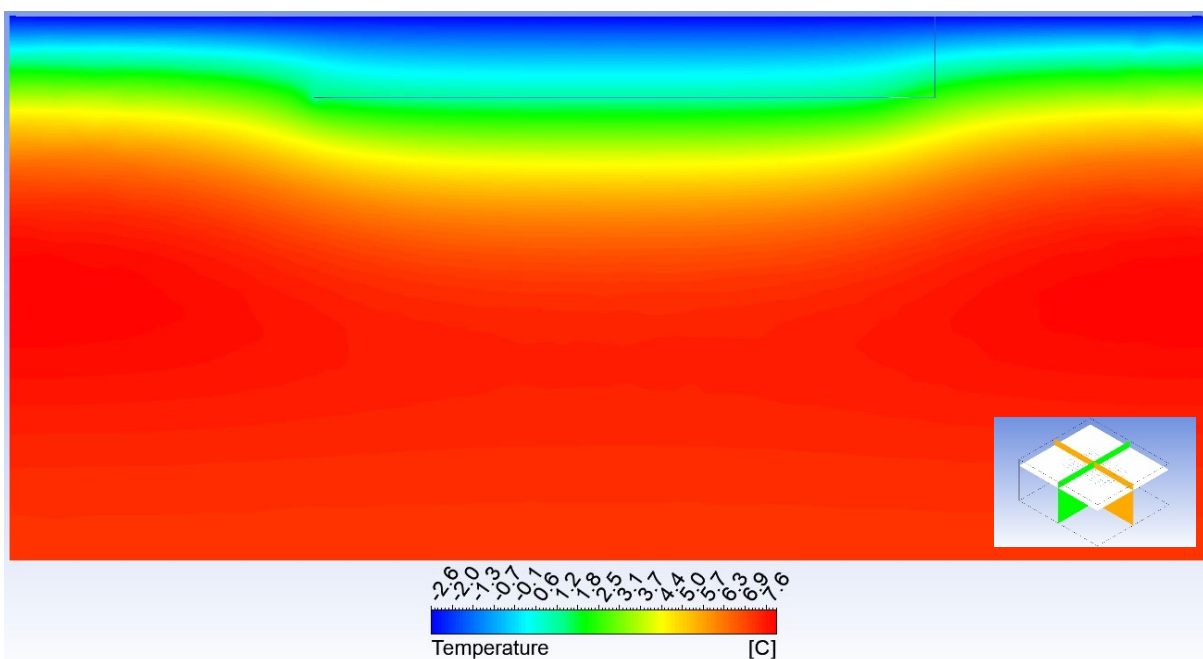
Rys. 73. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna pomarańczowa - 450 h



Rys. 74. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna pomarańczowa - 900 h



Rys. 75. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna pomarańczowa - 1350 h



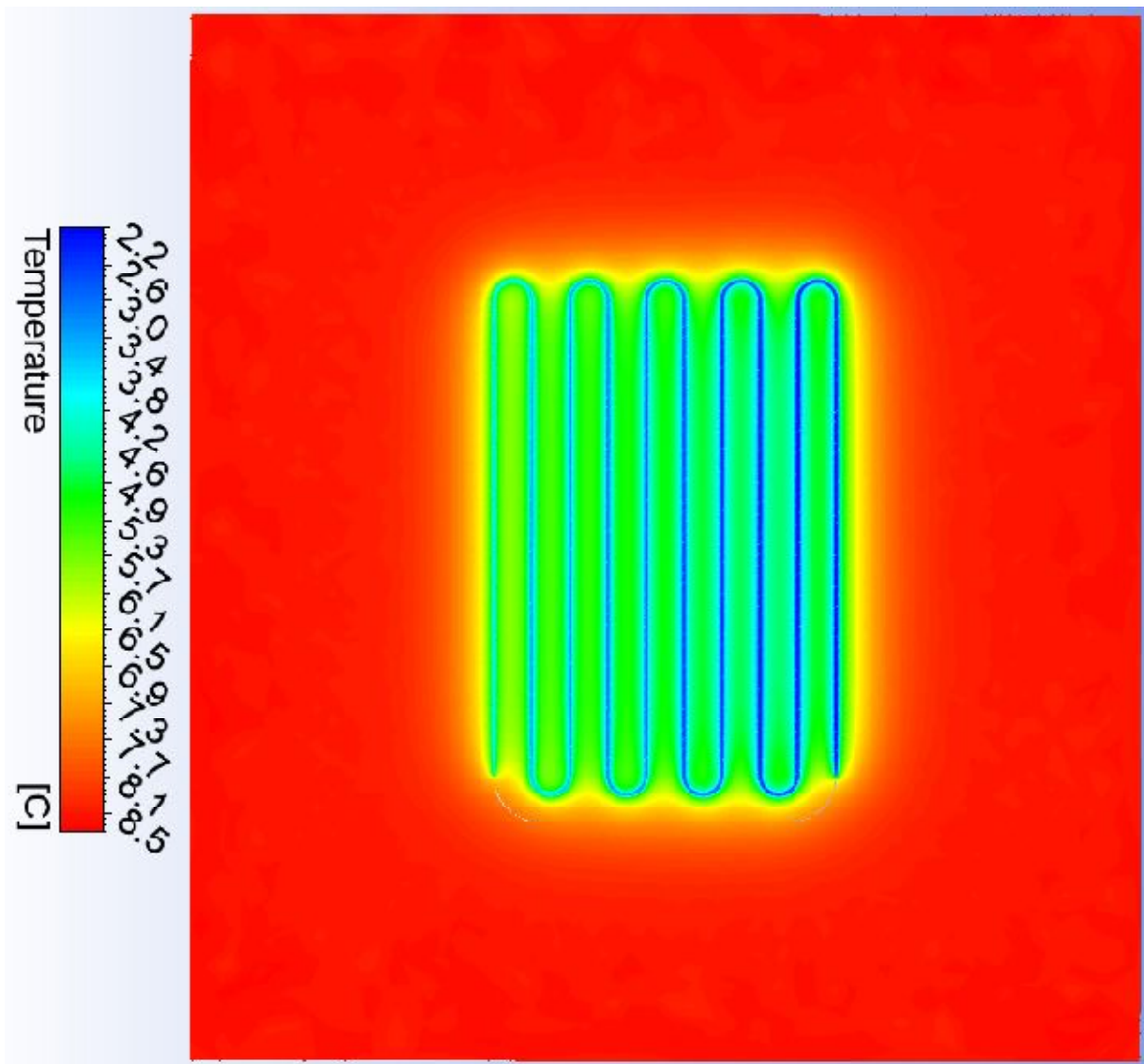
Rys. 76. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna pomarańczowa - 1800 h

W płaszczyźnie pomarańczowej, umiejscowionej w przekroju poprzecznym wymiennika, można zaobserwować, że następuje równomierne (patrz: przypis 8) wychładzanie otaczającego grunt wzdłuż posadowionych rur. W skrajnych obszarach wymiennika na jego brzegach zaobserwować można, że przestrzeń ponad wymiennikiem jest regenerowana cieplnie z tych obszarów gruntu których nie zakłóca on cieplnie. W obszarach skrajnych rur ruch ciepła odbywa się tak w kierunkach poziomym jak i pionowym. Pomijając skrajne elementy, fronty temperatur

w gruncie rozchodzą się głównie w kierunku pionowym. Może to być przesłanka, co do możliwości zastosowania w symulacji modeli dwu lub jednowymiarowych.

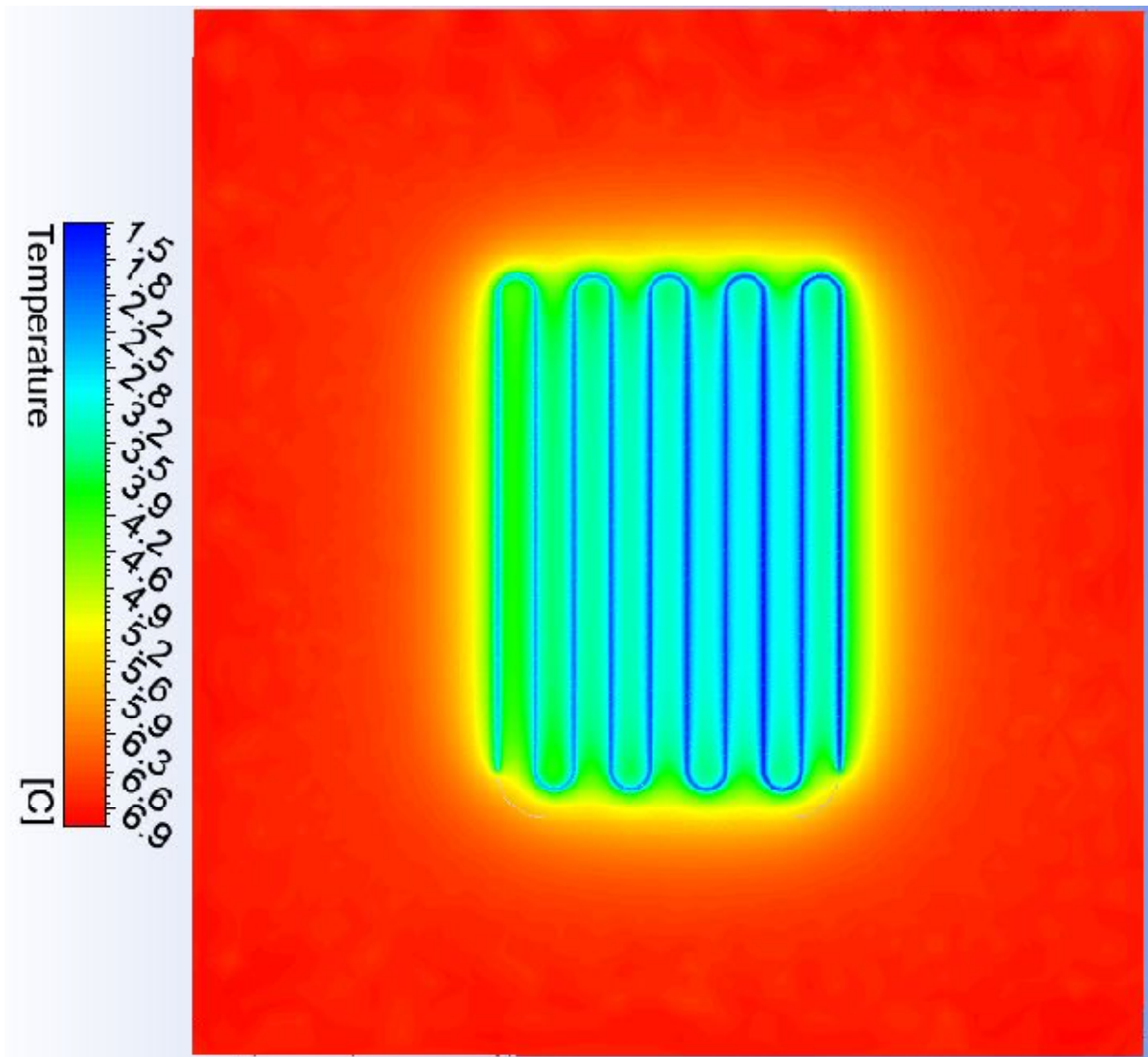
Wraz z eksploatacją ciepłą gruntu wpływ oddziaływania wymiennika sięga głębiej w grunt którego znaczna część zostaje naruszona cieplnie. Dla czasu 1800 godzin można zaobserwować, że praca wymiennika wpłynęła na temperaturę gruntu na głębokościach 8 – 9 metrów (rys. 76). Na głębokościach 5 – 8 m obserwuje się że regeneracja gruntu pod wymiennikiem zachodzi z obszarów niezakłóconych cieplnie przez wymiennik.

Rozkłady temperatur na białej płaszczyźnie przekroju umożliwiają analizę przestrzeni gruntu pomiędzy rurami wymiennika na głębokości jego posadowienia w gruncie. Podobnie jak poprzednio analizowano rozkłady temperatur dla 450 h, 900 h, 1350 h i 1800 h trwania procesu (rys. 77 – 80).



Rys. 77. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna biała - 450 h

W tym rzucie można zaobserwować, że rozkład temperatury w gruncie wzdłuż rurek wymiennika jest wyrównany. Podobnie jak opisano analizując płaszczyznę pomarańczową, począwszy od wlotu cieczy roboczej do wymiennika grunt wzdłuż jego kolejnych biegów jest eksploatowany coraz słabiej. W czasie 450 h zaznaczają się fronty niskich temperatur od strony wlotu (prawa strona rys. 77) a grunt ulegał schłodzeniu do temperatury 2,2 °C dla początkowych biegów wymiennika.

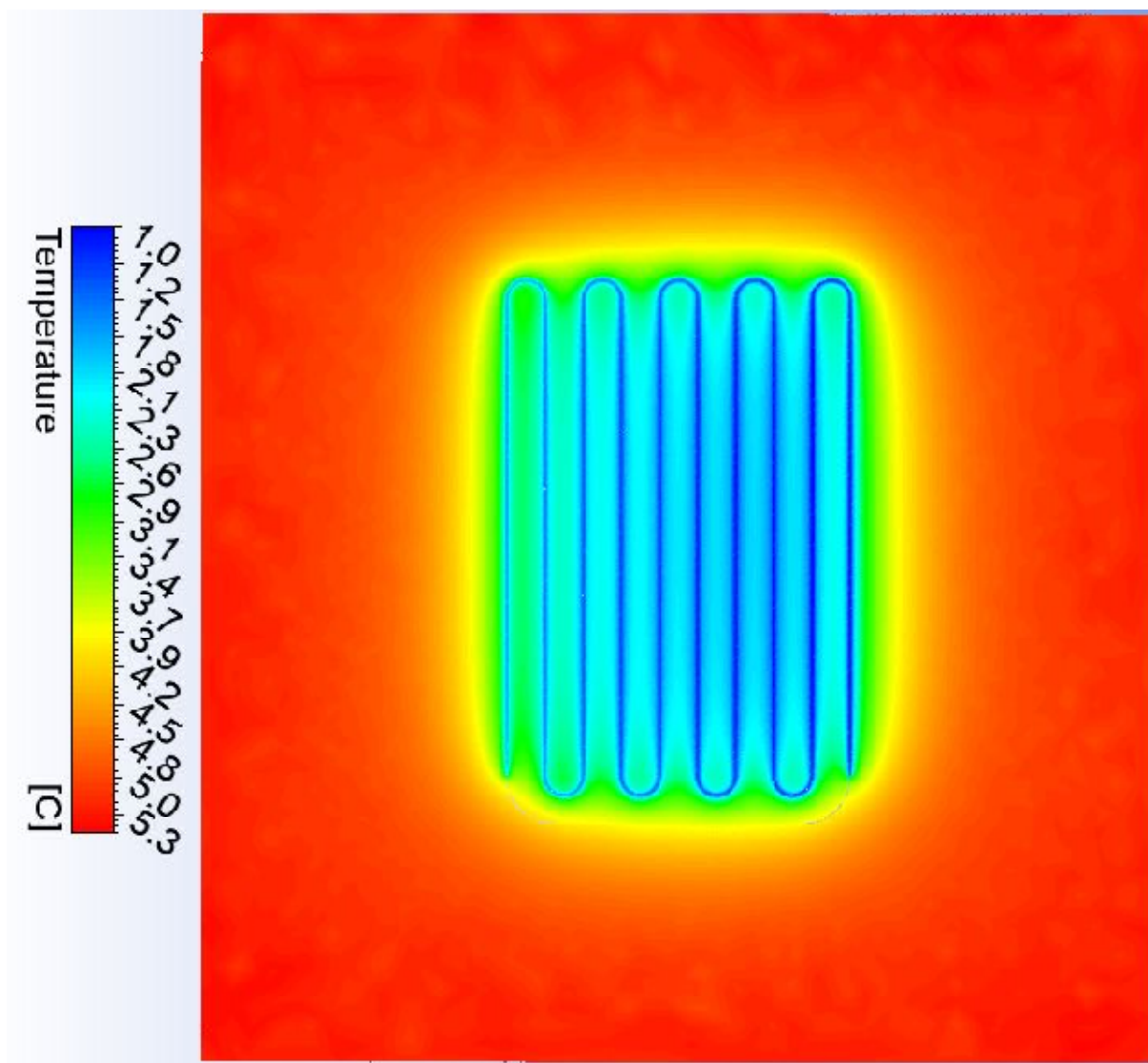


**Rys. 78. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna biała - 900 h**

Począwszy od wlotu, w miarę jak ciecz przepływa wzdłuż wymiennika, wychłodzenie gruntu zwiększa się. Spada również temperatura gruntu między biegami wymiennika. Spośród 10 biegów wymiennika grunt eksploatują cieplnie najbardziej nitki 2 – 6 (od prawej) dla kolejnych biegów dynamika spadku temperatury zmniejsza się. Tendencja ta utrzymuje się również dla czasów 900, 1350 i 1800 h (rys. 78, 79, 80). W miarę postępu procesu widoczne jest także, że



między pierwszym a drugim biegiem wymiennika grunt wychładzany jest słabiej niż między kolejnymi biegami. Podobnie sytuacja ma się z eksploatacją gruntu między biegiem 9 i 10, czyli ostatnim. Jak już wspomniano spowodowane jest to faktem, że dla pierwszego i ostatniego biegu wymiennika „dostępne” jest więcej ciepła z otaczającego gruntu, gdyż konkuruje on tylko z jednym sąsiadującym biegiem w przeciwieństwie do biegów wewnętrznych.

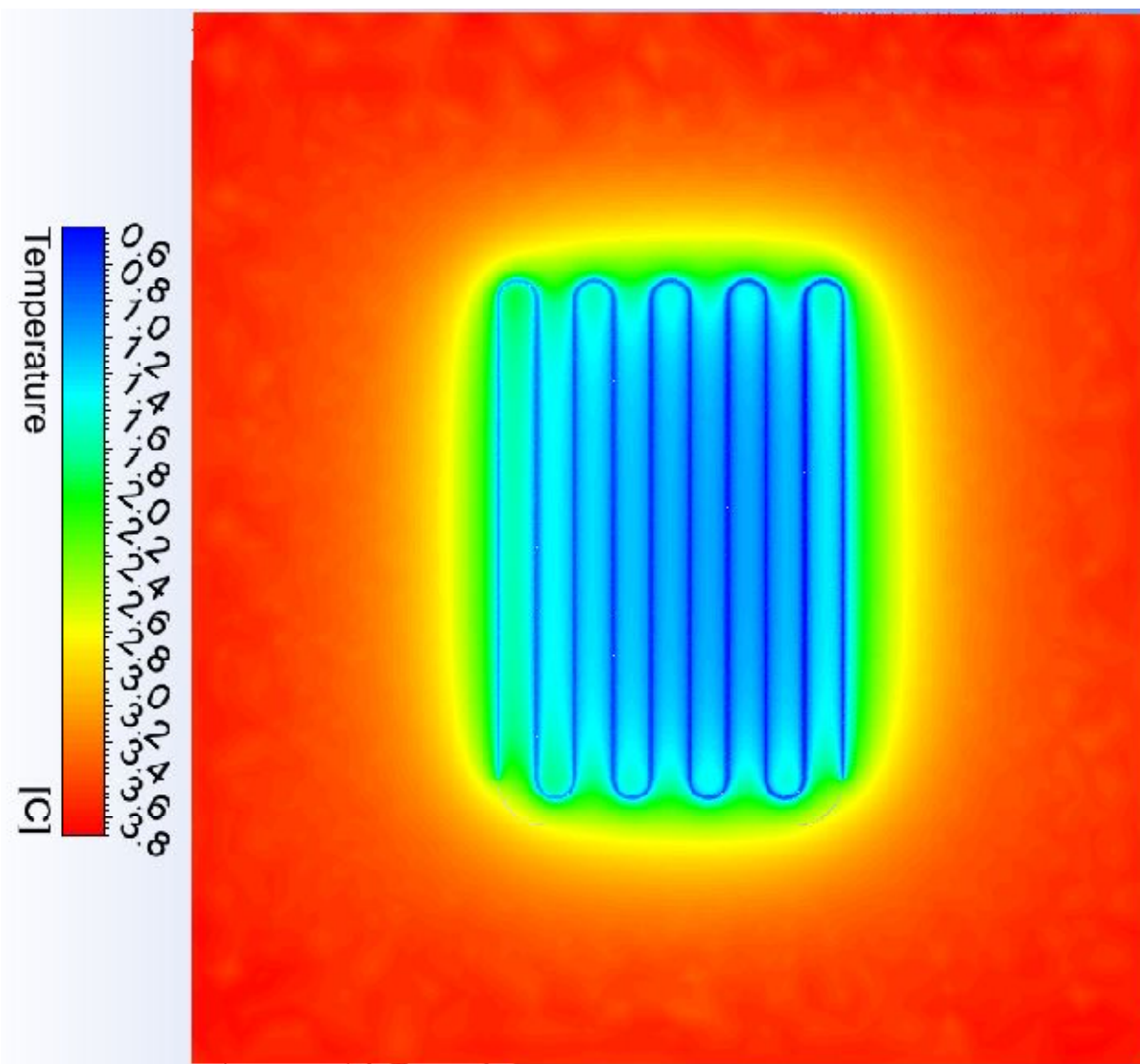


Rys. 79. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna biała - 1350 h

W czasie 1800 h (rys. 80) minimalna temperatura gruntu spadła w otoczeniu rur wymiennika do  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , natomiast maksymalna temperatura w rejestrowanym obszarze wynosiła  $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jest to wyraźny wpływ przyjętego warunku na powierzchni gruntu.

W płaszczyźnie poziomej wymiennika można zaobserwować jak intensywnie eksploatowany jest grunt w kierunku poziomym. Wpływ wymiennika na otaczający grunt w tej płaszczyźnie jest

dość równomierny i sięga maksymalnie 2 - 2,5 m, co daje przesłanki, co do możliwości ustawiania takich wymienników w pobliżu kanalizacji, wodociągów, czy innych instalacji podziemnych, na które praca wymiennika może mieć wpływ.



Rys. 80. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyzna biała - 1800 h

W końcowym czasie grunt wychłodzony jest minimalnie do 0,6 °C w bezpośrednim otoczeniu rur. Pomiędzy biegami wymiennika 2 a 7 grunt wychłodzony jest najmocniej i zaznacza się ciemniejsze pole w tej przestrzeni.

#### *Mapy temperatur dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych*

Pierwszym analizowanym wymiennikiem slinky był układ o zwojach rozłącznych w odstępnie 500 mm (typ *extended*).

Na rys. 81 przedstawiono mapy temperatur dla płaszczyzny zielonej tj. umiejscowionej wzdłuż wymiennika. Analizę tak jak poprzednio przeprowadzono dla czasów 450 h, 900 h, 1350 h i 1800 h trwania procesu..

W 450 h (rys. 81 a) początkowe zwoje wymiennika wychładzają grunt wyraźnie mocniej niż kolejne. Jednak w otoczeniu wymiennika temperatura gruntu jest wyrównana i wynosi 5 - 6 °C. Jedynie przy samych rurkach jest nieco niższa, co szczególnie obserwowano dla zwojów początkowych.

W 900 h (rys. 81 b) obserwowany jest podobny efekt jak dla wymiennika liniowego. Mianowicie wpływ warunku na powierzchni oraz eksploatacja gruntu przez wymiennik powoduje, że temperatury nad wymiennikiem są mniejsze niż pod nim. W miarę postępu procesu tendencja ta nasila się. Wymiennik slinky o zwojach rozłącznych eksploatuje grunt w głąb w miarę równomiernie. Jednocześnie wpływ wymiennika na otaczający grunt w poziomie na głębokości jego instalacji jest niewielki. Oznacza to, że takie wymienniki można układać blisko „końcami” względem siebie. O ile początkowo, w tej płaszczyźnie, dysproporcja pomiędzy wychłodzeniem gruntu nad poziomem zainstalowania wymiennika a pod nim jest wyraźnie widoczna, to dla 1350 h i 1800 h (rys. 81 c, d) różnica ta maleje a front temperatury nad wymiennikiem się wyrównuje. Podobnie zachowuje się wymiennik liniowy.

