

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA

KATEDRA KLIMATYZACJI, OGRZEWNICTWA, GAZOWNICTWA
I OCHRONY POWIETRZA

WYZNACZANIE PARAMETRÓW GRUNTU DO SYMULACJI
I PROJEKTOWANIA PIONOWYCH WYMIENNIKÓW
POMP CIEPŁA

DETERMINATION OF SOIL PARAMETERS FOR SIMULATION AND DESIGN OF
VERTICAL HEAT PUMP EXCHANGERS

AUTOR:

mgr inż. Ewelina Stefanowicz

PROMOTOR:

prof. dr hab. inż. Jan Danielewicz

PROMOTOR POMOCNICZY:

dr hab. inż. Małgorzata Szulgowska-Zgrzywa

Streszczenie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono badania dotyczące dokładności estymacji parametrów gruntu na podstawie danych uzyskanych w teście odpowiedzi termicznej gruntu (*ang. Thermal Response Tests – TRT*) z wykorzystaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (*ang. Infinite Line Source – ILS*). W szczególności, przedstawiono zależność dokładności wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła gruntu od czasu trwania testu, przyjęcia początku i końca przedziału czasu z jakiego dane są poddawane analizie modelem *ILS*, a także od właściwości gruntowego wymiennika ciepła (współczynnika przewodzenia ciepła wypełnienia i współczynnika przewodzenia ciepła gruntu). W ramach pracy doktorskiej opracowano również zależność (model statystyczny) pozwalającą na skorygowanie dokładności wyznaczanego modelem *ILS* współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.

Badania podzielono na kilka etapów. Pierwszym z nich było przeprowadzenie TRT na gruntowym wymienniku ciepła zlokalizowanym w Świdnicy. W tym celu opracowano projekt i zrealizowano budowę przenośnego stanowiska badawczego do przeprowadzania takich testów. Dane pomiarowe rejestrowane były zarówno w obrębie opracowanego w ramach pracy doktorskiej stanowiska, jak i w studni rewizyjnej znajdującej się przy odwiercie, za pośrednictwem urządzeń pomiarowych zainstalowanych w miejscu prowadzenia badań. Przeprowadzono dwa testy, różniące się mocą grzewczą dostarczaną do odwiertu oraz wartością przepływu czynnika pośredniczącego. Analizowano wpływ mocy grzewczej, przepływu czynnika pośredniczącego, lokalizacji aparatury pomiarowej oraz czasu trwania pomiarów na wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem *ILS*. Zasadniczo jednak, głównym celem badań terenowych było pozyskanie danych do opracowania i walidacji modelu numerycznego gruntowego wymiennika ciepła w oprogramowaniu Ansys Fluent. Prowadzenie szerokich analiz dotyczących wrażliwości TRT na zmianę czynników zewnętrznych na podstawie badań terenowych jest bowiem problematyczne, z jednej strony ze względu na koszty tych badań, z drugiej ze względu na brak możliwości ich przeprowadzenia dla odpowiednio szerokiego, dla opracowania ogólnych wniosków, zakresu zmian danych wejściowych (np. parametrów gruntu czy wypełnienia odwiertu).

W kolejnym etapie prac wykorzystano numeryczną mechanikę płynów do budowy modelu numerycznego gruntowego wymiennika ciepła i przeprowadzono proces walidacji względem wyników pomiarów. Model numeryczny został opracowany w środowisku ANSYS® 2020 R2 z solverem obliczeniowym Fluent. Przeprowadzono kalibrację oraz walidację modelu na podstawie danych uzyskanych w testach terenowych uzyskując bardzo dobrą zgodność wyników modelu z pomiarami.

Kolejnym etapem badań była analiza wrażliwości błędów wartości przewodności cieplnej gruntu wyznaczonej na podstawie *TRT* z zastosowaniem modelu *ILS* na wybrane właściwości wymiennika oraz warunki prowadzenia testu. Przeprowadzono szereg symulacji numerycznych w celu