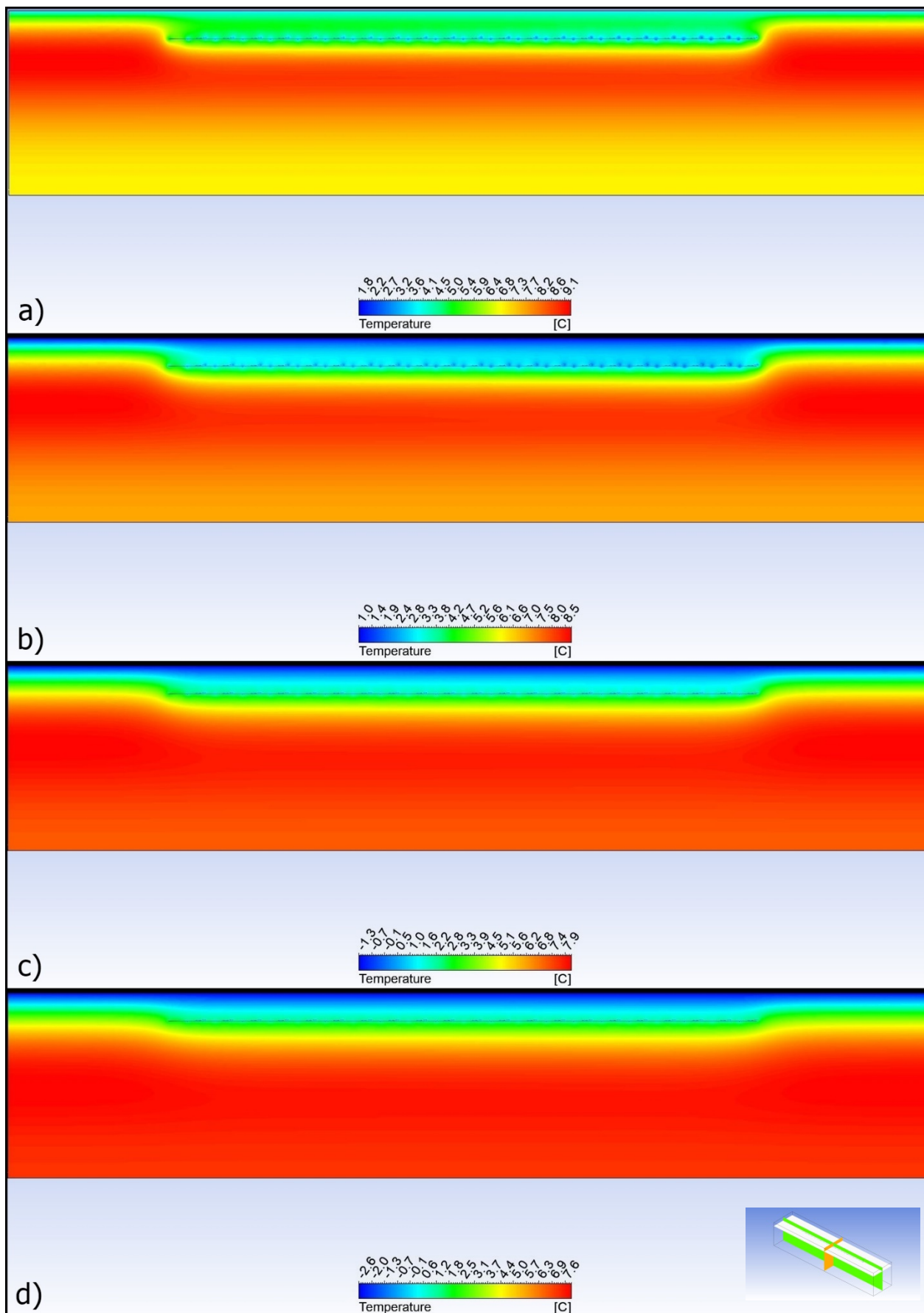
Rozkłady temperatur w gruncie na płaszczyźnie pomarańczowej tj. w osi symetrii w poprzek wymiennika przedstawiono na rys. 82.

Analizując mapy temperatur na płaszczyźnie pomarańczowej można stwierdzić, że w niewielkim otoczeniu wymiennika profil temperatury jest symetryczny. W czasie 450 h pracujący wymiennik pobiera ciepło ze swojego otoczenia a profile temperatur w dalszych częściach gruntu nie są jeszcze przez niego zbyt mocno zakłócone. W miarę postępowania procesu, deficyt ciepła w otoczeniu wymiennika jest uzupełniany ciepłem z dalszych obszarów gruntu. Profile temperatur tworzą strukturę podobną do leja, który w miarę postępowania procesu ulega rozmyciu. Maksymalna temperatura w gruncie w czasie 1800 h jest taka sama jak dla wymiennika liniowego i dotyczy części gruntu niezaburzonej przez wymiennik. Z racji swojej niewielkiej szerokości wymiennik slinky zaburza temperaturę w całej analizowanej objętości gruntu w zdecydowanie mniejszym stopniu niż wymiennik linowy. Rozkłady temperatur na płaszczyźnie białej umożliwiają analizę temperatur pomiędzy pętlami wymiennika slinky w jego płaszczyźnie poziomej na głębokości jego posadowienia w gruncie (rys. 83).

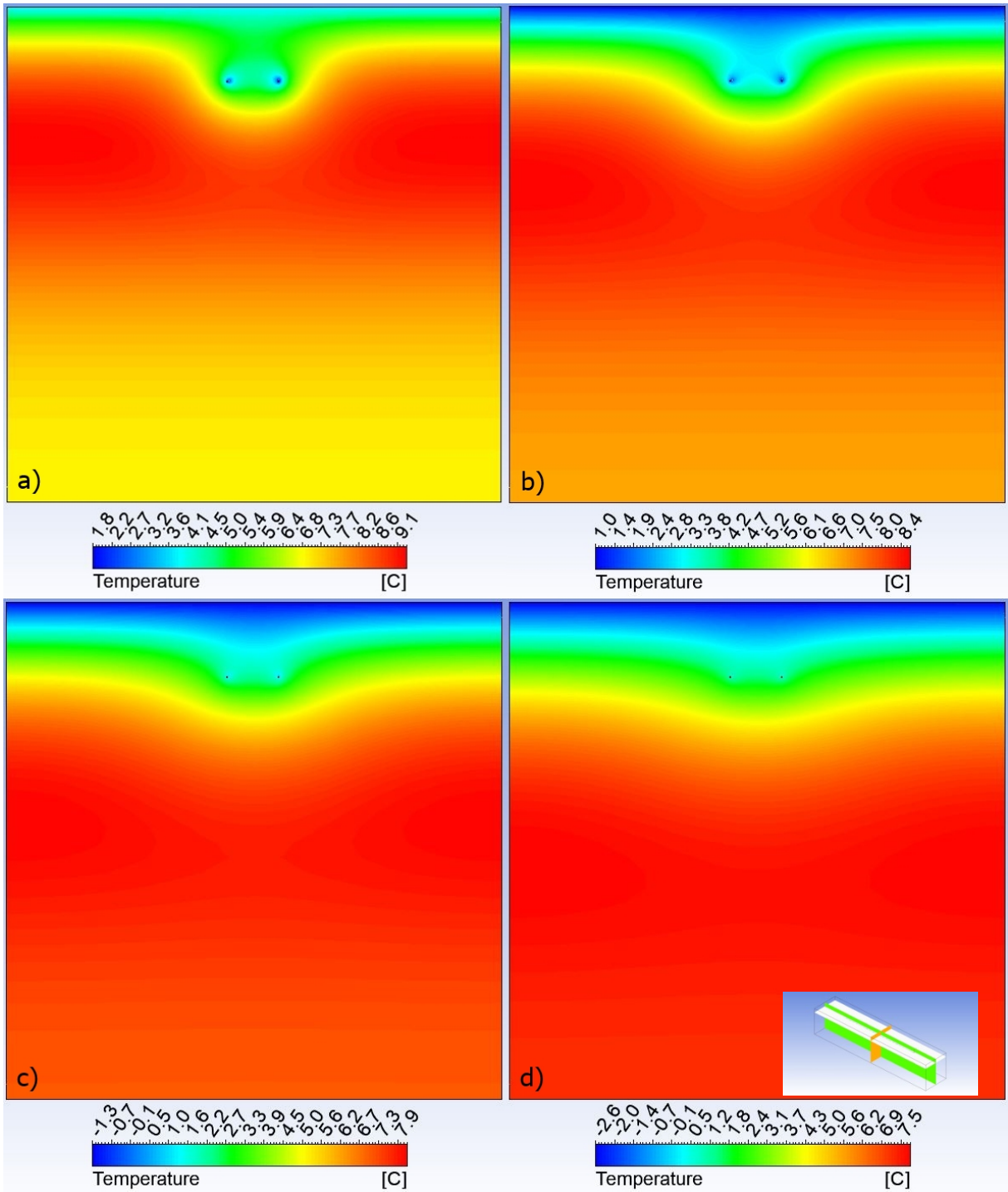
Podobnie jak na płaszczyźnie zielonej także i tu można stwierdzić, że początkowe zwoje wymiennika mocniej eksploatują grunt niż zwoje końcowe co objawia się większym wychłodzeniem gruntu w ich okolicy. Podobnie jak dla wymiennika liniowego pierwszy i ostatni

segment słabiej wychładzają grunt niż pozostałe zwoje. Tutaj także obserwowany jest brak konkurencji o ciepło w gruncie. Grunt wokół rurek wymiennika wychładza się maksymalnie do temperatury 0.4 °C.

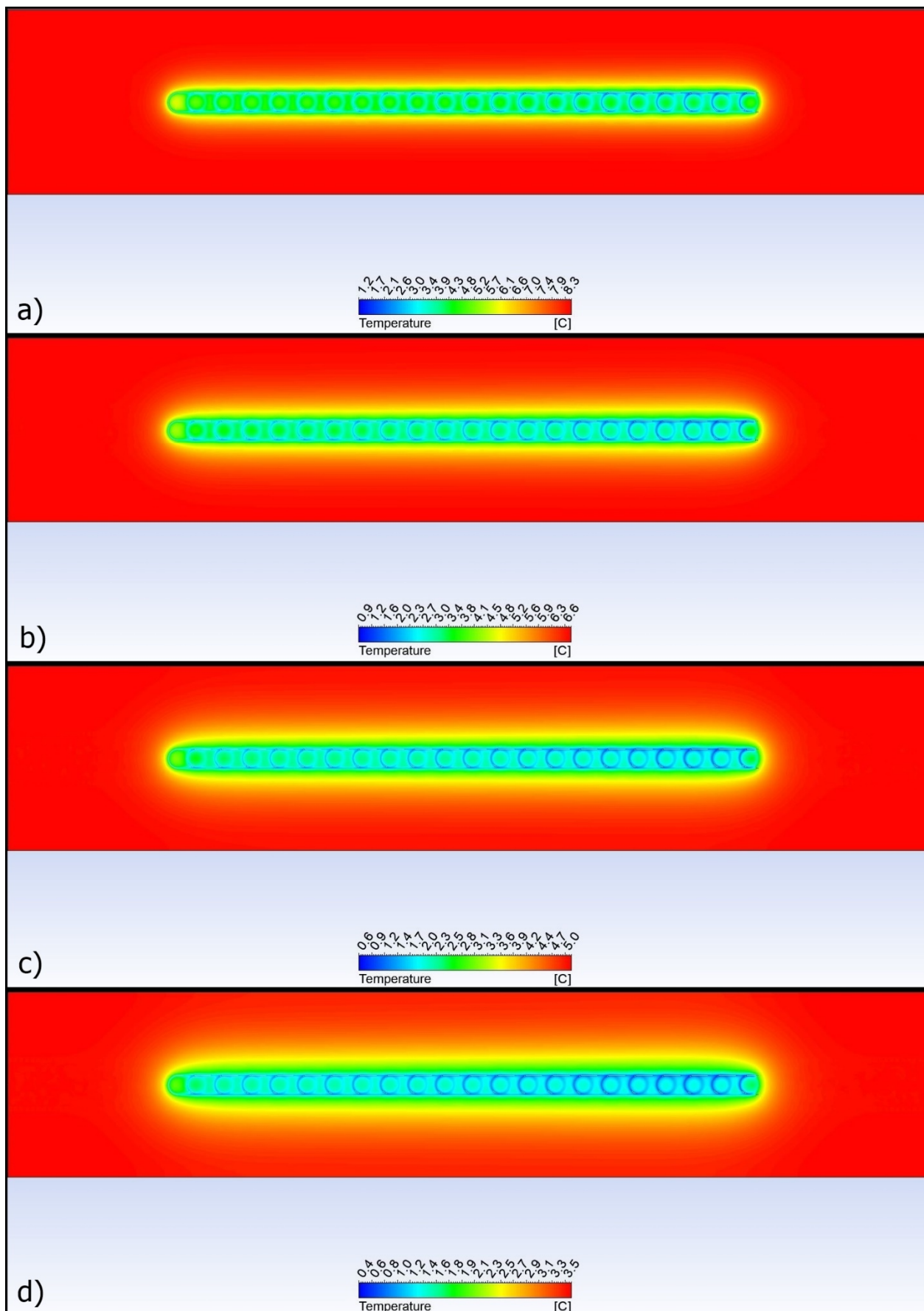
Na kolejnych mapach temperatur (rys. 84 – 92) zamieszczono wyniki symulacji dla pozostałych konfiguracji wymienników slinky tj. wymienników ze zwojami stycznymi oraz zachodzącymi na siebie o 250 i 500 mm. Wyniki tak jak poprzednio obrazuje rozkłady w dla 450 h, 900 h, 1350 h i 1800 h trwania procesu. Analiza jakościowa uzyskanych map daje wnioski podobne jak opisano powyżej dla wymiennika ze zwojami rozłącznymi.



Rys. 81. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny - płaszczyna zielona, a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h

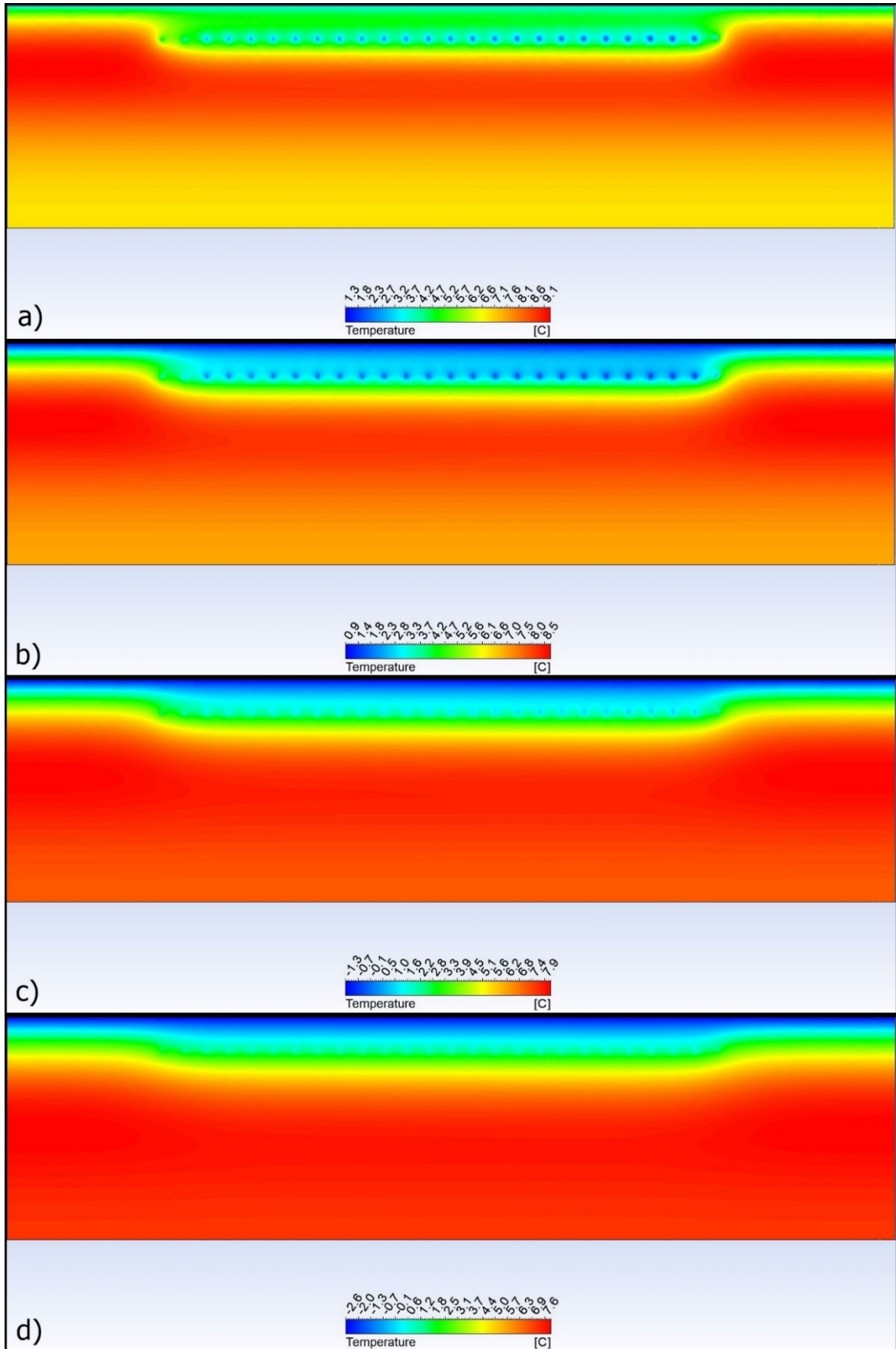


Rys. 82. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny - płaszczyzna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h



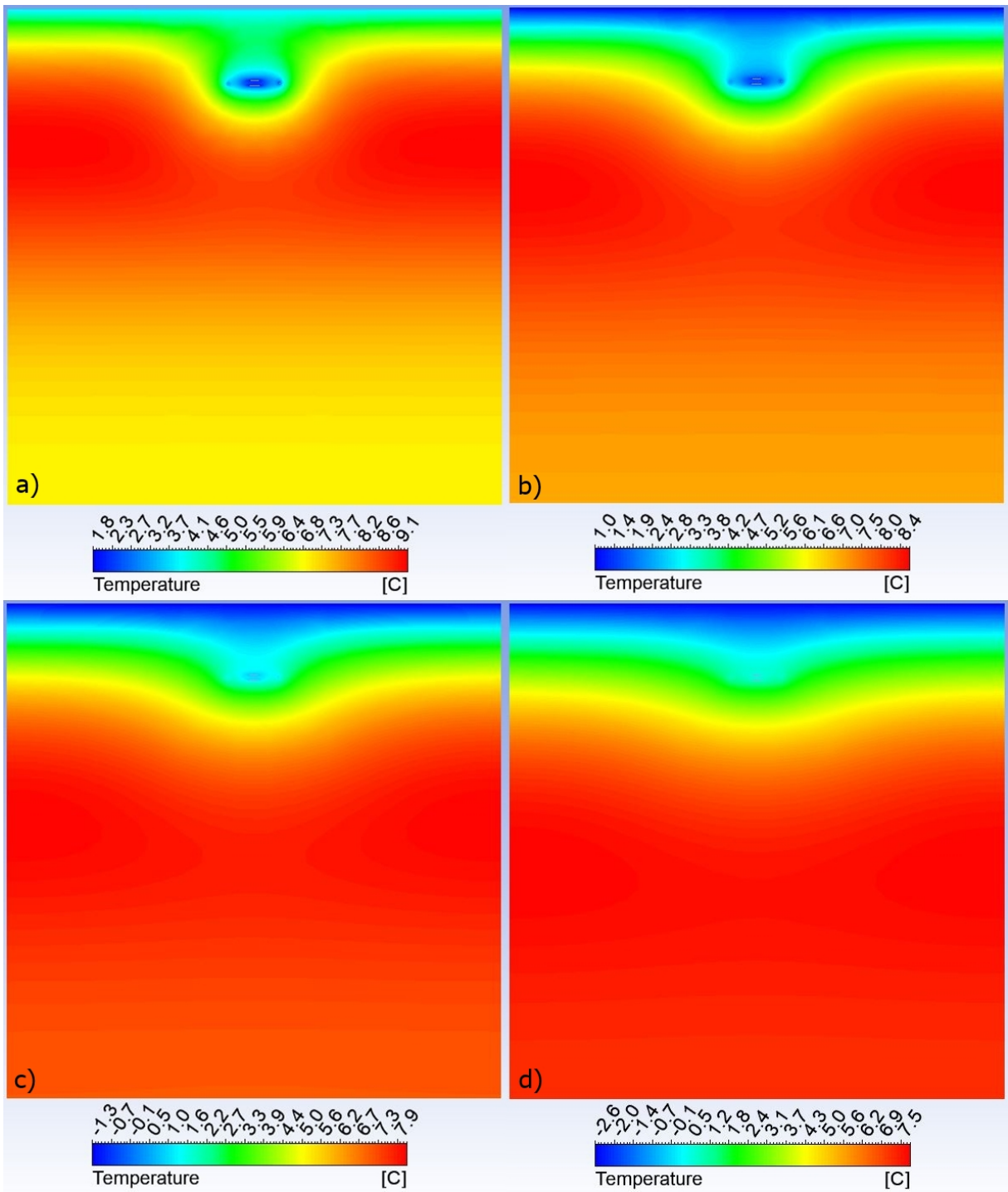
Rys. 83. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny – płaszczyna biała a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h

Mapy temperatur dla wymiennika slinky o zwojach stycznych

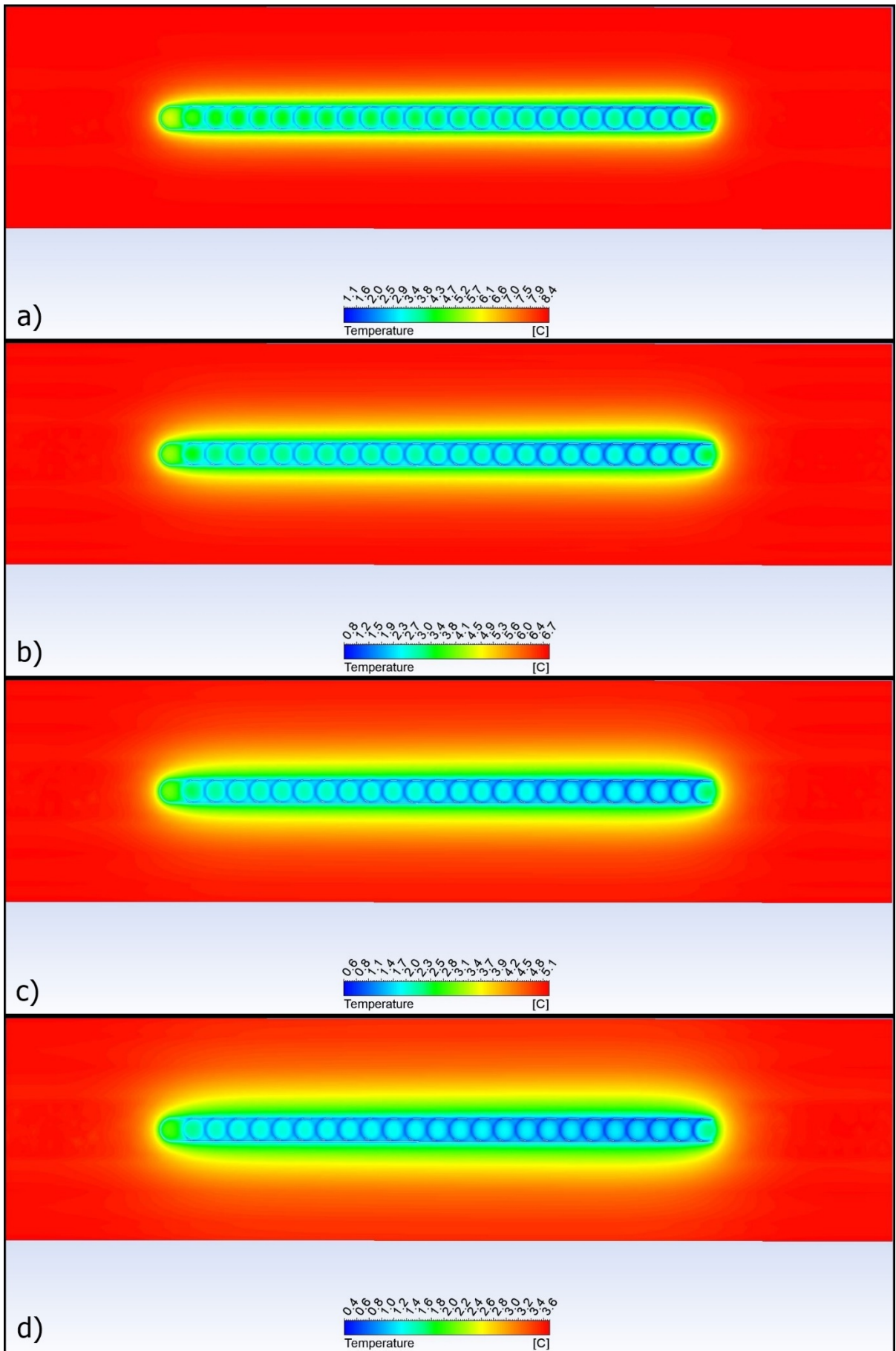


Rys. 84. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny – płaszczyzna zielona a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h



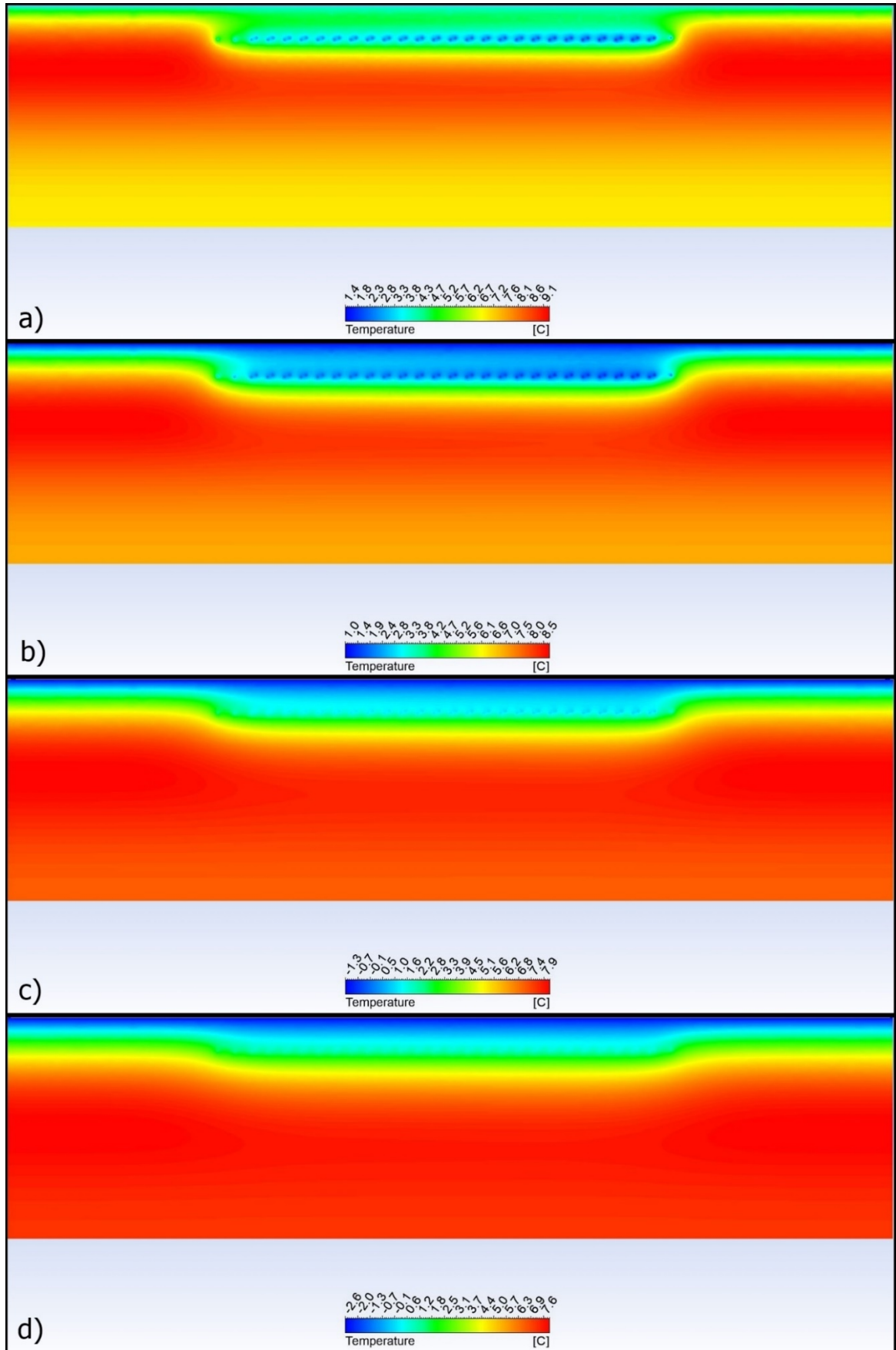


Rys. 85. Rozkład temperatur wymiennik slinky styczny - płaszczyna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h.

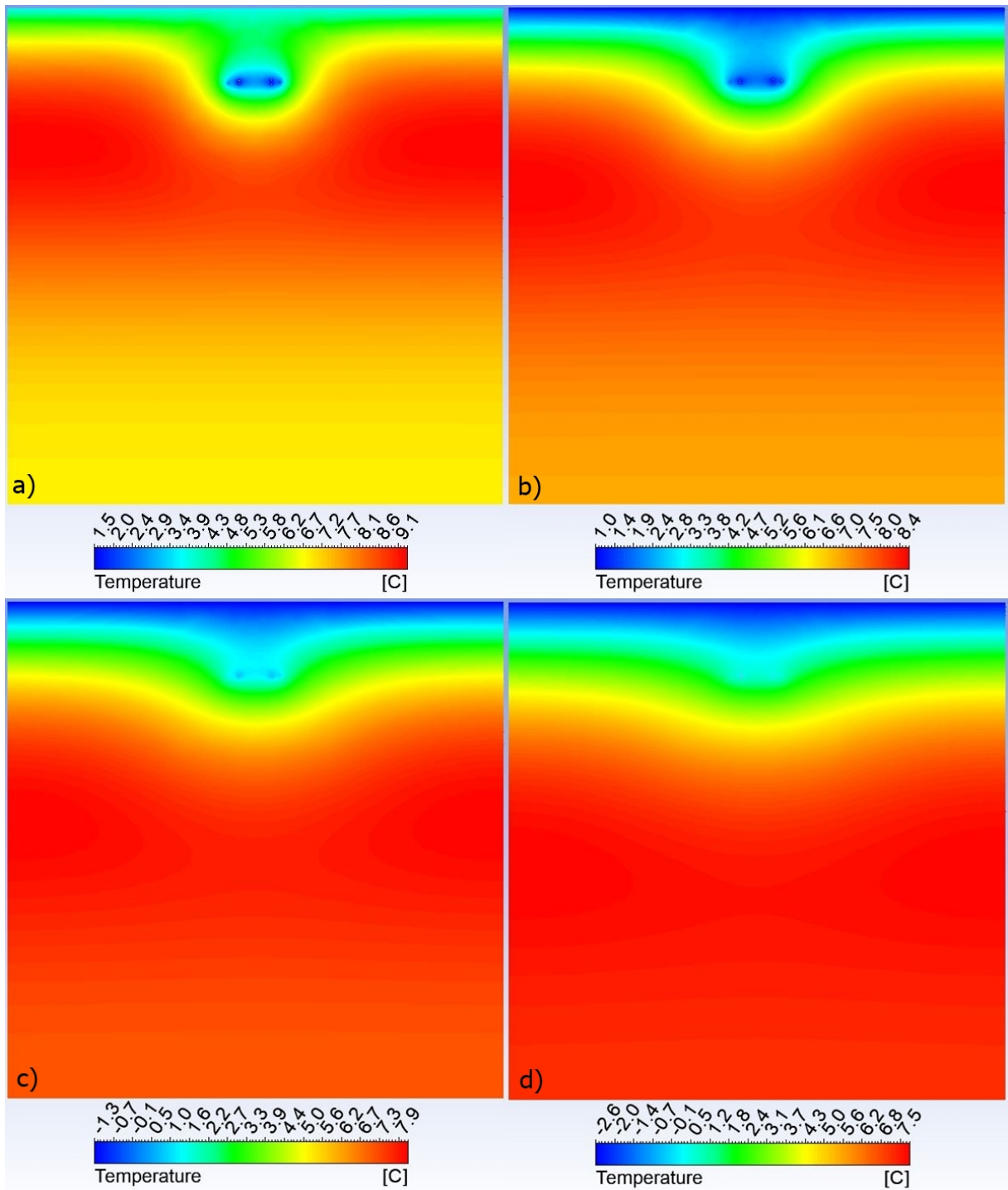


Rys. 86. Rozkład temperatur wymiennik slinky styczny – płaszczyna biała a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h

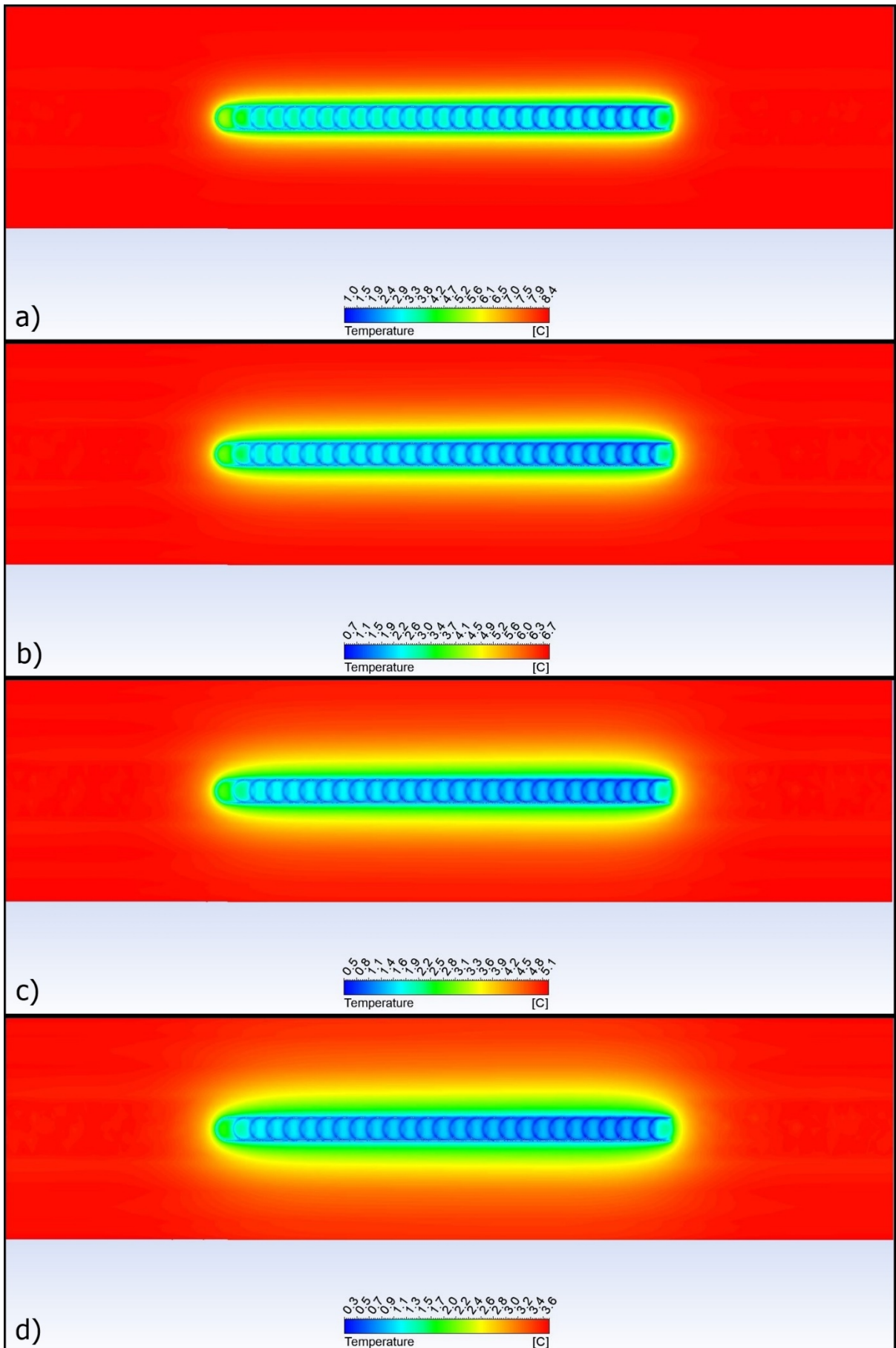
Mapy temperatur dla wymiennika o zwojach zachodzących o 250 mm



Rys. 87. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm – płaszczyzna zielona a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h

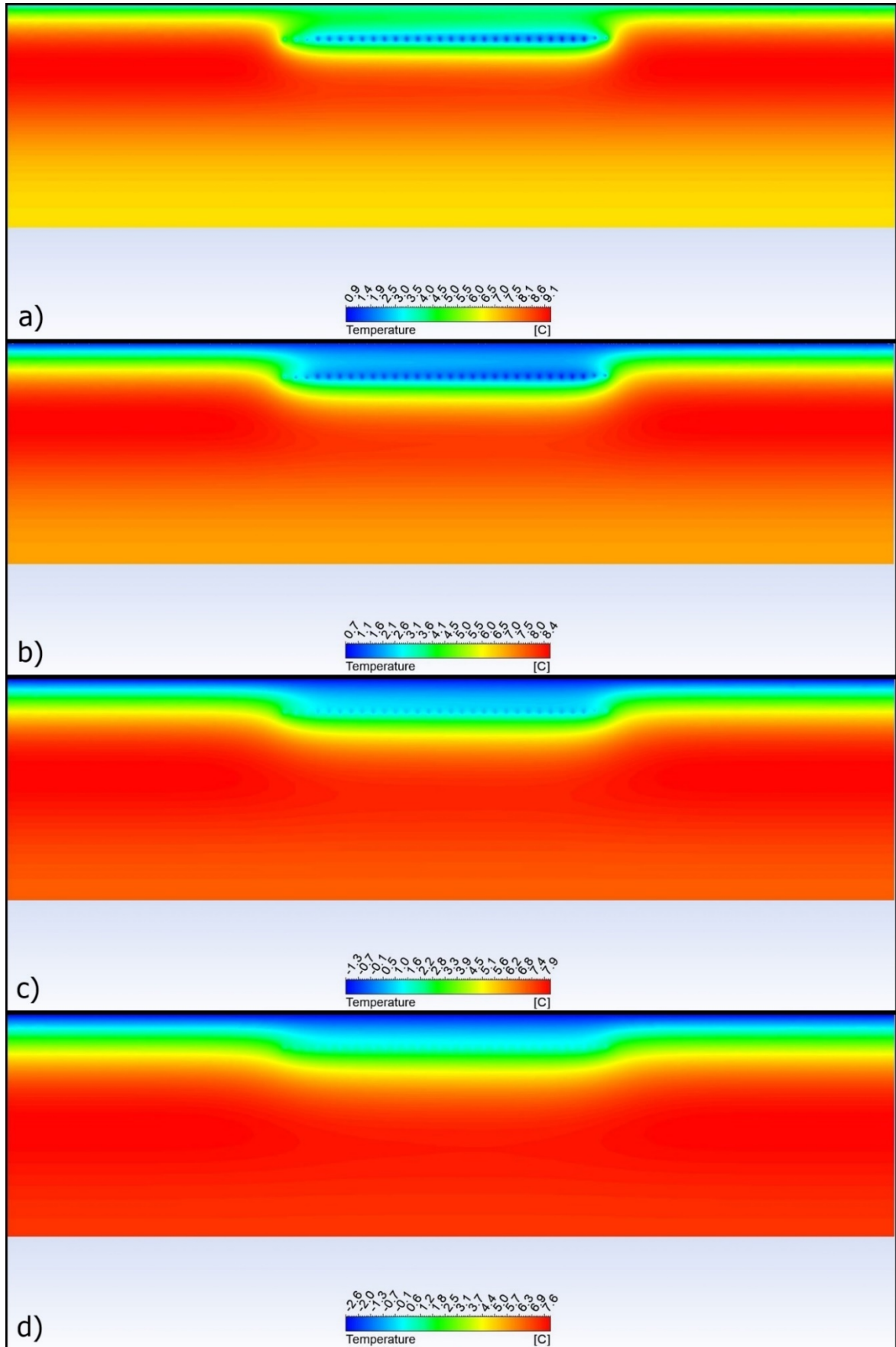


Rys. 88. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm - płaszczyzna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h

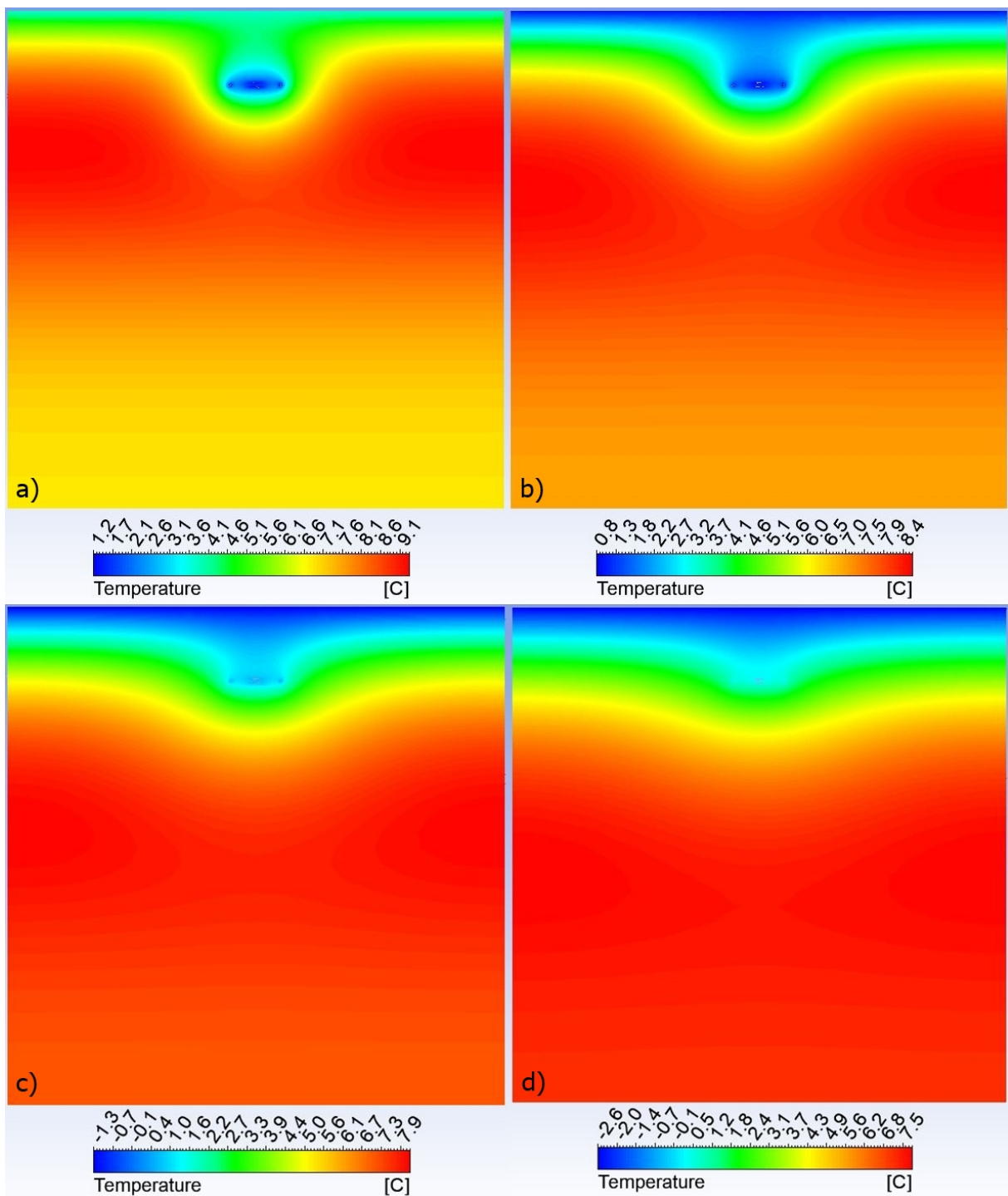


Rys. 89. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm – płaszczyna biała a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h

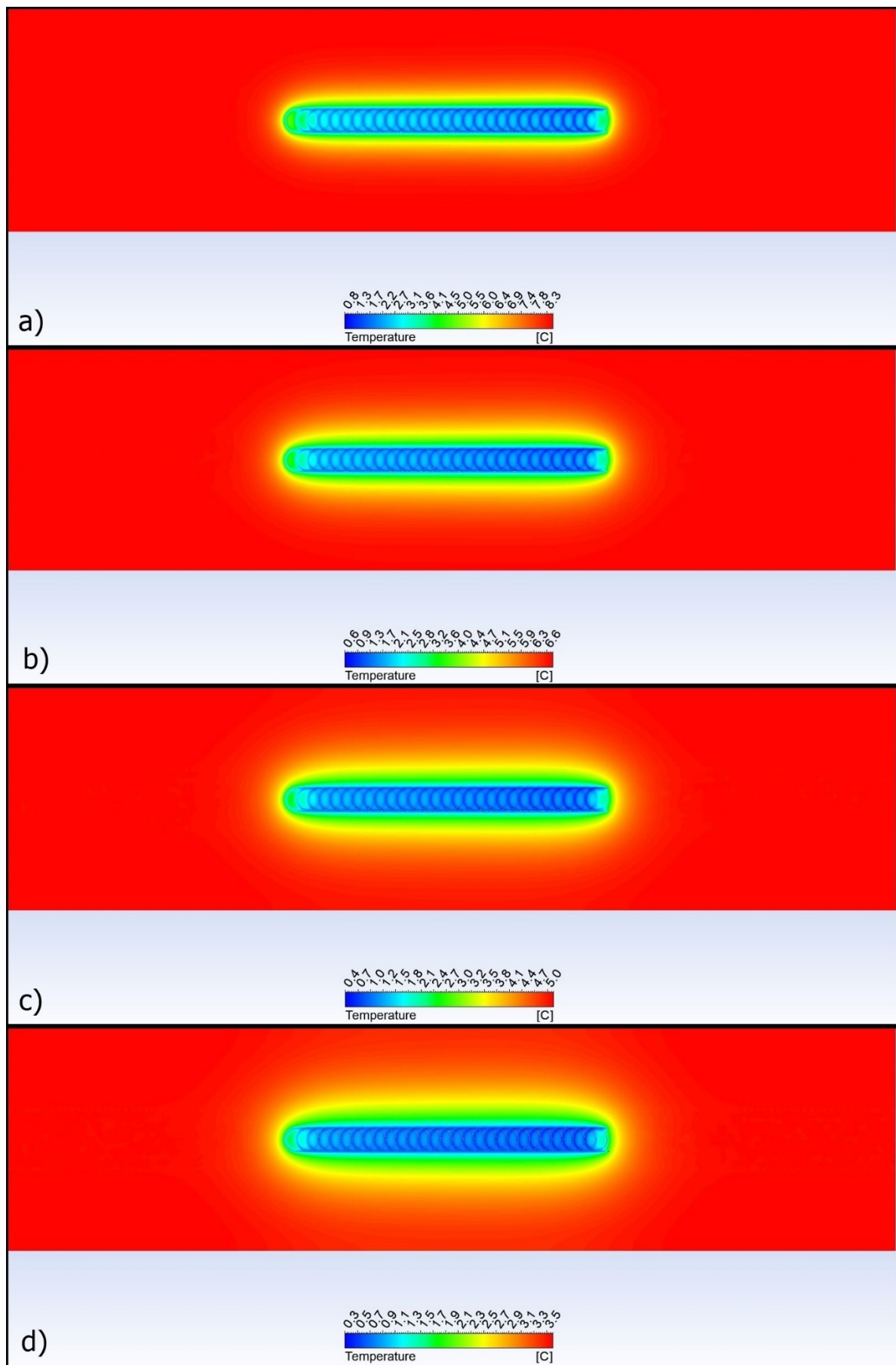
Mapy temperatur dla wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 500 mm



Rys. 90. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm – płaszczyzna zielona a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h



Rys. 91. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm - płaszczyzna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h



Rys. 92. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm – płaszczyzna biała, a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h



Wyniki zaprezentowane na zamieszczonych mapach temperatur pozwalają, dla wszystkich badanych wymienników, wysnuć wniosek mówiący, że temperatury w gruncie w czasie prowadzenia procesu spadają, na co oprócz pracy wymienników, także ma wpływ sformułowany warunek brzegowy na powierzchni gruntu.

Analizując zbiorczo przedstawione rozkłady temperatur na płaszczyźnie białej można stwierdzić, że wymiennik liniowy a także wszystkie analizowane wymienniki slinky równomiernie eksploatują grunt wokół siebie o czym świadczą obserwowane symetryczne kształty frontów temperatur. Wymienniki slinky, intensywniej niż wymiennik liniowy, eksploatują grunt wzdłuż swoich geometrii oraz w kierunku pionowym. Także w kierunku pionowym w głąb wymienniki eksploatują grunt po całej długości dość równomiernie choć widać różnice w bezpośrednim otoczeniu wymiennika. Oprócz niskich temperatur przy powierzchni spowodowanych warunkiem brzegowym najniższe temperatury gruntów zarejestrowane zostały w bezpośrednim otoczeniu rury wymiennika, szczególnie dla początkowych zwojów z pominięciem zwoju pierwszego. Symulacja CFD wykazała, że kierunek przepływu cieczy ma istotny wpływ na sposób w jaki następuje wychłodzenie gruntu. Najmocniej grunt wychłodzony jest w części bliskiej wlotowi medium do wymiennika. Jednak dla skrajnych rur w wymienniku liniowym oraz dla skrajnych zwojów w wymiennikach slinky wyraźnie widać wpływ otaczającego gruntu. Skrajne linie oraz nawroty między liniami w wymienniku liniowym wychładzają grunt słabiej niż rury wewnątrz jego geometrii. Podobnie zachowują się pętle wymienników slinky i to pomimo faktu że pierwszym zwoju panuje najniższa temperatura medium. Oznacza to, że rury wymienników „konkurują” ze sobą o energię w otoczeniu i grunt jest wychładzany najbardziej tam, gdzie temperatura medium jest najniższa a fragmenty wymiennika sąsiadują ze sobą z każdej strony. Skrajne fragmenty wymienników nie mają takiej konkurencji a regeneracja gruntu zachodzi z każdego kierunku. Im gęściej upakowany jest wymiennik tym wychłodzenie gruntu większe. Zaobserwowano także, że wymiennik liniowy z racji swojego kształtu blokuje intensywny dopływ ciepła do wnętrza swojej geometrii z otaczającego go gruntu. W przeciwieństwie do wymienników slinky obszar gruntu zaburzonego ciepnie jest zdecydowanie większy.

Formułując ogólne wnioski jakościowe można stwierdzić że istnieją cechy wspólne w jaki wymienniki slinky i liniowy wpływają na grunt w płaszczyźnie poziomej.

Do cech wspólnych należą:

- słabsze wychładzanie gruntu przez zwoje skrajne pierwszy i ostatni,
- najmocniejsze wychładzanie gruntu przez zwoje początkowe z pominięciem zwoju pierwszego

- dość równomierne wychładzanie gruntów w poprzek geometrii wymienników
- początkowo nierównomierne wychładzanie gruntu wzdłuż wymienników nad poziomem ich posadowienia.

Porównując natomiast wymienniki slinky o różnych konfiguracjach stwierdzono, że gęstość zabudowy gruntu zwojami w znaczny sposób wpływa na stopień wychłodzenia gruntu w bezpośrednim otoczeniu wymiennika. Gęstsza zabudowa powoduje większe jego wychłodzenie.

#### 4.7.2. Rozkłady temperatur

##### *Rozkłady temperatury gruntu wzdłuż wymienników*

Przedstawiona wyżej analiza jakościowa została uzupełniona o analizę ilościową uzyskanych wyników symulacji. W tym celu wykonano wykresy rozkładów temperatur wzdłuż wymienników w ich osi symetrii tj. na przecięciu płaszczyzn białej i zielonej na głębokości ich posadowienia czyli 1,5 m. Przeanalizowano temperaturę wylotową z badanych wymienników. Dokonano analizy mocy cieplnej i chłodniczej wymienników oraz uzyskanej energii cieplnej. Profile temperatur w gruncie wyznaczono dla czasów 450, 900, 1350 i 1800 godzin trwania procesu. Wykresy wykreślono odpowiednio dla wymiennika liniowego, slinky rozłącznego, slinky styczego, slinky zachodzącego o 250 mm i o 500 mm (rys. 93 - 97).

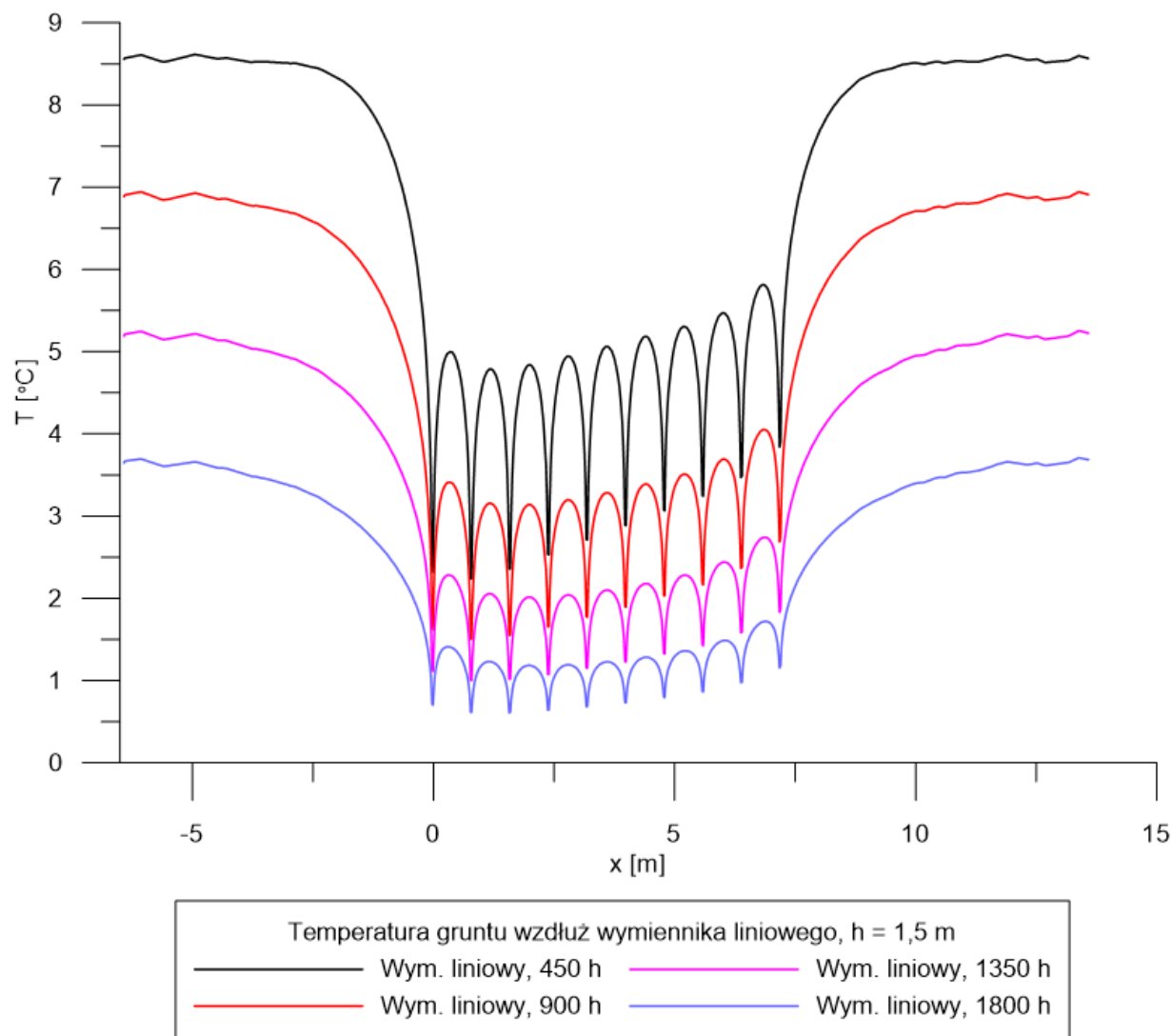
Zaprezentowane wykresy obrazują rozkłady temperatury wzdłuż wymiennika. Współrzędna 0 m odpowiada miejscu w którym ciecz cyrkulująca wpływa w obszar wymiany ciepła.

Zamieszczone w poprzednim rozdziale mapy temperatur wokół wymienników wykazały, że wychłodzenie gruntu pomiędzy zwojami jest nierównomierne a największe wychłodzenie następuje dla początkowych zwojów z wyłączeniem zwoju pierwszego. Zamieszczone wykresy umożliwiają dokładniejszą lokalizację minimalnych temperatur w gruncie oraz wychłodzenia gruntu między zwojami.

Analiza temperatur w gruncie wzdłuż wspomnianej osi stwarza pewne problemy dla różnych wymienników. Dla wymiennika liniowego wykonane odczyty są w osi rury. Wymienniki slinky z racji swej geometrii i sposobu posadowienia mają umieszczone rury minimalnie powyżej lub poniżej głębokości  $h = 1,5$  m. Mimo, że te rozbieżności są niewielkie mogą jednak wpływać na odczyty minimalnych temperatur w bezpośrednim sąsiedztwie rury.

Analizując wykres zamieszczony na rys. 93 wykonany dla wymiennika liniowego, można zauważyć, że najniższe temperatury występują dla drugiej i trzeciej nitki wymiennika. Natomiast w połowie odległości między kolejnymi nitkami obserwuje się lokalne maksima temperatur. Największe maksima znajdują się pomiędzy liniami skrajnymi 1 i 2 oraz przedostatnią i ostatnią linią czyli 9 i 10. Najmniejsze natomiast między nitkami 2 i 3 oraz 3 i 4. W miarę postępu

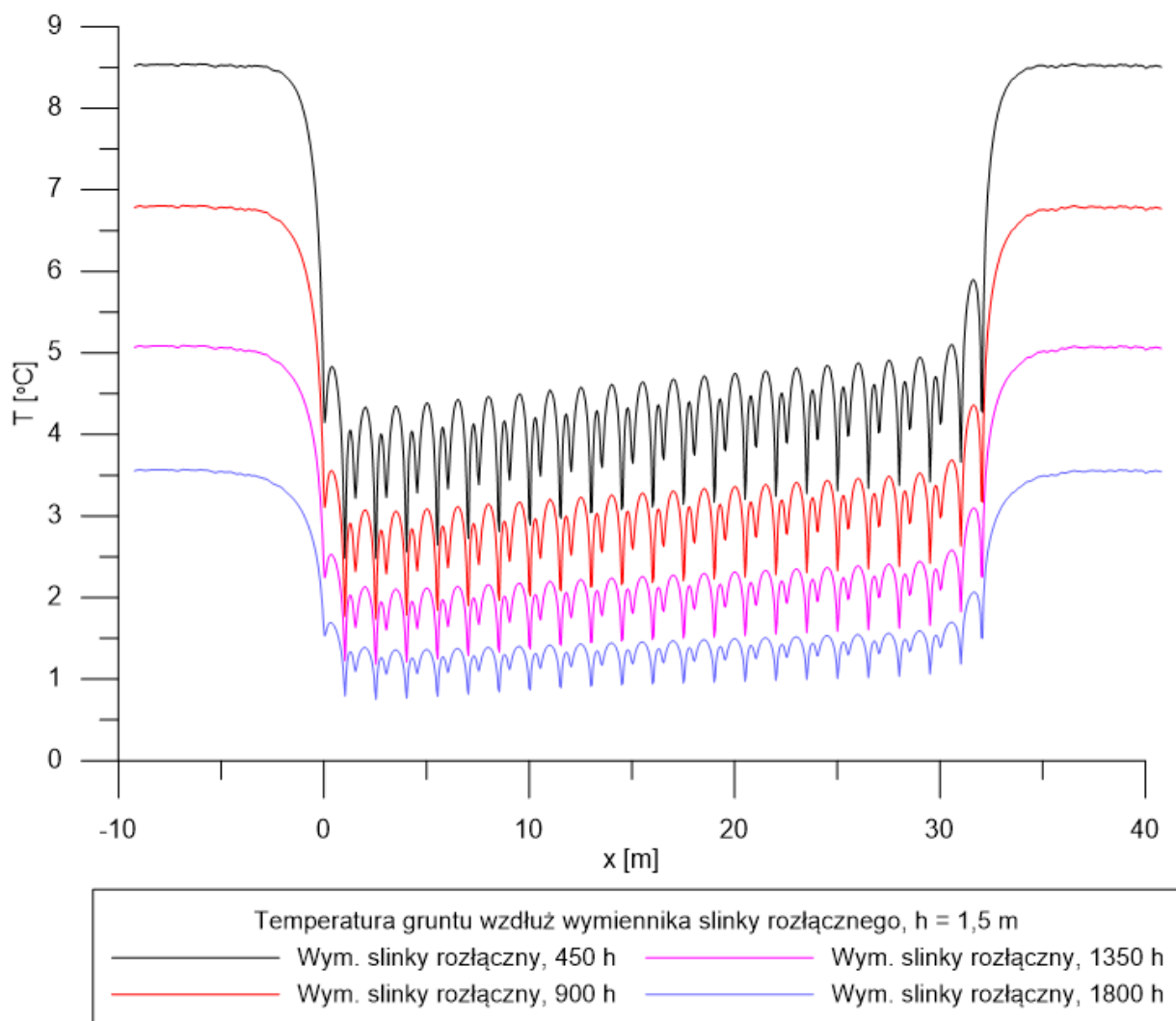
procesu temperatura pomiędzy pętlami sukcesywnie obniżała się a obserwowane amplitudy temperatur malały. Z wykresu wynika także iż w końcowym czasie eksploatacji wymiennik w poziomie wpływa na grunt na odległość około 5 m. Także różnice temperatur pomiędzy lokalnymi minimami i maksimami temperatury dla poszczególnych linii są zbliżone w poszczególnych czasach trwania procesu.



**Rys. 93. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika - liniowy dla 450, 900, 1350 i 1800 h**

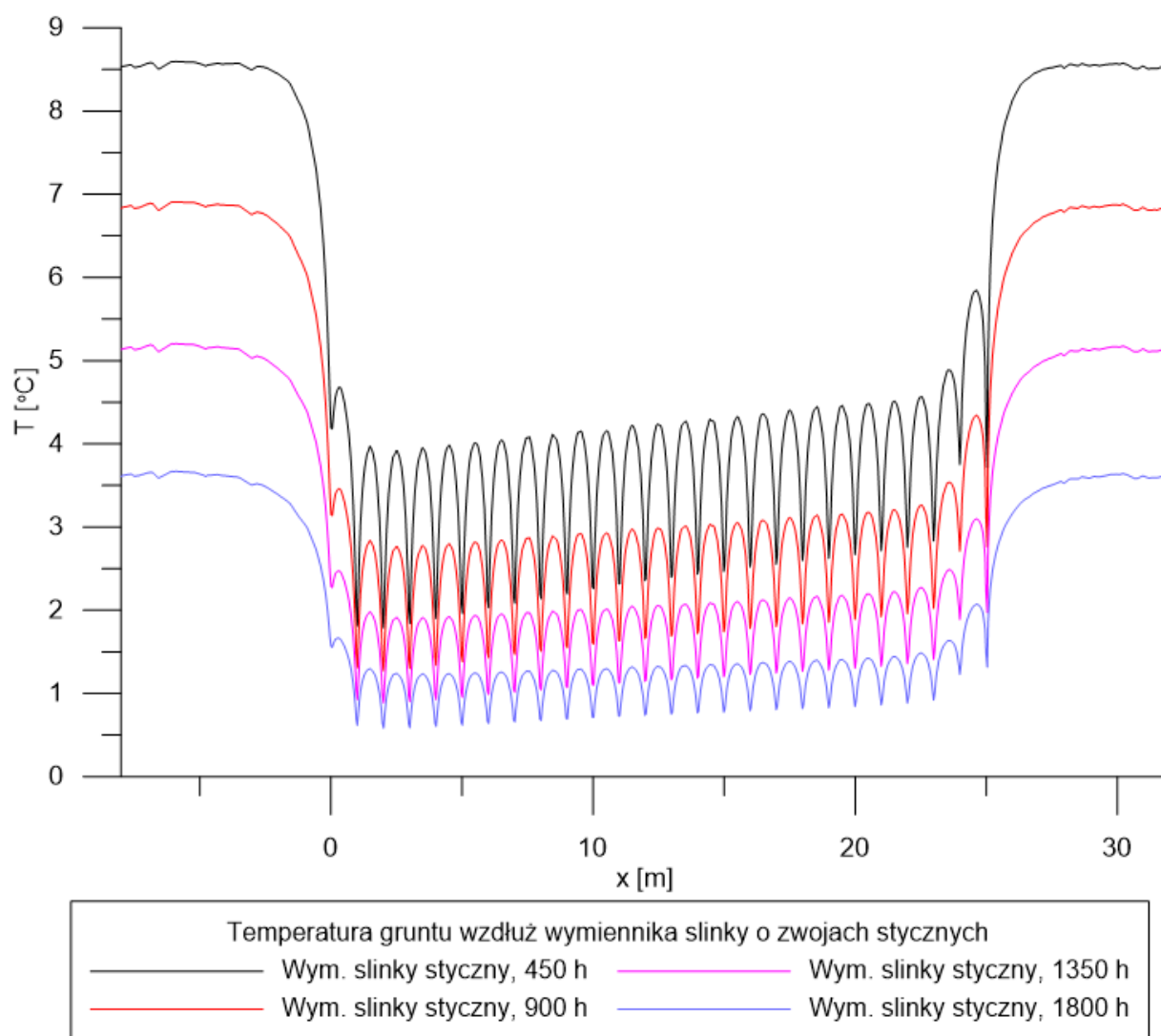
Kolejnym analizowanym wymiennikiem był wymiennik slinky o zwojach rozłącznych. Rozkład temperatur wzdłuż tego wymiennika slinky przedstawiono na rys. 94. Analizując zamieszczony wykres można zauważyć, że wpływ pracujących zwojów wymiennika objawia się poprzez występowanie pików temperatur. Kształty i szerokości pików są jednak inne niż dla wymiennika liniowego. Jest to związane z geometrią wymiennika. Podobnie jak dla omawianego poprzednio wymiennika liniowego, wymiennik slinky w konfiguracji rozłącznej eksploatuje grunt nierównomiernie. Temperatury gruntu w otoczeniu wymiennika są niższe od strony wlotu

cieczy cyrkulującej ( $x = 0$  m) i rosną w miarę przepływu przez wymiennik a grunt wychładzany jest słabiej. Ciecz robocza przepływając przez kolejne zwoje wymiennika nagrzewa się co powoduje zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy gruntem a wymiennikiem. Poszczególne „duże” piki temperatur odpowiadają środkom pętli wymiennika natomiast „małe” piki połowom odległości pomiędzy pętlami. Tak jak dla wymiennika liniowego, oprócz pierwszej i ostatniej pętli pozostałe wychładzają intensywnie grunt. Najmocniej pętla 2 i 3 oraz odcinek wymiennika między pętlą 1 i 2 oraz 2 i 3. Dla dłuższych czasów eksploatacji różnica temperatur między pikami zmniejsza się w czasie i po długości wymiennika. Oznacza to że następuje cieplne wyczerpanie gruntu. W miarę eksploatacji gruntu przez wymiennik amplitudy temperatur spadają. Pomijając skrajne zwoje różnice temperatur pomiędzy lokalnymi minimami i maksimami temperatury dla poszczególnych zwojów są zbliżone w poszczególnych czasach trwania procesu. Jest to analogia do pracy wymiennika liniowego Podobnie jest dla kolejno badanych modeli wymienników.



Rys. 94. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky rozłączny dla 450, 900, 1350 i 1800 h

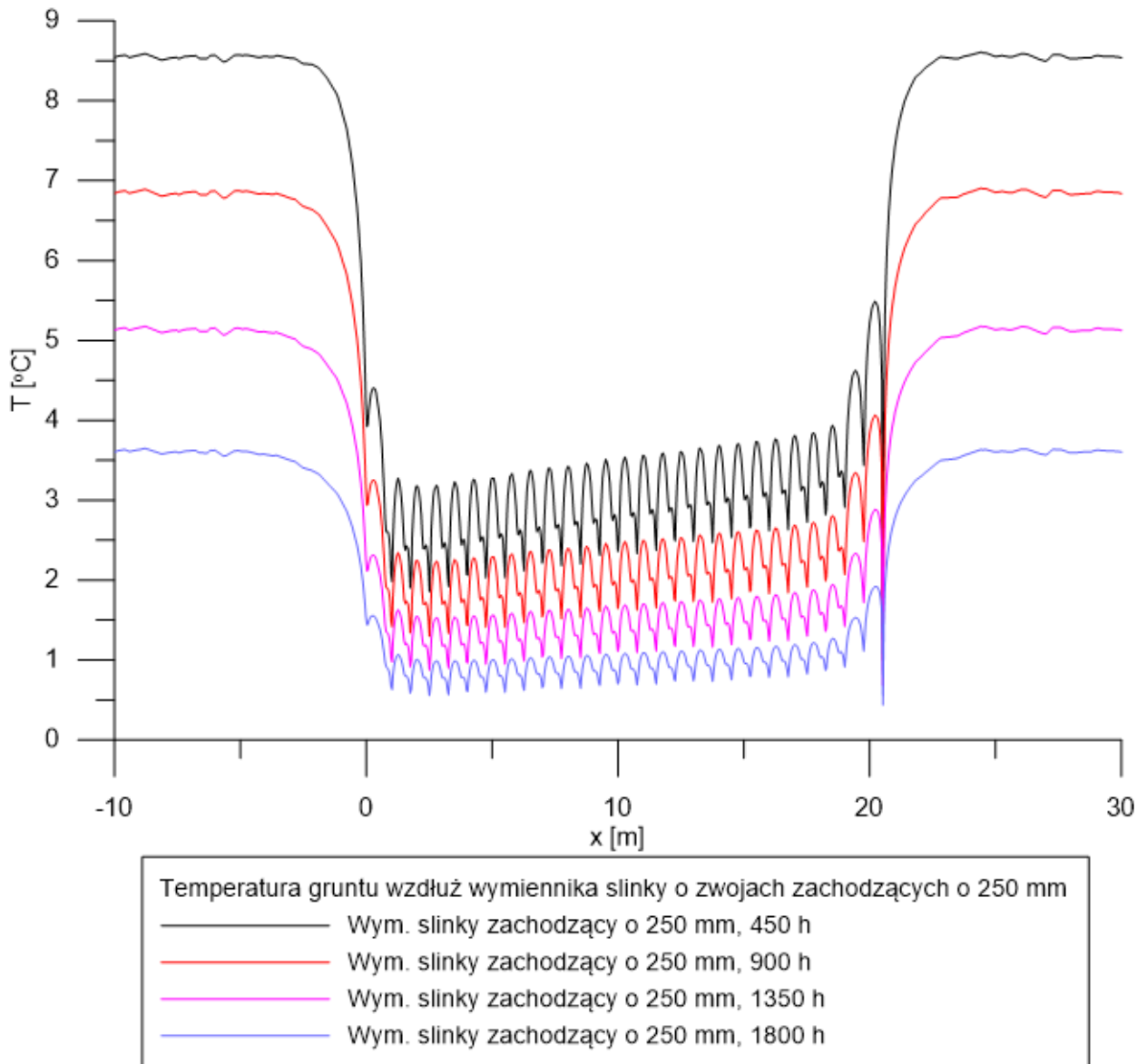
Analizując rozkłady temperatur uzyskane dla kolejnego wymiennika slinky tj. o zwojach ułożonych stycznie (rys. 95) można zaobserwować analogiczne tendencje jak dla wymiennika z zwojach rozłącznych. Różnice w kształcie pików temperaturowych wynikają z aranżacji zwojów we gruncie. Podobnie jak poprzednio dla 1800 h procesu można zaobserwować, iż wpływ wymiennika na temperaturę gruntu w poziomie sięga na odległość około 5 m. W miarę postępu procesu amplitudy temperatur poszczególnych pików zmniejszają się. Najmniejsze lokalne maksimum temperatury przypada na zwój 3 zaś minimum temperatury przypada na styku zwoju 2 i 3 oraz 3 i 4.



**Rys. 95. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky styczny dla 450, 900, 1350 i 1800 h**

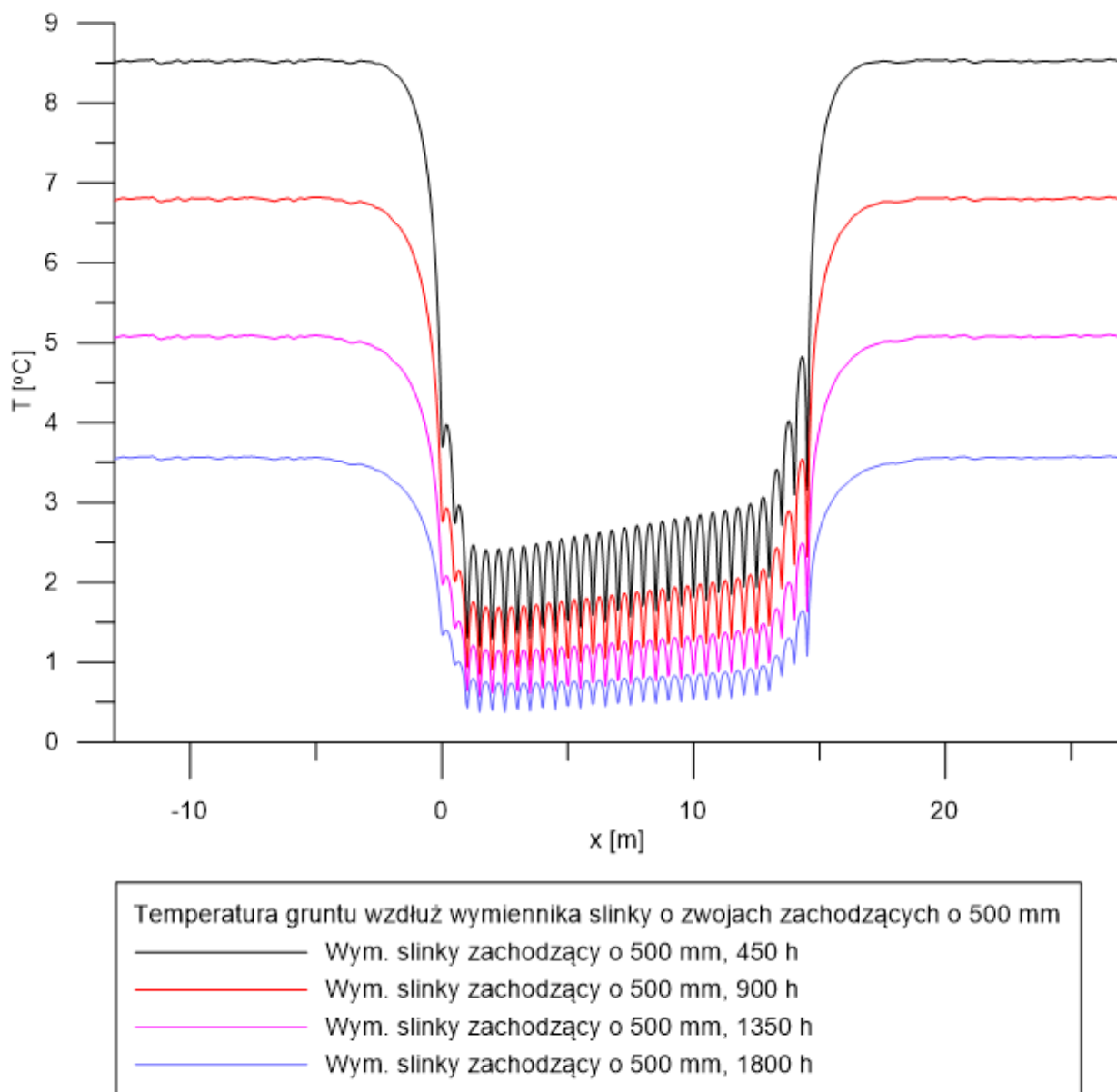
Rozkłady temperatur gruntu wzdłuż wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 250 mm przedstawiono na rys. 96 natomiast dla wymiennika o zwojach zachodzących na siebie o 500 mm na rys. 97.

Analizując rozkłady temperatur uzyskane dla tych wymienników można zaobserwować analogiczne tendencje jak dla poprzednio omawianych. Różnice w kształcie pików temperaturowych wynikają z aranżacji zwojów we gruncie.



Rys. 96. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky o zwojach zachodzących o 250 mm dla 450, 900, 1350 i 1800 h

Analizując zmiany temperatur w gruncie między zwojami należy zauważyć że zmiany te dla wymienników slinky są po ich długości w zasadzie liniowe a ich nachylenie wynika z konfiguracji w gruncie.

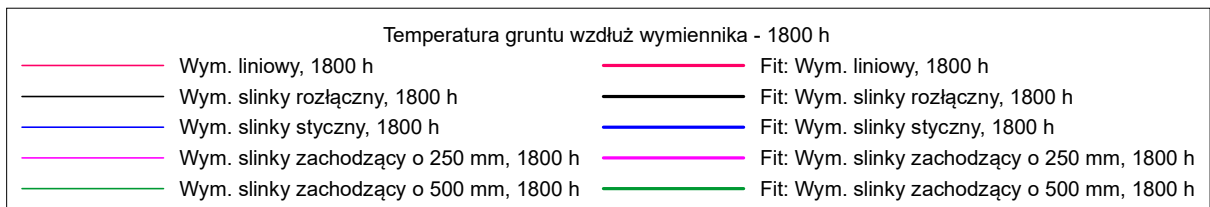
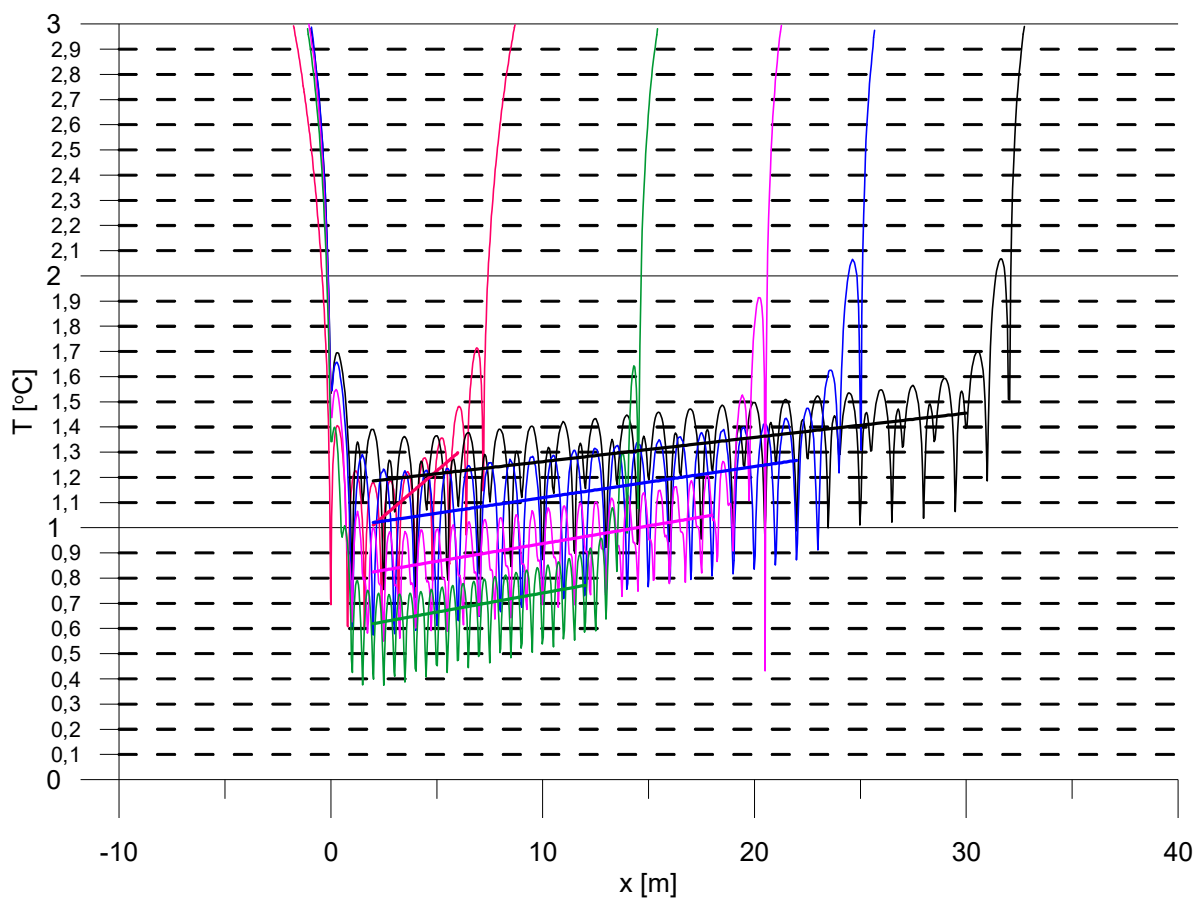


Rys. 97. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky o zwojach zachodzących o 500 mm dla 450, 900, 1350 i 1800 h

Rys. 98 ukazuje zbiorczo rozkłady temperatur w gruncie dla wszystkich badanych geometrii wymienników w 1800 h trwania procesu. W celu porównania temperatur w gruncie między wymiennikami w końcowym okresie symulacji wyznaczono średnie wartości temperatur z pominięciem skrajnych zwojów od odległości  $x = 2$  m.

Zauważono prawidłowość polegającą na tym, że wraz z postępowaniem procesu wychładzania gruntu, różnice temperatur pomiędzy zwojami zmniejszają się. Im mniejsza gęstość zabudowy wymiennika w gruncie tym bardziej równomiernie grunt jest wychładzany i tym słabiej jest eksploatowana cieplnie przestrzeń między rurami wymiennika. Wymienniki o małej gęstości zabudowy rur słabiej wychładzają grunt pomiędzy zwojami. W przypadku wymiennika

liniowego jest to związane także z jego odmienną aranżacją. Wymiennik ten jest wielokrotnie szerszy niż wymienniki slinky. Zatem porównanie gęstości zabudowy między nim a wymiennikami slinky może nie być miarodajne. Ponieważ dla wymienników slinky stosunek długości do szerokości jest kilkadziesiąt razy większy niż dla wymiennika liniowego front temperatury rozchodzący się wzdłuż linii pomiaru ma w ich przypadku nieznacznie mniejszy zasięg. Cechą charakterystyczną wyróżniającą wymiennik slinky o dużej gęstości zabudowy jest fakt iż wychładza on grunt najmocniej w pobliżu siebie. Jak można zauważyć, różnice w wychładzaniu gruntu oraz wysokości pików temperatur pomiędzy zwojami zmniejszają się. Oznacza to, że w miarę wychładzania gruntu coraz mniej ciepła dostarczonej jest do wymiennika.



**Rys. 98. Temperatura gruntu wzdłuż wymienników – liniowego, slinky o zwojach rozłącznych, stycznych zachodzących o 250mm i o 500 mm dla 1800 h**



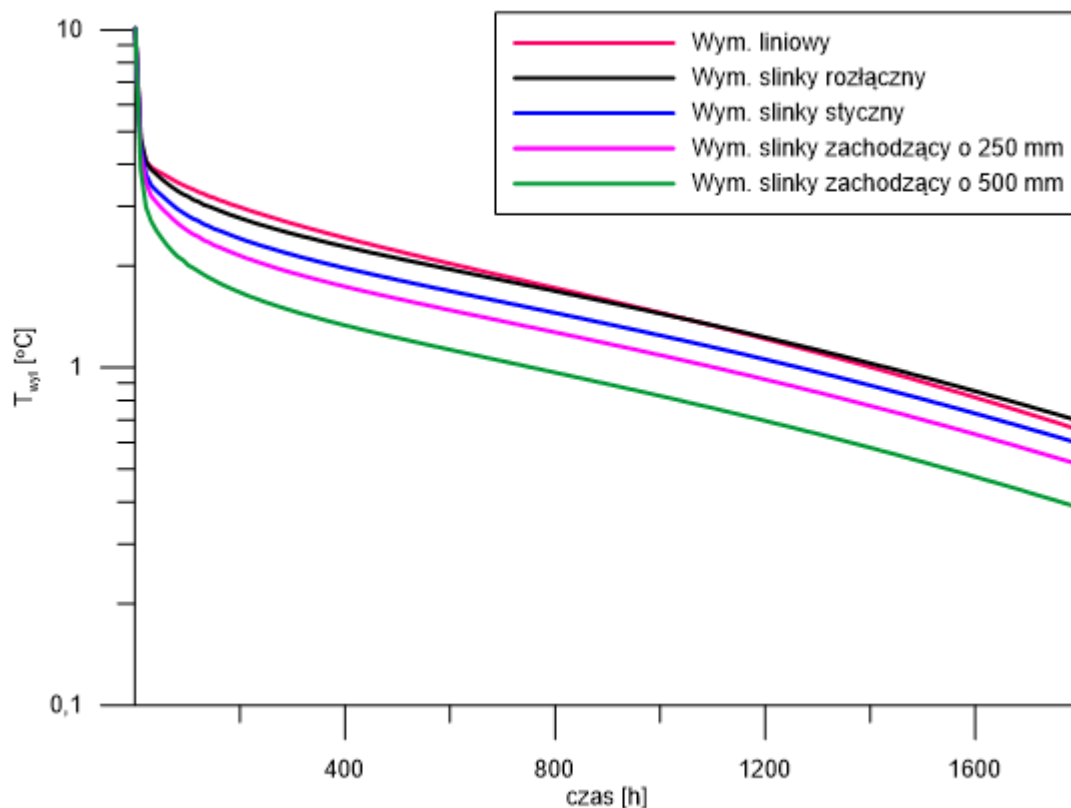
Niezależnie od konfiguracji wymiennika zaobserwowano, że minimalne temperatury w gruncie znajdują się w zakresie 1 – 3 metrów współrzędnej  $x$ . Oznacza to, że w przypadku nadmiernej eksploatacji wymiennika w tym obszarze grunt zacznie zamarzać najszybciej.

Wyznaczenie średnich temperatur pomiędzy zwojami umożliwia łatwiejsze porównanie stopnia wychłodzenia gruntu przez wymienniki. Wyznaczając średnie temperatury po długości wymienników pominięto zwoje skrajne. W ich otoczeniu temperatury w gruncie są wyższe niż dla reszty zwojów zatem nie istnieje zagrożenie przemrożenia gruntu. Najmniejsze średnie wychłodzenie gruntu w końcowym czasie symulacji zaobserwowano dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych. Wynosi ono  $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  dla zwojów początkowych i  $1,45\text{ }^{\circ}\text{C}$  dla końcowych. Minimalna temperatura przy rurce osiąga wartość  $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wraz ze zwiększeniem gęstości upakowania zwojów wymienniki slinky następuje mocniejsze wychłodzenie gruntu. Dla wymiennika o zwojach stycznych, w zakresie współrzędnej  $x = 2\text{ m}$  temperatura osiąga wartość około  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a w końcowym obszarze wymiennika  $1,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Minimalna zanotowana temperatura w bezpośrednim otoczeniu wymiennika to  $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wymiennik o zwojach zachodzących o  $250\text{ mm}$  dla  $x = 2\text{ m}$  wychładza grunt średnio do  $0,82\text{ }^{\circ}\text{C}$  a na końcu do  $1,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Minimalna zanotowana temperatura to  $0,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Najbardziej wychładza grunt wymiennik o zwojach zachodzących o  $500\text{ mm}$ . Dla  $x = 2\text{ m}$  średnia temperatura to  $0,62\text{ }^{\circ}\text{C}$  a dla zwojów końcowych to  $0,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Minimalna temperatura zarejestrowana bezpośrednio w otoczeniu wymiennika to  $0,37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dla wymiennika liniowego zanotowano minimalną średnią temperaturę  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a maksymalną  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Minimalna temperatura w bezpośrednim otoczeniu rurek zanotowana w gruncie to  $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dla wymiennika liniowego średnie wychłodzenie dla współrzędnej  $x = 2$  jest porównywalne z wymiennikiem slinky stycznym. Natomiast dla obszaru końcowego wymiennika, wartości temperatury gruntu zbliżają się do tych, które zaobserwowano dla wymiennika slinky rozłącznego.

#### **4.7.3. Temperatura wylotowa z wymienników**

Wykres, zamieszczony na rys. 99, ukazuje zmiany temperatur cieczy roboczej na wypływie z badanych wymienników podczas ich pracy. Oś pionowa wykresu została przedstawiona w skali logarytmicznej.



Rys. 99. Rozkład temperatur rejestrowanych na wylocie z analizowanych gruntowych wymienników ciepła

Ciągła eksploatacja gruntów przez wymienniki powoduje sukcesywne obniżanie się temperatury cieczy opuszczającej wymienniki. Wartość temperatury cieczy roboczej na początku procesu była taka sama dla wszystkich wymienników i wynosiła  $T = 10,1^{\circ}\text{C}$ . Końcowe wartości temperatur dla poszczególnych wymienników zamieszczono w tabeli 14.

Tabela 14. Temperatura wylotowa z wymienników w czasie 1800 godzin.

Wymiennik	Liniowy	Slinky rozłączny	Styczny	Zachodzący o 250 mm	Zachodzący o 500 mm
Temperatura wylotowa po 1800 h [°C]	0.65	0.69	0.59	0.51	0.38
Czas symulacji po którym temperatura wylotowa spadła poniżej 1 °C [h]	1400	1430	1260	1100	760

Podczas wykonywanych symulacji wyższe temperatury eksploatowanych gruntów zarejestrowane zostały dla wymienników o najmniejszej gęstości zabudowy tzn. dla wymiennika liniowego i wymiennika slinky o zwojach rozłącznych. Jednocześnie dla tych wymienników temperatury wylotowe cieczy roboczej są najbardziej zbliżone do siebie. Sytuacja taka występuje mimo faktu, iż wymiennik liniowy ma prawie trzykrotnie mniejszy współczynnik zabudowy niż

wymiennik slinky rozłączny. Dla pozostałych konfiguracji wymienników slinky, kształty wykresów są jakościowo podobne i w stosunku do wymiennika o zwojach rozłącznych przesunięte w dół w kierunku osi pionowej. W początkowym okresie eksploatacji temperatura cieczy roboczej opuszczającej wymiennik szybko spada. Spadek ten zachodzi najszybciej dla wymienników o większych współczynnikach zabudowy. Jest to związane z rozchodzeniem się ciepła w gruncie między rurami wewnątrz wymiennika.

Dla wymiennika liniowego, w początkowym okresie symulacji, temperatury na wylocie są nieznacznie wyższe niż dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych. Po około 1000 h następuje zamiana i temperatura wylotowa z wymiennika liniowego ma wartości niższe niż z wymiennika slinky o zwojach ułożonych rozłącznie. W miarę postępu symulacji temperatury cieczy opuszczającej wymienniki dążą do ustabilizowania się na podobnym lub identycznym poziomie. Należy zaznaczyć, że dla wymiennika slinky o zwojach zachodzących na siebie o 500 mm, temperatura wylotowa jest od początku wyraźnie niższa niż dla pozostałych i już dla czasu 100 godzin jest o około 2 °C niższa niż dla wymiennika liniowego. Dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych jest niższa względem liniowego o około 0,2 °C.

W tabeli 14 podano również czas symulacji po którym temperatura wylotowa z wymienników spadła poniżej 1 °C. W przypadku gdy temperatura wlotowa cieczy wynosi 0 °C spadek poniżej 1 °C oznacza drastycznie małą siłę napędową procesu. Tutaj również wyższa niż 1 °C różnica temperatur wylot – wlot utrzymuje się dla wymiennika liniowego (1400 h) oraz wymiennika slinky o zwojach rozłącznych (1430 h). Najszybszy spadek siły napędowej obserwuje się dla wymiennika slinky o zwojach zachodzących na siebie o 500 mm. Następuje on już po czasie 760 h. Taka konfiguracja wymiennika slinky jest pod tym względem wyraźnie najgorsza.

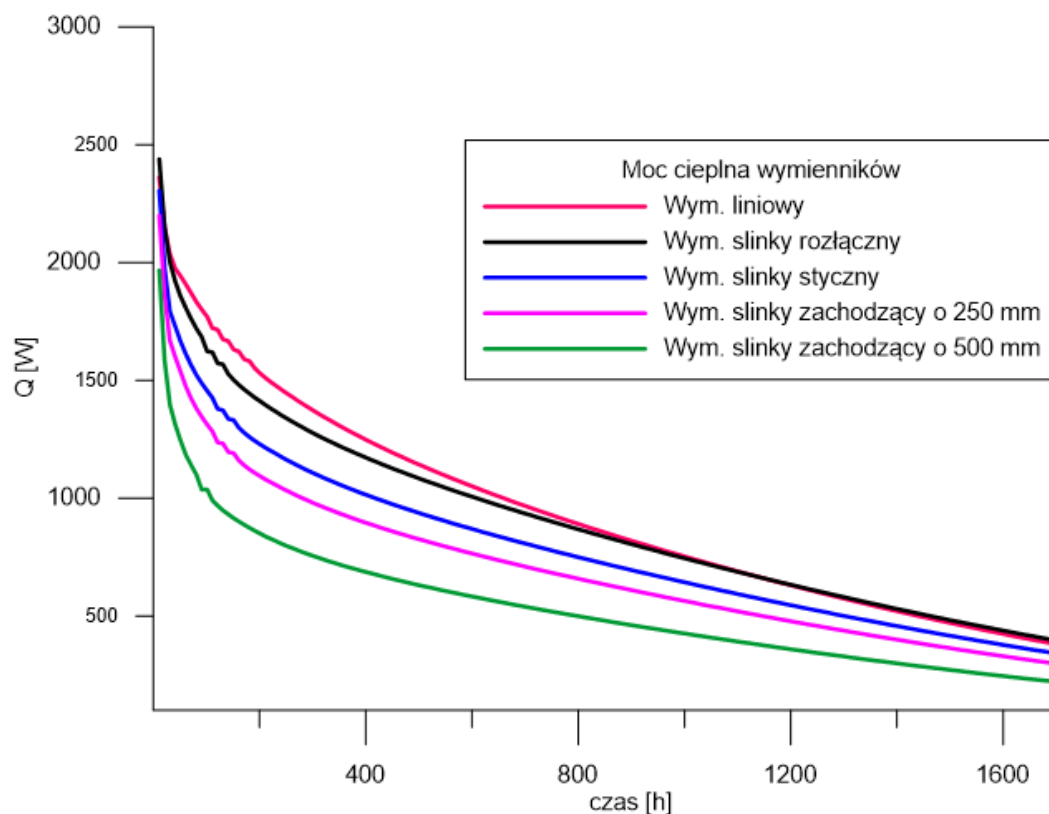
#### 4.7.4. Moce wymienników

Moc gruntowego wymiennika ciepła wynika bezpośrednio wzoru [11]. Zatem charakterystyki prezentujące wartości mocy cieplnych wymienników, zmieniające się w czasie ich eksploatacji (rys. 100) mają przebieg podobny jak charakterystyki temperatur wylotowych<sup>9</sup>.

Wszystkie analizowane wymienniki rozpoczynają swoją pracę z maksymalną wydajnością cieplną. W miarę postępowania eksploatacji gruntu wydajność ta spada. Zgodnie z oczekiwaniami, wymienniki o małej gęstości zabudowy, mają moce cieplne wyższe w porównaniu z tymi które cechują się większą gęstością zabudowy.

---

<sup>9</sup> Kształt wykresów na rys 100 w skali logarytmicznej jest identyczny jak kształty wykresów na rys. 99 co wynika bezpośrednio z wzoru [11]



Rys. 100. Moc cieplna badanych wymienników

W tabeli 15 zamieszczono zestawienie moce wymienników w początkowym i końcowym okresie symulacji. Po pierwszych 10 godzinach symulacji różnice w mocach analizowanych wymienników wynoszą kilkadziesiąt watów. Najniższą moc zaobserwowano dla wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 500 mm wynika to z najszybszej eksploatacji gruntu przez ten wymiennik.

Tabela 15. Moce wymienników w wybranych czasach procesu

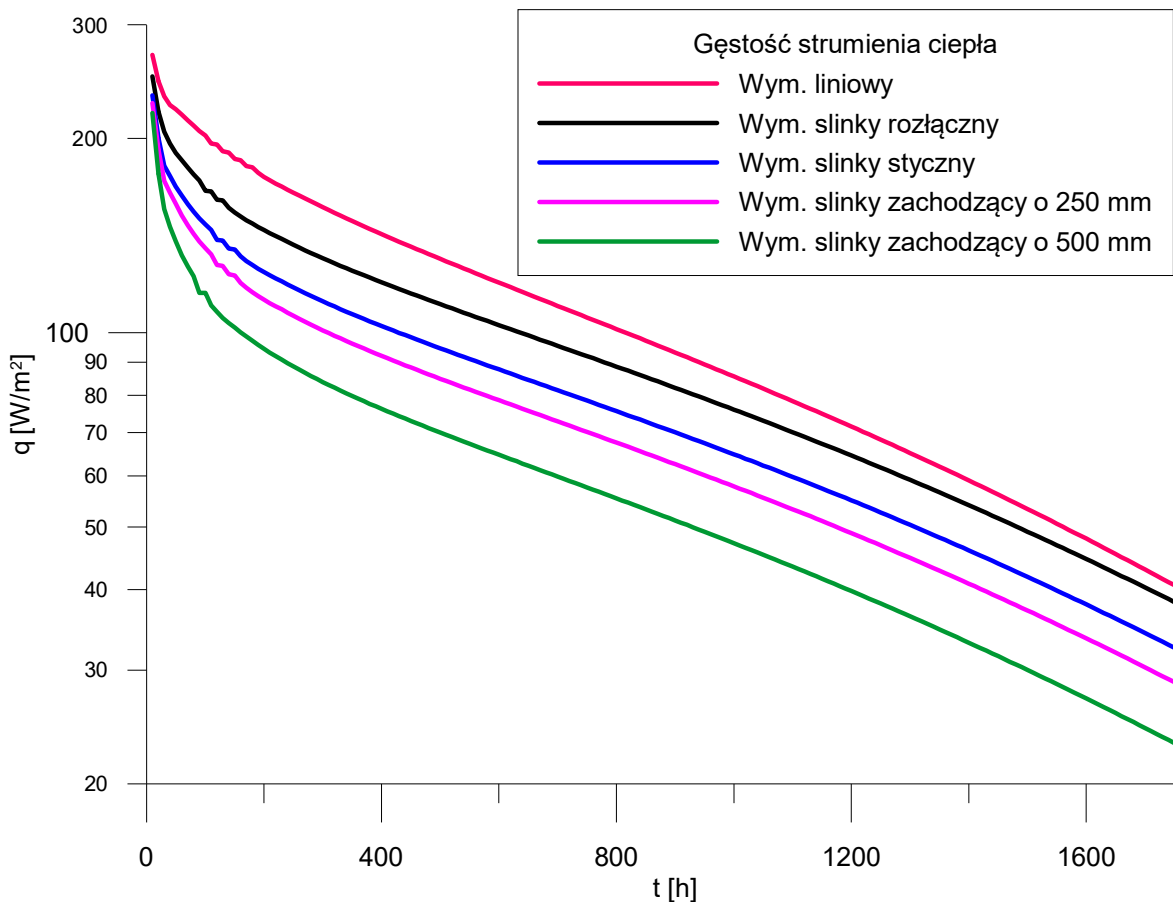
Wymiennik	Liniowy	Slinky rozłączny	Styczny	Zachodzący o 250 mm	Zachodzący o 500 mm
Moc wymienników po 10 godzinach [W]	2357.6	2437.2	2302.1	2195.4	1966
Moc wymienników po 1800 godzinach [W]	335.3	354.6	304.2	263.5	196.7

Końcowe moce badanych wymienników stanowią jedynie kilkanaście procent ich mocy początkowych co dowodzi, że wymienniki eksploatowane w sposób ciągły, niezależnie od konfiguracji, nie mogą tak pracować w praktyce. Najlepszymi parametrami mocy na początku i na końcu symulacji cechuje się wymiennik slinky o zwojach rozłącznych i w tym porównaniu wyprzedza on nieznacznie wymiennik liniowy. W poprzednim punkcie odnotowano ciekawe

zjawisko z porównaniem charakterystyk temperatur wylotowych wymiennika liniowego i wymiennika slinky o zwojach rozłącznych. Analogiczne zjawisko obserwuje się porównując charakterystyki mocy tych wymienników. .

#### 4.7.5. Moce wymienników odniesione do powierzchni wymiany ciepła z gruntem

Jednym z zaproponowanych kryteriów porównawczych było takie porównanie gruntowych wymienników ciepła w różnych konfiguracjach aby ich powierzchnie wymiany ciepła z gruntem były zbliżone. Z tego względu odniesiono moc wymienników do ich powierzchni wymiany ciepła z gruntem  $f'$ . Wyniki zamieszczono na rys. 101.



Rys. 101. Moc wymienników odniesiona do powierzchni wymiany ciepła

Spośród badanych wymienników, strumień ciepła odniesiony do powierzchni wymiany ciepła jest największy dla wymiennika liniowego. W miarę zwiększania się gęstości zabudowy gruntu, dla poszczególnych analizowanych konfiguracji wymienników, wartość tego parametru spada. W tabeli 16 zamieszczono wartości mocy wymiennika odniesionej do powierzchni wymiany ciepła dla początkowego (10 h) i końcowego (1800 h) okresu symulacji.

Zmniejszające się gęstości strumienia ciepła odniesione do powierzchni wymiany ciepła wynikają z wzajemnej konkurencji rur w poszczególnych konfiguracjach wymienników.

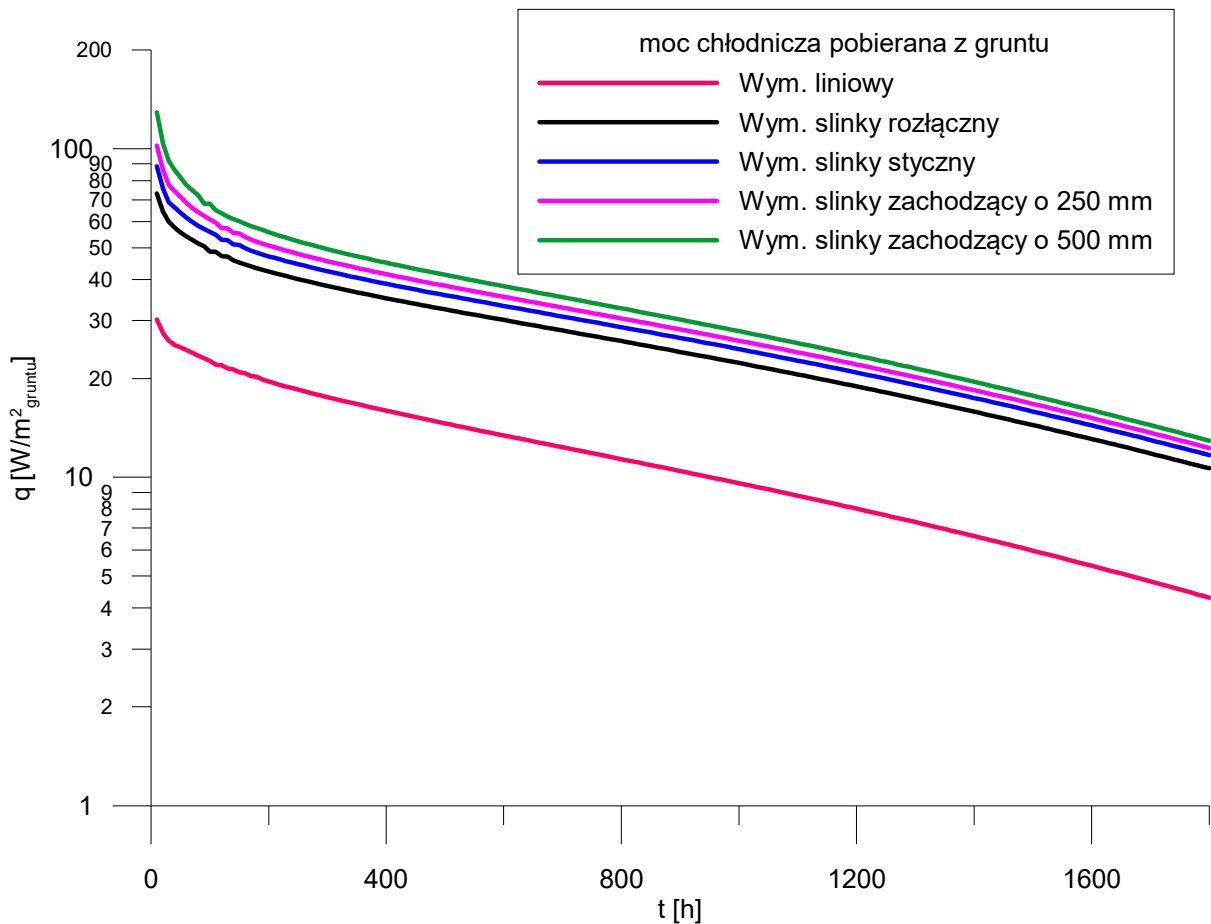
Największa konkurencja występuje w wymiennikach najgęściej upakowanych i dla nich strumień ciepła odniesiony do powierzchni wymiany ciepła jest najmniejszy.

**Tabela 16. Gęstości strumienia ciepła na powierzchni wymiany ciepła wymienników dla wybranych czasów**

Wymiennik	Liniowy	Slinky rozłączny	Styczny	Zachodzący o 250 mm	Zachodzący o 500 mm
Gęstość strumienia ciepła na powierzchni wymiany ciepła po 10 h [ $W/m^2$ ]	269.66	249.54	233.25	226.87	218.91
Gęstość strumienia ciepła na powierzchni wymiany ciepła po 1800 h [ $W/m^2$ ]	38.35	36.31	30.82	27.23	21.9

#### 4.7.6. Moc chłodnicza pobierana z gruntu

Kolejne wykresy (rys. 101) wykonano w celu porównania ilości ciepła jaką pobiera wymiennik z jednostkowej powierzchni zabudowy gruntu. Parametr ten określa mocą chłodniczą pobieraną z gruntu -  $q_h$ . Zgodnie z wzorem [20] moc chłodnicza pobierana przez wymiennik liniowy powinna wynosić około  $q_h = 15,62 \frac{W}{m^2}$ . Jest to średnia moc z jaką należy eksploatować grunt w sezonie aby nie doprowadzić do nadmiernego spadku wydajności spowodowanego wychłodzeniem gruntu. W normalnym użytkowaniu wymiennika eksploatacja nie odbywa się w sposób ciągły lecz w systemie praca – przerwa. Zatem chwilowa eksploatacja gruntu odbywa się z większymi wydajnościami niż założona wartość. Na rys. 101 sytuacji tej odpowiada początkowy okres symulacji.



Rys. 102. Moc cieplna wymienników odniesiona do powierzchni zabudowy wymiennika w gruncie

Z rys. 102 wynika iż eksploatując grunt wymiennikami slinky uzyskuje się zdecydowanie większe wartości ciepła z jednostkowej powierzchni gruntu niż dla wymiennika liniowego. Największa ilość ciepła pozyskiwana jest przez wymiennik o zwojach zachodzących o 500 mm początkowo wartości te są ponad 4 razy większe względem wymiennika liniowego i największe spośród wszystkich wymienników slinky. W tabeli 17 zamieszczono wartości mocy chłodniczej dla początkowego i końcowego czasu trwania symulacji dla wszystkich analizowanych wymienników ciepła. Wartości mocy chłodniczej pobieranej z gruntu w czasie trwania procesu dla wymienników slinky zawierają się w przedziale od 73 – 130 W a różnice poszczególnymi konfiguracjami są niewielkie i wynoszą od kilku do kilkunastu  $W/m^2$ . W końcowym okresie symulacji różnice mocy chłodniczej maleją.

**Tabela 17. Moc chłodnicza pobierana z gruntu**

Wymiennik	Liniowy	Slinky rozłączny	Styczny	Zachodzący o 250 mm	Zachodzący o 500 mm
Moc chłodnicza pobierana z gruntu po 10 h [W/m <sup>2</sup> ]	30.25	73.17	88.44	102.35	129.26
Moc chłodnicza pobierana z gruntu po 1800 h [W/m <sup>2</sup> ]	4.30	10.65	11.69	12.29	12.93

Wyrównanie się mocy chłodniczych pod koniec procesu świadczy o wyeksploatowaniu cieplnym gruntu. Wtedy wpływ gęstości zabudowy dla wymienników slinky jest znikomy lub pomijalny.

Duża dysproporcja pomiędzy mocą chłodniczą pobieraną z gruntu przypadającą na jednostkę jego powierzchni przez wymiennik liniowy w porównaniu z wymiennikami slinky wynika ze znacznej różnicy powierzchni zabudowy gruntu pomiędzy tymi wymiennikami.

#### **4.7.7. Energia i parametry średnie**

Kolejnym analizowanym parametrem była całkowita ilość energii cieplnej wymienionej z gruntem podczas symulacji oraz średnie parametry mocy wymienników odniesionych do powierzchni zabudowy w gruncie, powierzchni wymiany ciepła oraz długości rur, zaś w przypadku wymienników slinky także długości pętli oraz powierzchni wymiany ciepła pętli. Wartości tych parametrów zamieszczono w tabeli 18.



Tabela 18. Ciepło uzyskane z wymienników liniowego i slinky o różnych konfiguracjach – modelowanie CFD

opis	symbol	jednostka	Liniowy	Slinky rozłączny	Slinky styczny	Slinky zachodzący o 250 mm	Slinky zachodzący o 500 mm
Całkowita ilość ciepła uzyskanego przez 1800 h dla modelowanego fragmentu	$E_g$	$\frac{kWh}{1800h}$	1617,41	1567,72	1360,71	1202,08	925,5
Całkowita ilość ciepła dla całego wymiennika	$E_{gc}$	$\frac{kWh}{1800h}$	4852.24	4703.17	4082.13	3606.24	2776.51
Ilość ciepła odniesiona do wymiennika liniowego		%	100	96,93	84,13	74,32	57,22
Średnia moc chłodnicza pobrana z gruntu	$\bar{q}_h$	$\frac{W}{m^2_{gruntu}}$	11.62	26.37	29.31	31.45	34.19
Średnia moc chłodnicza pobrana z gruntu odniesiona do wymiennika liniowego		%	100	226,93	252,24	270,65	294,23
Średnia gęstość strumienia ciepła na m <sup>2</sup> powierzchni wymiany ciepła	$\bar{q}$	$\frac{W}{m^2}$	185	153.16	137.86	124.21	103.05
Średnia gęstość strumienia ciepła na m <sup>2</sup> powierzchni wymiany ciepła zwojów	$\bar{q}$	$\frac{W}{m^2}$	185 <sup>10</sup>	205.17	173.92	150.69	119.37
Ilość ciepła na m <sup>2</sup> gruntu na rok	$E_h$	$\frac{kWh}{m^2 \cdot 1800h}$	19.66	49.77	55.54	60.1	66.11
Ilość ciepła na m <sup>2</sup> gruntu na rok odniesiona do wymiennika liniowego		%	100	253,6	282.5	305,7	336,3
Średnia gęstość strumienia ciepła na mb rury wymiennika	$\bar{q}_i$	$\frac{W}{m}$	8.072	6.683	6.015	5.420	4.496
Średnia gęstość strumienia ciepła na mb rury wymiennika odniesiona do liniowego		%	100	82,8	74,52	67,14	55,7
Średnia gęstość strumienia ciepła na mb rury spiral	$\bar{q}_i$	$\frac{W}{m}$	8.072 <sup>11</sup>	8.952	7.588	6.575	5.208

<sup>10</sup> Przyjęto, że ponieważ wymiennik liniowy nie ma zwojów i fragmentu rury powrotnej tak jak wymienniki slinky to długość spiral wymiennika liniowego będzie całkowitą długością wymiennika.

<sup>11</sup> Analogicznie jak w przypisie 10.

Ilość ciepła uzyskanego z gruntu obliczono jako pole pod stosownym wykresem (rys. 100). Jako 100% przyjęto tę ilość ciepła jaką pobrał z gruntu wymiennik liniowy. Pracując w tych samych warunkach eksploatacji wymiennik ciepła o zwojach rozłącznych pobrał z gruntu o 3,07 % ciepła mniej niż liniowy, zaś wymienniki slinky styczny, zachodzący o 250 mm i o 500 mm pobrały z gruntu odpowiednio o 15,87 %, 25,68 % i 42,78 % ciepła mniej niż wymiennik liniowy. Całkowita średnia moc chłodnicza pobierana z gruntu względem wymiennika liniowego była większa dla wymiennika ciepła slinky o zwojach rozłącznych o 226,93 % a dla wymienników slinky stycznego, zachodzącego o 250 mm i o 500 mm odpowiednio o 252,24 %, 270,65 % i 294,23 %.

Podczas całego okresu 1800 godzin symulacji wymiennik liniowy pobrał z jednostkowej powierzchni gruntu 19,66 kWh energii z kolei dla wymienników slinky wartości te były znacznie wyższe i wynosiły 253,6 % dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych, 282,5 % stycznych, 305,7 % o zwojach zachodzących o 250 mm i 336,3 %.

Średnia ilość ciepła pobierana z jednostkowej powierzchni wymiany ciepła wymienników jest procentowo taka sama jak średnia ilość ciepła pobierana z metra bieżącego rur wymiennika. Wymiennik liniowy wymieniał średnio 8.072 W/m zaś wymienniki slinky wymieniały średnio 6,683 W/m slinky rozłączny, 6,015 W/m - slinky styczny, 5,42 W/m slinky zachodzący o 250 mm i 4,496 W/m - slinky zachodzący o 500 mm.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Badania gruntowych wymienników ciepła, w tym również wymienników typu slinky prowadzone przez różnych badaczy na przestrzeni lat ostatnich lat nie doprowadziły do poznania wszystkich istotnych zależności występujących podczas ich pracy. Nie ujawniły także wszystkich istotnych cech które te wymienniki posiadają. Ukazanie jakościowych i ilościowych aspektów pracy analizowanych wymienników powinno umożliwić sformułowanie metody doboru tych wymienników i kierunki ich dalszych badań.

Systematyczne analityczne badanie gruntowych wymienników ciepła w pełnej skali możliwe jest jedynie metodami modelowania CFD. Jednak w przeciwieństwie do dotychczas opublikowanych wyników symulacje te powinny być prowadzone bez zbędnych założeń upraszczających typu: stałej temperatury rury wymiennika, stałej temperatury gruntu, stałej temperatury powierzchni gruntu, modelowania fragmentów wymienników i innych. Poza metodami CFD możliwe są oczywiście badania terenowe jednak wymagają one wielu nakładów, sił i środków.

W praktyce dobór wymienników gruntowych slinky metodami CFD można wykonywać poprzez sformułowanie dla konkretnego przypadku terenowego modelu wymiennika w pełnej skali i badania jego pracy dla określonych warunków klimatycznych biorąc pod uwagę konkretne parametry meteorologiczne. Taki dobór jest możliwy gdyż ilość wymaganych istotnych danych wstępnych jest niewielka. Projektant musi znać zapotrzebowanie systemu na energię, maksymalną moc grzewczą, parametry cieplne gruntu, parametry klimatyczne, graniczne temperatury medium w wymienniku i w gruncie, wymagany przepływ medium itp. Jednakże tworzenie takich modeli jest bardzo czasochłonne niepraktyczne i drogie.

Wydaje się, że najlepszą i najbardziej przystępną metodą praktycznego doboru wymienników slinky jest sformułowanie wytycznych projektowych w oparciu o wykonaną analizę metodami analitycznymi lub CFD dla wymienników wzorcowych. Takie wytyczne byłyby swoistą mapą po której mógłby poruszać się wykonawca wyznaczając takie parametry ruchowe jak zapotrzebowanie na energię, warunki klimatyczne, konfiguracja wymiennika, parametry cieplne gruntu, moc maksymalna i inne. Jednocześnie metoda doboru powinna uwzględniać obszary zakazane np. graniczne temperatury w gruncie, nadmierny jednostkowy strumień ciepła pobieranego z jednostkowej powierzchni zabudowy gruntu lub inne.

Niezależnie od metod badania i/lub doboru wymienników muszą być one zweryfikowane doświadczalnie w celu określenia poprawności sformułowanych wytycznych. W przedstawionej pracy w oparciu o dane doświadczalne uzyskane na drodze eksperymentu terenowego dla jednej

pętli wymiennika slinky zweryfikowano poprawność modelu RSM oraz adekwatność wyników symulacji metodą CFD.

Następnie, wykorzystano modelowanie CFD do porównania właściwości czterech wymienników slinky w różnych konfiguracjach z liniowym wymiennikiem przyjętym jako wzorcowy. Badania dokonano dla aparatów o takich samych powierzchniach wymiany ciepła z gruntem. Wymienniki modelowane były w pełnej skali.

Uzyskane wyniki symulacji CFD wykazały że wymienniki o podobnej powierzchni wymiany ciepła z gruntem w różnych konfiguracjach mają różne parametry pracy i dodatkowo że parametry te są zmienne w czasie. Obserwacja ta dotyczy zarówno rozkładów temperatur w gruncie, rozkładów temperatur wylotowych oraz mocy grzewczych i chłodniczych badanych wymienników. Także całkowita ilość energii pobranej z gruntu jest różna dla każdego badanego aparatu.

Analiza CFD umożliwiła wykazanie szeregu cech ilościowych i jakościowych pracy wymienników slinky. Ukazano podobieństwa i różnice względem wzorcowego wymiennika liniowego. Określono także skrajne cechy analizowanych wymienników. Na podstawie przeprowadzonych badań opisano ich zalety i wady w porównaniu z wymiennikiem liniowym.

Mapy rozkładów temperatur w gruncie w różnych płaszczyznach przedstawiono w rozdziale 4.7.1. Opisano tam szczegółowo uzyskane wyniki jakościowe dotyczące wyznaczonych temperatur gruntu. Uzyskane wyniki wykazały, że wymienniki slinky oraz wymiennik liniowy wychładzają grunt nierównomiernie zarówno w głąb jak i po szerokości i długości wymiennika oraz, że istnieją zasadnicze różnice w rozkładach temperatur pomiędzy wymiennikiem liniowym i wymiennikami slinky. Maksymalny wpływ pracujących wymienników na otaczający grunt nie wynosi więcej niż około 5 m w kierunku poziomym, z kolei w kierunku pionowym wymienniki wpływają na grunt maksymalnie 8 m w głąb.

W rozdziale 4.7.2. przedstawiono i omówiono szczegółowo wpływ pracy wymienników na rozkład temperatur wzdłuż wymienników w ich osi symetrii. Analiza ta wykazała, że niezależnie od tego czy mamy do czynienia z wymiennikiem liniowym czy wymiennikami slinky istnieje „krytyczne miejsce” w którym wymiennik najbardziej wychładza grunt. Jest to przestrzeń na głębokości posadowienia wymiennika w okolicach 2 i 3 pętli/zwoju, co obrazują rys. 93 – 98. Istnienie takiego minimum temperatury w gruncie jest spowodowane faktem, że w początkowej części wymiennika temperatura cieczy cyrkulującej jest najniższa natomiast kolejne zwoje tj. 2 i 3 konkurują o energię z pierwszym zwojem skrajnym i zwojami następnymi. Wykrycie takiego punktu było możliwe dzięki braku uproszczenia w postaci stałej temperatury ścianki rury i zastosowaniu modelu przepływu turbulentnego w analizie. Brak powyższych założeń

upraszczających umożliwiło poznanie rozkładu temperatur w gruncie po długości wymiennika.. Zaskakujące okazało się, że wymiennik liniowy wychładzał grunt w swojej osi mocniej niż wymiennik slinky o zwojach rozłącznych. Dotyczy to zarówno początku jak i końca geometrii wymiennika. Stopień wychodzenia dla wymiennika liniowego był porównywalny z zaobserwowanym dla wymiennika o zwojach stycznych. Okazuje się zatem że dla porównywalnych parametrów pracy wymiennika liniowego i slinky o zwojach rozłącznych wymiennik slinky słabiej wychładza grunt w swoim bezpośrednim otoczeniu niż wymiennik liniowy (rys. 98). Ogólna tendencja zaobserwowana podczas badań może być określona stwierdzeniem, że im większa gęstość zabudowy wymiennika w gruncie tym bardziej wychłodzony jest grunt w jego bezpośrednim otoczeniu. Stwierdzenie takie jest ważne ze względów instalatorskich gdyż obserwowana jest tendencja do gęstej zabudowy gruntu przez rury wymiennika.

Analiza wykresów obrazujących zmiany temperatur wylotowych (rys. 99) oraz mocy wymienników (rys. 100) w czasie w powiązaniu z czasową analizą map temperatur w gruncie stanowią przesłankę do określenia różnic w eksploataowaniu gruntu przez wymienniki slinky w porównaniu z wymiennikiem liniowym.

Mając na uwadze, że obserwowane różnice w przebiegu tych wykresów dla różnych wymienników slinky wynikają zastosowanego rozstawu pętli oraz biorąc pod uwagę fakt, że warunki symulacji oraz powierzchnie wymiany ciepła z gruntem wymienników były takie same i nasuwa się wniosek, że różnice jakościowe pomiędzy wymiennikiem liniowym a wymiennikami slinky wynikają m. in. z różnicy pomiędzy stosunkiem długościami i szerokości badanych wymienników. Wymiennik liniowy jest zabudowany w gruncie na planie prostokąta o zbliżonych wymiarach czyli stosunek długości do szerokości zabudowy jest bliski jedności, natomiast wymienniki slinky są zabudowane na planie prostokątów o dużej dysproporcji wymiarów. Dla nich stosunek długości do szerokości wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu.

Kształty wykresów temperatury wylotowej z wymienników (rys. 99) oraz mocy cieplnej badanych wymienników (rys. 100), sugerują że jakościowy charakter wymiany ciepła z gruntem przez wymienniki slinky jest podobny i zależy od wartości współczynnika zabudowy  $a_p$ . Jednocześnie kształt wykresu dla wymiennika liniowego którego geometria jest odmienna od wymienników slinky, a także fakt że po czasie 1050 godzin symulacji wymiennik slinky o zwojach rozłącznych osiąga wyższe parametry temperatury wylotowej niż wymiennik liniowy wskazuje że odmienna geometria wymiennika liniowego zmienia charakter wymiany ciepła z gruntem. Wcześniej zanotowano ten fakt przy okazji analizy temperatur w gruncie po długości wymienników (rys. 98).

Porównując pracę wymiennika liniowego i slinky o zwojach rozłącznych w dłuższym okresie symulacji można stwierdzić, że wymiennik ciepła slinky rozłączny ma większą wydajność cieplną niż liniowy i jest ona największą ze wszystkich badanych wymienników. Natomiast w krótkim okresie symulacji większą wydajnością cechuje się wymiennik liniowy w porównaniu z wymiennikami slinky o zwojach rozłącznych. Aby ocenić to zjawisko zestawiono uzyskane wyniki z mapami temperatur w gruncie wokół wymienników (rys. 69 – 72, 81, 82, 84, 85, 87, 88, 90, 91) z rozkładami temperatur wzdłuż osi wymienników oraz rozkładami temperatur wylotowych (rys. 98, 99). Okazuje się, że wprawdzie wymienniki slinky bardziej wychładzają grunt w swoim bezpośrednim otoczeniu w porównaniu z wymiennikiem liniowym to jednak objętość gruntu niezakłóconego ich działaniem jest zdecydowanie większa. Właśnie z tego powodu, w długich czasach pracy wymienników zaobserwowano opisane wyżej zjawisko. Wynika ono z faktu, iż ciepło z otaczającego gruntu dociera do wymiennika slinky intensywniej niż do wymiennika liniowego. Dodatkowo także wpływa na zjawisko opisane wyżej „ilość gruntu pomiędzy rurami wymienników”. Dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych jest ona dużo mniejsza niż dla wymiennika liniowego. Wymienniki slinky zajmują dużo mniejszą objętość w gruncie niż wymiennik liniowy. Zatem nitka wymiennika slinky nie ma w swoim otoczeniu sąsiadów z którymi mogłaby konkurować o energię. Wymiennik liniowy natomiast może z racji swojej konstrukcji być traktowany jako szereg wymienników liniowych połączonych szeregowo i konkurujących ze sobą.

Różnice w wydajnościach cieplnych między samymi wymiennikami slinky wynikają z rozstawu ich pętli. Wymienniki slinky o zwojach ułożonych gęściej mają niższe parametry pracy, głównie uzyskiwane moce grzejne. Następuje także większe wychłodzenie gruntu w bezpośrednim ich otoczeniu. Może to stanowić przesłankę co do ewentualnej możliwości regeneracji gruntu wokół wymiennika slinky.

W miarę jak wymienniki eksploatują grunt, wartości gęstości strumieni ciepła zmniejszają się i ich wartości zbliżają się do siebie. Należy sądzić, iż w długiej skali czasu pracy osiągnęły by one swoisty stan ustalony. Można sądzić także iż w długiej skali czasu każdy wymiennik byłby punktowym lub liniowym ujemnym źródłem ciepła.

Analizując wykresy mocy cieplnej odniesionej do powierzchni wymiany ciepła z gruntem (rys. 101) oraz mocy chłodniczej pobieranej z gruntu (rys. 102), można zauważyć że w przeciwieństwie do wykresów zaprezentowanych na rys. 99 i 100 nie następuje przecięcie wykresu dla wymiennika liniowego z wykresem dla wymiennika slinky o zwojach rozłącznych. Wykresy te dobitnie ukazują odmienny charakter pracy wymiennika liniowego względem wymienników slinky. Wynika z nich, że wprawdzie dla podobnej powierzchni wymiany ciepła

wymienniki o gęstszej zabudowie mają mniejszą wydajność na jednostkę powierzchni wymiany ciepła to jednak, jeżeli uzysk ciepła jest odniesiony do powierzchni zabudowy gruntu wymienniki o największej powierzchni zabudowy eksploatują grunt najslabiej. Potwierdzają to wykresy i mapy temperatur obrazujące rozkład temperatury gruntu uzyskany na linii umieszczonej wzdłuż wymienników. Widać na nich, iż dla wymienników o większej gęstości zabudowy stopień wychłodzenia gruntu między zwojami był większy.

Wyłaszczenie się wykresu się mocy chłodniczych w czasie pod koniec procesu świadczy o wyeksploatowaniu ciepłym gruntu. W takim przypadku wpływ gęstości zabudowy dla wymienników slinky jest znikomy lub pomijalny.

Jednocześnie nasuwa się wniosek, że ewentualne projektowanie i wykonanie wymienników slinky w oparciu o metody doboru wymienników liniowych z uwzględnionymi poprawkami może nie być poprawne.

Analiza przeprowadzona w tej pracy wykazała jednoznacznie że nie można prowadzić eksploatacji gruntowego wymiennika w sposób ciągły. Niezależnie od konfiguracji spadek mocy dla pracy ciągłej na przestrzeni 1800 godzin jest znaczny. Dodatkowo ilość energii pobranej podczas całego okresu jest różna dla każdego z typu wymienników. Zatem dobór wymiennika poprzez modelowanie CFD należy wykonywać analizując pracę co najmniej jednej sekcji przynajmniej w jednym sezonie grzewczym dla pracy przerywanej z zachowaniem maksymalnego czasu pracy wymiennika np. 1800 godzin w roku.

W przypadku wymiennika liniowego dobranego metodą VDI całkowita ilość energii pobranej z gruntu jest niższa niż wymagana dla całego sezonu. Jednocześnie maksymalny czas działania sprężarki dla wybranego trybu pracy nie może przekraczać 1800 h. Oznacza to że konieczne jest odejście od analizy wymienników gruntowych w dla krótkich czasów trwania procesu ze względu na sezonowość procesu eksploatacji. Należy odejść od długich czasów symulacji w sposób ciągły ze względu na niepraktyczne wyniki takiej analizy o ile celem badań nie jest badanie różnic między samymi wymiennikami a analiza symulacji instalacji w sezonie grzewczym. Wymiennik gruntowy jak i cały układ grzewczy jest przewidziany do pracy przerywanej która jest wymagana do ogrzewania budynku w całym sezonie zimowym. Praca taka jest ważna także ze względu na wymóg okresów regeneracji ciepłej gruntu w czasach postoju sprężarki pomiędzy okresami pracy.

Badania przedstawiona w tej pracy wykazały że eksploatacja wymienników w sposób ciągły umożliwia wykrycie ich granicznych parametrów pracy. W praktyce stan taki występuje przy nadmiernym, nienormatywnym obciążeniu wymiennika lub przy jego złym doborze.

W pracy (42) autorzy badali gruntowe wymienniki ciepła typu slinky stosując szereg uproszczeń. Po 60 dniach symulacji pracy ciągłej tj. 1440 godzinach wymienniki osiągnęły stan ustalony. W niniejszej pracy po 1800 godzinach pracy ciągłej wymienniki niezależnie od konfiguracji nie osiągnęły stanu ustalonego co wskazuje na to że metodyka badania wymienników w długiej skali z szeregiem uproszczeń i dla fragmentu badanej geometrii może być błędna. Jednocześnie autorzy wykazali że praca wymiennika w sposób ciągły i w sposób przerywany (intermitentny) wpływa na różnice w wydajności takiego wymiennika, gdzie dla 12 godzinowego czasu postoju i 12 godzinowego czasu pracy w całkowitym okresie 60 dni, wydajność wymiennika wzrosła o 58,5 % względem pracy tego samego wymiennika w sposób ciągły przez 60 dni. To znaczy że dla 50 % mniejszego czasu pracy sprężarki wydajność układu jest większa niż 50 %. Koresponduje to z dyskusją wyników przeprowadzoną w tym rozdziale i jest to kolejna przesłanka do odejścia od symulacji ciągłej. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wymiennik slinky o zwojach rozłącznych ma bardzo zbliżone parametry pracy jak wymiennik liniowy natomiast wychładzanie gruntu przez niego jest mniejsze niż przez wymiennik liniowy. Ogólnie dla wymienników slinky wielokrotnie mniejsza powierzchnia zabudowy w gruncie nie skutkuje proporcjonalnym spadkiem wydajności. W przypadku wymienników slinky gęstość strumienia ciepła pozyskiwana w czasie pracy wielokrotnie przekracza wymaganą dla wymiennika liniowego i nie może być takim samym kryterium doboru. Oznacza to, że należy określić inne parametry krytyczne niż dla wymienników liniowych – głównie jednostkową wydajność cieplną gruntu. Oznacza to także że nie można stosować tych samych metod doboru wymiennika liniowego VDI do doboru wymienników typu slinky. Wymienniki slinky źródłem liniowym a płaski punktowym lub płyty.

Podjmując wątek stworzenia wytycznych doboru wymienników ciepła typu slinky w opinii autora wykonane badania są jeszcze niewystarczające. Można zaproponować sposób polegający na tym, aby dobierać je metodą PORT PC tak jak dla wymiennika liniowego tak, aby obliczona długość wymiennika/powierzchnia wymiany ciepła dla poszczególnych rodzajów wymienników slinky była procentowo większa o deficyt energii zaprezentowany w tab. 18<sup>12</sup>.

**Tabela 19. Proponowane do weryfikacji procentowe zwiększenie długości rur/powierzchni wymiany ciepła dla wymienników slinky względem wymiennika liniowego dobieranego metodą PORT PC**

opis	jednostka	Liniowy	Slinky rozłączny	Slinky styczny	Slinky zachodzący o 250 mm	Slinky zachodzący o 500 mm
Zwiększenie długości obliczeniowej/powierzchni wymiany ciepła z gruntem dla wymienników sklinky	%	0	3,07	15,87	25,68	42,78

<sup>12</sup> Tabela 18, wiersz 1, 2 i 3.



Należy jednak to zweryfikować najpierw poprzez wykonanie odpowiednich modeli CFD i przeprowadzenie symulacji w taki sam sposób jak zaprezentowano w tej pracy a następnie, po uwzględnieniu wszystkich wniosków z tego opracowania, poprzez symulację pracy takich wymienników w sposób przerywany dla całego sezonu grzewczego.

Podsumowując zawarte w rozprawie rozważania można na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i analiz formułować następujące wnioski:

- strumień ciepła wymieniany z gruntem w pętli wymiennika slinky spada w momencie gdy front temperatury dochodzi do osi pętli wymiennika slinky,
- model pierścieniowego źródła ciepła RSM z zadawalającą dokładnością przewiduje rozkłady temperatur wokół pierścieniowego źródła ciepła,
- zastosowanie procedury minimalizacyjnej funkcji celu pozwala wykorzystywać model RSM do wyznaczania parametrów cieplnych gruntu,
- stosując metody CFD można w realny sposób oddać warunki pracy gruntowego wymiennika ciepła oraz uzyskać wiarygodne wyniki symulacji w całym okresie eksploatacji,
- przy użyciu obliczeń CFD można wyznaczyć wartości temperatur w dowolnym miejscu geometrii gruntu co może znaleźć zastosowanie przy analizie warunków eksploatacji wymiennika w niekorzystnych warunkach oraz sytuacjach ekstremalnych i awaryjnych, oraz w czynnościach projektowych,
- wyniki symulacji CFD umożliwiają wyznaczenie zmian mocy cieplnej dostarczanej lub pobieranej z gruntu podczas eksploatacji wymiennika oraz dostarczają informacji o temperaturze cieczy cyrkulującej w wymienniku, co ma szczególne znaczenie w ocenie chwilowego współczynnika COP,
- modelowanie i symulacja CFD może służyć do projektowania gruntowych wymienników ciepła typu slinky nie tylko dla pojedynczej pętli ale również dla bardziej skomplikowanych ich aranżacji w tym dla wymienników wielorzędowych. Umożliwia ona przewidywanie wydajności takiego wymiennika w krótkim i wieloletnim okresie eksploatacji oraz pozwala na określanie temperatur cieczy roboczej w każdym punkcie geometrii, co jest szczególnie ważne dla wyznaczenia parametrów pracy pompy ciepła. Modelowanie CFD może służyć do optymalizacji wymiennika ciepła na etapie jego projektowania oraz na etapie jego eksploatacji. Umożliwia także badanie wpływu warunków atmosferycznych na pracę i wydajność systemu.
- Badanie gruntowych wymienników ciepła typu slinky w pełnej skali metodami CFD bez zakładania szeregu uproszczeń w postaci: stałej temperatury rury wymiennika, stałej

temperatury gruntu, stałej temperatury powierzchni gruntu, modelowania fragmentów wymienników i in. wykazało różnice w sposobie wychładzania gruntu przez wymiennik liniowy i wymienniki slinky, różnice w rozkładach temperatur w gruncie po długościach wymienników zależne od typu wymiennika i rozstawu pętli w przypadku wymienników slinky. Umożliwia także określenie krytycznych obszarów w których grunt jest najmocniej wychładzany.

- Modelowanie CFD wykazało, że wymienniki o różnej konfiguracji ale o podobnej powierzchni wymiany ciepła z gruntem mają różne, zmienne w czasie, parametry pracy. Dotyczy to takich parametrów jak rozkłady temperatur w gruncie, temperatury wylotowe cieczy roboczej, mocy grzewczych i chłodniczych oraz całkowitej ilości energii pobranej z gruntu.
- Gruntowe wymienniki ciepła nie powinny pracować w sposób ciągły.
- Do modelowania gruntowych wymienników ciepła nie można stosować grubych założeń upraszczających, gdyż nie pozwalają one prawidłowo oceniać wpływu konfiguracji wymienników na ich pracę.

## **6. Koncepcja nowego horyzontalnego wymiennika gruntowego do pomp ciepła typu liniowo - spiralnego.**

Dodatkowym wnioskiem wynikającym z uzyskanych wyników symulacji jest propozycja innej konfiguracji wymiennika liniowego oraz wymienników slinky a mianowicie taka aranżacja w gruncie by początkowe biegi/spirale wymiennika były oddalone od siebie bardziej niż końcowe. Należy zaproponować wymiennik o powierzchni wymiany ciepła takiej jak wyżej badane wymienniki i przebadać go dla warunków pracy tych samych warunków pracy. Tyczy się to zarówno wymienników slinky jak i liniowych.

Inną ciekawą koncepcją jest zastosowanie wymiennika kombinowanego liniowo – spiralnego którego zoptymalizowanego zarówno pod względem rozstawu pętli jak i samej budowy gdzie szerokość takiego wymiennika byłaby zdeterminowana przez średnicę pętli slinky natomiast początkowe sekcje byłyby krótkimi biegami wymiennika liniowego.

Wynika to z faktu, że najbardziej intensywnie eksploatowany jest grunt dla początkowych zwojów wymienników.

Odpowiednie zagęszczenie zwojów wymiennika spowoduje wyrównanie temperatury w gruncie po długości wymiennika a co za tym idzie jego porównanie względem wymienników badanych będzie korzystniejsze. Nie będzie występował punkt krytyczny oraz wydajność takiego wymiennika wzrośnie.

## Posłowie

Problematyka badania i modelowanie gruntowych wymienników ciepła wydaje się bardziej złożona niż wynika to z obecnego stanu wiedzy. Przyjęło się schematyczne myślenie o gruncie jako źródle ciepła i o badaniu wymienników w stanie ustalonym oraz dobieraniu ich na średnie parametry pracy. Tymczasem grunt należałoby traktować szerzej niż jako źródło ciepła lecz jako bufor ciepła o zmiennej pojemności regenerowany energią słoneczną, deszczem czy wodami gruntowymi. Długotrwała eksploatacja wymienników ciepła o takiej samej powierzchni wymiany ciepła z gruntem daje informacje co do skrajnych warunków pracy takiego wymiennika jednak takie informacje nie mają wielkiego zastosowania w praktyce projektowej. Dywagacje te ukazują że skoro modele CFD odwzorowują realnie pracę wymienników co jest jednym z wniosków tej pracy należy zastosować takie modelowanie do wieloletniej analizy pracy w różnych warunkach i gruntach. Dla poszczególnych konfiguracji wymienników stworzy to pewną mapę wyników po której poruszając się w różnych „kierunkach” będzie można dobierać wymienniki w oparciu o średnie wyniki oraz maksymalne ograniczenia dla danych warunków. Jest to zadanie dla całego zespołu badaczy i inżynierów które doprowadziłoby do znacznego uproszczenia doboru GWC. Wyniki dotyczące pracy ciągłej (1800 godzin) w długiej skali czasowej sugerują że różnice w wydajnościach odniesionych dla różnych wymienników do powierzchni wymiany ciepła dla wymienników o takiej samej powierzchni wymiany ciepła mogą prowadzić do sytuacji gdzie strumień ciepła dostarczanego do wymiennika zależy jedynie od przewodnictwa cieplnego gruntu, różnicy temperatur między gruntem w nieskończoności a wymiennikiem i powierzchni wymiany ciepła wymiennika w stanie ustalonym. Prowadzi to do oczywistego wzoru:  $Q = f(A, \lambda, T_{\text{wymiennika}}, T_{\text{gruntu}})$  który pozwala na wyznaczenie minimalnej wydajności wymiennika w gruncie potraktowanym jako ciało nieskończone. Sprowadza to każdy wymiennik do charakteru źródła punktowego lub liniowego ponieważ wymienniki slinky mają znaczną długość w porównaniu z szerokością i znikomą wysokość.

Nieodzowną częścią analizy pracy gruntowego wymiennika ciepła jest jego analiza w konkretnym układzie: warunki klimatyczne, budynek, górne źródło ciepła, pompa ciepła, gruntowy wymiennik ciepła (dolne źródło ciepła). Dopiero taka analiza porównawcza różnych wymienników o takiej samej powierzchni wymiany ciepła z gruntem dla przynajmniej jednego sezonu grzewczego z realnymi warunkami początkowo-brzegowymi dałaby pełną informację co do faktycznej pracy takiego wymiennika i pozwoliłaby na pełną ocenę wyboru danego typu i danej konfiguracji w konkretnym układzie.

Należy rozważyć wykorzystanie modelu RSM do projektowania wymienników slinky. Wydaje się że można zastosować uproszczoną metodę polegającą na tym, że modelujemy jeden

zwoj i zakładamy najniższą dopuszczalną temperaturę w pobliżu wymiennika dla wybranej współrzędnej. Pozwoli to na wyznaczenie dopuszczalnej wydajności 1 zwoju i czasu po którym minimalna dopuszczalna temperatura będzie osiągnięta. Pozostałe zwoje będą miały mniejsza wydajność jednak prawdopodobnie da się ją opisać funkcją zależną od parametrów cieplnych gruntu, wydajności tegoż pierwszego zwoju oraz współczynnika zabudowy na co wskazują wyniki modelowania CFD. Dla wymienników o zwojach stycznych lub zachodzących prawdopodobnie wystarczy uwzględnić współczynnik poprawkowy będący funkcją wymiarów geometrycznych.

Ogólnie w miarę eksploatacji gruntu i dochodzenia do stanu ustalonego, kształt geometrii GWC ma coraz mniejsze znaczenie. Oznacza to że podstawą analizy GWC w przyszłości musi być analiza nieustalona w czasie. Jakikolwiek badania w czasie ustalonym powinny służyć jedynie walidacji modeli matematycznych jednak analizy powinny dotyczyć procesów nagrzewania i chłodzenia, eksploatacji gruntu i jego regeneracji. Regenerację gruntu należałoby analizować w okresach postoju sprężarki w sezonie grzewczym i w czasie postoju poza sezonem grzewczym. Modelowanie należy sprowadzić do sytuacji pozwalającej na wyznaczenie współczynnika SCOPu w oparciu o charakterystykę energetyczną budynku, warunki klimatyczne oraz parametry gruntu. Następnie w oparciu o takie wyniki należy stworzyć obliczeniową i tabelaryczną metodę w oparciu o wspomniane mapy.

Podsumowując należy stwierdzić, że staranne projektowanie i dobór gruntowych poziomych i pionowych wymienników ciepła są nieodzowne i należy je przeprowadzić tak aby unikać ich niedowymiarowania. Prowadzi bowiem ono z reguły do obniżenia temperatury solanki, a co za tym idzie - do gorszych średniorocznych współczynników efektywności pracy pompy ciepła. Dobór zbyt małej powierzchni wymiany ciepła może też prowadzić do trwałego spadku temperatur źródła ciepła. W skrajnym przypadku może to doprowadzić do przekroczenia dolnej granicy zastosowania pompy ciepła. Dobór zbyt małych urządzeń może prowadzić także do miejscowego spowolnienia wegetacji roślin.

W przyszłości należy przeprowadzić także analizę pracy GWC eksploatowanego przez pompy ciepła ze sprężarkami inwerterowymi, które dostosowują swą wydajność do zapotrzebowania budynek na moc. Takie układy będą pracować w sposób ciągły ale ze zmienną wydajnością.

Dodatkowa uwaga dotyczy szczupłości materiału źródłowego na który to problem napotkano podczas pisania tej pracy. Prowadzone badania nad gruntowymi wymiennikami ciepła typu slinky nie są obszarem szerokiego zainteresowania badaczy i nie są należycie dokumentowane w literaturze światowej. Wynika to zapewne z szybkiego oddolnego rozwoju

tego obszaru wiedzy. Wiele informacji ma albo charakter wiedzy praktycznej lub też jest objęta tajemnicą przemysłową.

## Bibliografia

1. BP. *Statistical Review of World Energy 2020*.
2. Główny Urząd Statystyczny. *Energia 2022*. Warszawa : Zakład Wydawnictw Statystycznych, 2022.
3. L. Gawlik, E. Mokrzycki. Paliwa kopalne w krajowej energetyce – problemy i wyzwania. *Polityka energetyczna - Energy Policy Journal*. 2017, Vol. 20, Zeszyt 4, 6-26.
4. Porozumienie Paryskie, Dokument 22016A1019(01). 2016, Dz.U. L 282 z 19.10.2016, str. 4-18.
5. Decyzja Rady (UE) 2016/1841 z dnia 5 października 2016 r. w sprawie zawarcia, w imieniu Unii Europejskiej, porozumienia paryskiego przyjętego na mocy Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, Dokument 32016D1841. 2016, Dz.U. L 282 z 19.10.2016, str. 1—3.
6. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2020 r. poz. 1219 z późn. zm.).
7. BP. *Energy Outlook 2020 edition*.
8. B. Szymański. Koszty wytwarzania energii z OZE. *Globenergia+*. 5/2015.
9. IRENA, International Renewable Energy Agency. *Renewable Capacity Statistics 2018*. Abu Dhabi : IRENA, 2018. ISBN: 978-92-9260-057-0.
10. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/1999 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie zarządzania unią energetyczną i działaniami w dziedzinie klimatu. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L 328/1. 2018.
11. [www.ec.europa.eu](http://www.ec.europa.eu). [Online] [Cited: 1 5, 2019.]  
[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en#tab-0-1](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en#tab-0-1).
12. *Wyrok w imieniu Rzeczypospolitej polskiej*. Sygn. akt I ACa 730/12, Katowice : Sąd Apelacyjny w Katowicach I Wydział Cywilny, Dnia 8 listopada 2012 r.
13. *Wyrok w imieniu Rzeczypospolitej Polskiej*. Sygn. akt VI Ga 24/16, Toruń : Sąd Okręgowy w Toruniu Wydział VI Gospodarczy, Dnia 04 kwietnia 2016 r.
14. *Uzasadnienie*. Sygn. akt III Ca 1820/15, Łódź : Sad Rejonowy dla Łodzi – Śródmieścia w Łodzi , 2015.
15. M. Żelkowski. *BudujemyDom*. [Online] [Cited: 3 7, 2019.]  
<https://budujemydom.pl/instalacje/ogrzewanie-podlogowe-i-grzejniki/a/8272-pompa-ciepła-himalaje-bezczelności>.
16. T. Qi, X. Zhang, V. J.Karplus. The energy and CO2 emissions impact of renewable energy development in China. *Energy Policy*. 2014, Vol. 68, pp. 60-69.

17. P. Lachman, J. Rączka, C. Shnell, P. Wróbel. *Scenariusze Elektryfikacji Ogrzewania w Budynkach Jednorodzinnych w Polsce do 2030 roku*. Kraków : Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła, 2020.
18. P. Lachman, M. Burchat. *Rynek pomp ciepła w Polsce w latach 2010-2017 Perspektywy rozwoju rynku pomp ciepła do 2030 roku*. Kraków : Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła, 2018.
19. M. J. Moran, H. N. Shapiro, D.D. Boettner, M. B. Bailey. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. USA : Wiley, 2012.
20. W. Pudlik. *Termodynamika*. Gdańsk : s.n., 2011.
21. A. D. Chiasson. *Geothermal heat pump and heat engine systems: theory and practise*. Dayton : John Wiley & Sons, Ltd, Departament of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Dayton, 2016. ISBN: 9781118961971.
22. M. Rubik. *Chłodnictwo i pompy ciepła*. wydanie drugie. Warszawa : Grupa Medium, 2021. ISBN: 978-83-64094-66-8.
23. Z. Xiong. *Development and validation of a slinky ground heat exchanger model*. Oklahoma : s.n., 2014.
24. S. Yoon, S. Lee, G. Go. Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers. *Energy and buildings 105*. 2015, pp. 100 - 105.
25. M. Kim, S. Lee, S. Yoon, G. Go. Thermal performance evaluation and parametric study of a horizontal ground heat exchanger. *Geothermics 60*. 2016, pp. 134 -143.
26. P. Pauli, P. Neuberger, R. Adamovsky. Monitoring and analysing changes in temperature and energy in the ground with installed horizontal ground heat exchangers. *Energies, 9*, 555. 2016.
27. Y. Wu, G. Gan, A. Verhoef, P. L. Vidale, R. G. Gonzales. Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers. *Applied Thermal Engineering 30*. 2010, pp. 2574 - 2583.
28. P. Neuberger, R. Adamovský, M. Šed'ová. Temperatures and Heat Flows in a Soil Enclosing a Slinky Horizontal Heat Exchanger. *Energies 2014, 7*. 2014, pp. 972-987.
29. H. Ali, K. Kariya, A. Miyara. Performance Analysis of Slinky Horizontal Ground Heat Exchangers for a Ground Source Heat Pump System. *Resources*. 2017, 6, 56.
30. P.M. Congedo, G. Colangelo, G. Starace. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*. 2011.
31. M. Rubik. *Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej*. Warszawa : MULTICO Oficyna Wydawnicza sp. z o.o, 2011.
32. J. Ciborowski. *Inżynieria Procesowa*. Warszawa : WNT, 1973.



33. PN-EN 16147:2017-04 - wersja angielska. *Pompy ciepła ze sprężarkami o napędzie elektrycznym -- Badanie, raport oceny i wymagania dotyczące oznakowania pomp ciepła do przygotowania ciepłej wody użytkowej*. 04-04-2017.
34. PN-EN 14511-1:2018-08 - wersja angielska. *Klimatyzatory, ziębiarki ciecży i pompy ciepła do grzania i ziębienia oraz ziębiarki do procesów przemysłowych, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym -- Część 1: Terminy i definicje*. 10-08-2018.
35. PN-EN 15879-1:2011 - wersja angielska. *Badanie i charakterystyki pomp ciepła ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, z gruntem jako dolnym źródłem ciepła, do ogrzewania i/lub chłodzenia pomieszczeń -- Część 1: Pompy ciepła grunt-woda*. 29-04-2011.
36. C. A. De Swartd, J. P. Meyer. A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump. *International journal of energy research*; 25. 2001, pp. 899 - 910.
37. *High latitude solar heating using photovoltaic panels, air-source heat pumps and borehole thermal energy storage*. J. Hirvonen, K. Siren. ISES Solar World Congress 2017 : IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, 2017.
38. Energie und Umwelttechnik. Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems. *VDI manual Energy Technology*. 2019-06.
39. S. Mukerji, K. A. Tagavi, W.E. Murphy. Steady-state heat transfer analysis of arbitrary coiled buried pipes. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 11(2). 1997, pp. 182 - 188.
40. S. Selamat, A. Miyara, K. Kariya. Numerical study of horizontal ground heat exchangers for design optimization. *Renewable Energy* 95. 2016, pp. 561 - 573.
41. —. Analysis of Short Time Period of Operation of Horizontal. *Resources* 2015, 4. 2015, pp. 507 - 523.
42. C. S. A. Chong, G. Gan, A. Verhoef, R. G. Garcia, P. L. Vidale. Simulation of thermal performance of horizontal slinky - loop heat exchangers for ground source heat pumps. *Applied Energy*. 2013, 104, pp. 603 - 610.
43. C.S.A. Chong, G. Gan, A. Verhoef, R.G. Garcia. Comparing the thermal performance of horizontal slinky - loop and vertical slinky - loop heat exchangers. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2014, pp. 250 - 255.
44. Y. Wu, G. Gan, R. G. Gonzalez, A. Verhoef. Prediction of the thermal performance of horizontal - coupled ground - sourced heat exchangers. *International Journal of Low-Carbon Technologies* . 2011, pp. 261–269.
45. H. S. Carslaw, J.C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids* 2nd ed. Clarendon Press. Oxford, 1959.
46. ANSYS, Inc. (2018), "ANSYS Fluent User's Guide, Release 19.0", Equation (6.68).

47. Dimplex D.C. *Podręcznik projektowania i instalacji. Grzewcze pompy ciepła i pompy ciepła ciepłej wody*. 11/2006. 2006.
48. Alpha innotec. *Przewodnik po pompach ciepła*. Stand 05/2009. 2009.
49. T. Mania, J. Kawa. *Inżynieria instalacji pomp ciepła*. [ed.] A. Mroziński. Bydgoszcz : s.n., 2016.
50. Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła . *Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła, część pierwsza, dolne źródła do pomp ciepła*. wydanie drugie. Kraków : s.n., 2021.
51. Akademia Viessman. *podręcznik architekta, projektanta i instalatora, pompy ciepła*. 09/2011.
52. P. Kopec. Obliczenia i dobór gruntowego ciepła dla pompy ciepła. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*. JCEEA, kwiecień - czerwiec 2015, Vol. t. XXIII, z. 62 (2/15), pp. 167-176.

## Spis rysunków

Rys. 1. Światowa konsumpcja energii pierwotnej w latach 2006 - 2016 (1).....	15
Rys. 2. Analogia transportu cieczy i ciepła, a) transport cieczy, b) transport ciepła, c) spiętrzanie temperatury na skutek dostarczania pracy (31).....	19
Rys. 3. Schemat działania pompy ciepła .....	20
Rys. 4. Klasyfikacja gruntowych wymienników ciepła ze względu na ich aranżacje w gruncie..	25
Rys. 5. Badania terenowe, a) wykopy pod wymiennik, b) posadowienie wymiennika i czujników w gruncie, c) wymiennik slinky, d) stanowisko akwizycji danych.....	33
Rys. 6. Schemat instalacji pomiarowej.....	34
Rys. 7. Kocioł wykorzystywany do grzania bufora .....	34
Rys. 8. Rozmieszczenie czujników w gruncie .....	35
Rys. 9. Licznik ciepła Apator LQM III ze zintegrowanym przepływomierzem CQM III.....	36
Rys. 10. Czujnik DS18B20 wersja bez pancerza i w obudowie hermetycznej .....	36
Rys. 11. Wykres profili temperatury na powierzchni gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 1 – 4 .....	38
Rys. 12. Wykres profili temperatury gruntu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 1 .....	38
Rys. 13. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 1 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	39
Rys. 14. Wykres profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 2 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	40
Rys. 15. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 2 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	40
Rys. 16. Wykres profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 4 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	41
Rys. 17. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 4 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	41
Rys. 18. Wykres profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 3 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	42
Rys. 19. Wykres 3D profili temperatury gruntu w czasie wykonanego eksperymentu zmierzony przez czujniki linii pomiarowej 3 zainstalowane na wybranych głębokościach.....	42
Rys. 20. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 2.....	44
Rys. 21. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 4.....	44

Rys. 22. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 3 .....	45
Rys. 23. Profile temperatury gruntu na głębokościach pomiarowych dla wybranych chwil czasu trwania eksperymentu zarejestrowane przez czujniki linii pomiarowej 1 .....	45
Rys. 24. Wyniki pomiarów temperatury cieczy roboczej oraz jej natężenia przepływu na wlocie i wylocie z wymiennika ciepła .....	46
Rys. 25. Strumień ciepła oddawany do gruntu podczas eksperymentu.....	47
Rys. 26. Pierścieniowe źródło ciepła a) układ współrzędnych cylindryczny, b) kartezjański .....	50
Rys. 27. Wyniki symulacji cyfrowej profili temperatur gruntu z zainstalowaną jedną poziomą pętlą dla różnych czasów trwania procesu ogrzewania. Mapa temperatur w układzie współrzędnych $y-x$ .....	50
Rys. 28. Wyniki symulacji cyfrowej profili temperatur gruntu z zainstalowaną jedną poziomą pętlą dla różnych czasów trwania procesu ogrzewania. Mapa temperatur w układzie współrzędnych $z-x$ .....	51
Rys. 29. Zależność przenieszonego ciepła od czasu – dane z pomiarów i funkcja aproksymująca	52
Rys. 30. Zależność temperatury gruntu od czasu linii 2 dla różnych wartości zmiennej położenia z – porównanie wartości doświadczalnych i obliczeniowych z modelu RSM.....	53
Rys. 31. Zależność temperatury gruntu od czasu linii 3 dla różnych wartości zmiennej położenia z – porównanie wartości doświadczalnych i obliczeniowych z modelu RSM.....	54
Rys. 32. Zależność temperatury gruntu od czasu linii 4 dla różnych wartości zmiennej położenia z – porównanie wartości doświadczalnych i obliczeniowych z modelu RSM.....	54
Rys. 33. Porównanie wartości temperatur doświadczalnych i obliczeniowych – linie przerywane oznaczają odchylenie $\pm 3$ K .....	55
Rys. 34. Geometria pętli gruntowego wymiennika ciepła.....	57
Rys. 35. Siatka obliczeniowa modelu CFD jednej pętli wymiennika slinky.....	58
Rys. 36. Strumień masy wody na wlocie do wymiennika – warunek brzegowy modelu CFD	59
Rys. 37. Temperatura wlotowa cieczy do wymiennika – warunek brzegowy modelu CFD.....	59
Rys. 38. Temperatura początkowa gruntu będąca średnią z temperatury początkowej z pomiarów terenowych dla linii 2,3 i 4 – warunek początkowy modelu CFD.....	60
Rys. 39. Temperatura powierzchni gruntu – warunek brzegowy modelu CFD.....	61
Rys. 40. Porównanie temperatur na wylocie z wymiennika doświadczalnej i CFD.....	62
Rys. 41. Porównanie zmian temperatur w gruncie linia 2 - pomiary i symulacje CFD.....	63
Rys. 42. Porównanie zmian temperatur w gruncie linia 3 - pomiary i symulacje CFD.....	63
Rys. 43. Porównanie zmian temperatur w gruncie linia 4 - pomiary i symulacje CFD.....	64

Rys. 44. Energia oddana do gruntu – porównanie wyników pomiarów i CFD .....	65
Rys. 45. Rozkłady temperatur w gruncie po 1, 2 i 3 dobach dla linii 2 – pomiary, RSM i CFD ..	67
Rys. 46. Rozkłady temperatur w gruncie po 1, 2 i 3 dobach dla linii 3 – pomiary, RSM i CFD ..	68
Rys. 47. Rozkłady temperatur w gruncie po 1, 2 i 3 dobach dla linii 4 – pomiary, RSM i CFD ..	69
Rys. 48. Sposób tworzenia modeli CFD.....	76
Rys. 49. Model wymiennika liniowego umieszczony w gruncie.....	80
Rys. 50. Model wymiennika liniowego .....	80
Rys. 51. Model wymiennika slinky o zwojach rozłącznych umieszczony w gruncie.....	81
Rys. 52. Model wymiennika slinky rozłącznego .....	81
Rys. 53. Model wymiennika slinky o zwojach stycznych umieszczony w gruncie.....	82
Rys. 54. Model wymiennika slinky o zwojach stycznych .....	82
Rys. 55. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 250 mm umieszczony w gruncie .....	83
Rys. 56. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 250 mm .....	83
Rys. 57. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 500 mm umieszczony w gruncie .....	84
Rys. 58. Model wymiennika slinky o zwojach zachodzących o 500 mm .....	84
Rys. 59. Siatka obliczeniowa modelu wymiennika płaskiego .....	86
Rys. 60. Siatki obliczeniowe modeli wymienników slinky a) zwoje rozłączne, b) zwoje styczne, c) zwoje zachodzące o 250 mm, zwoje zachodzące o 500 mm .....	87
Rys. 61. Warunek brzegowy na powierzchni gruntu.....	89
Rys. 62. Warunek początkowy - temperatura gruntu na dzień 1 października.....	90
Rys. 63. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur - wymiennik liniowy .....	92
Rys. 64. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur – wymiennik slinky rozłączny .	93
Rys. 65. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur – wymiennik slinky styczny ....	93
Rys. 66. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur - wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm.....	94
Rys. 67. Płaszczyzny na których wyznaczono mapy temperatur - wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm.....	94
Rys. 68. Początkowy rozkład temperatur w gruncie - na przykładzie modelu wymiennika liniowego -płaszczyzna zielona.....	95
Rys. 69. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna zielona – 450 h.....	96
Rys. 70. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna zielona - 900 h .....	97
Rys. 71. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna zielona - 1350 h .....	97

Rys. 72. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna zielona - 1800 h .....	98
Rys. 73. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna pomarańczowa - 450 h .....	100
Rys. 74. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna pomarańczowa - 900 h .....	100
Rys. 75. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna pomarańczowa - 1350 h .....	101
Rys. 76. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna pomarańczowa - 1800 h .....	101
Rys. 77. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna biała - 450 h .....	102
Rys. 78. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna biała - 900 h .....	103
Rys. 79. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna biała - 1350 h .....	104
Rys. 80. Rozkład temperatur w gruncie, wymiennik liniowy, płaszczyna biała - 1800 h .....	105
Rys. 81. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny - płaszczyna zielona, a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	108
Rys. 82. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny - płaszczyna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	109
Rys. 83. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny – płaszczyna biała a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	110
Rys. 84. Rozkład temperatur wymiennik slinky rozłączny – płaszczyna zielona a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	111
Rys. 85. Rozkład temperatur wymiennik slinky styczny - płaszczyna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	112
Rys. 86. Rozkład temperatur wymiennik slinky styczny – płaszczyna biała a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	113
Rys. 87. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm – płaszczyna zielona a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	114
Rys. 88. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm - płaszczyna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	115
Rys. 89. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 250 mm – płaszczyna biała a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	116
Rys. 90. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm – płaszczyna zielona a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	117

Rys. 91. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm - płaszczyzna pomarańczowa a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h .....	118
Rys. 92. Rozkład temperatur wymiennik slinky o zwojach zachodzących o 500 mm – płaszczyzna biała, a) 450 h, b) 900 h, c) 1350 h, d) 1800 h.....	119
Rys. 93. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika - liniowy dla 450, 900, 1350 i 1800 h .....	122
Rys. 94. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky rozłączny dla 450, 900, 1350 i 1800 h .....	123
Rys. 95. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky styczny dla 450, 900, 1350 i 1800 h .....	124
Rys. 96. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky o zwojach zachodzących o 250 mm dla 450, 900, 1350 i 1800 h.....	125
Rys. 97. Temperatura gruntu wzdłuż wymiennika – slinky o zwojach zachodzących o 500 mm dla 450, 900, 1350 i 1800 h.....	126
Rys. 98. Temperatura gruntu wzdłuż wymienników – liniowego , slinky o zwojach rozłącznych, stycznych zachodzących o 250mm i o 500 mm dla 1800 h.....	127
Rys. 99. Rozkład temperatur rejestrowanych na wylocie z analizowanych gruntowych wymienników ciepła.....	129
Rys. 100. Moc cieplna badanych wymienników.....	131
Rys. 101. Moc wymienników odniesiona do powierzchni wymiany ciepła.....	132
Rys. 102. Moc cieplna wymienników odniesiona do powierzchni zabudowy wymiennika w gruncie .....	134

## Spis tabel

Tabela 1. Numeracja czujników w gruncie - czarna poziom instalacji wymiennika = 50 cm .....	35
Tabela 2. Jednostkowa wydajność ciepła gruntu (48).....	74
Tabela 3. Współczynnik EUco – zapotrzebowanie na energię użytkową budynków.....	75
Tabela 4. Objętości i wymiary badanych geometrii.....	77
Tabela 5. Charakterystyka geometryczna różnych modeli wymienników .....	78
Tabela 6. Parametry jednego obiegu modelowanych wymienników – modele CFD .....	79
Tabela 7. Opcje ogólne nakładania siatki obliczeniowej.....	85
Tabela 8. Opcje siatki obliczeniowej dla ilości elementów po obwodzie wymiennika – opcja <i>Edge sizing</i> .....	85
Tabela 9. Własności siatki obliczeniowej wymiennika liniowego.....	85
Tabela 10. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky rozłącznego .....	85
Tabela 11. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky stycznego .....	86
Tabela 12. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky stycznego .....	86
Tabela 13. Własności siatki obliczeniowej wymiennika slinky stycznego .....	86
Tabela 14. Temperatura wylotowa z wymienników w czasie 1800 godzin.....	129
Tabela 15. Moce wymienników w wybranych czasach procesu .....	131
Tabela 16. Gęstości strumienia ciepła na powierzchni wymiany ciepła wymienników dla wybranych czasów.....	133
Tabela 17. Moc chłodnicza pobierana z gruntu .....	135
Tabela 18. Ciepło uzyskane z wymienników liniowego i slinky o różnych konfiguracjach – modelowanie CFD.....	136
Tabela 19. Proponowane do weryfikacji procentowe zwiększenie długości rur/powierzchni wymiany ciepła dla wymienników slinky względem wymiennika liniowego dobieranego metodą PORT PC.....	143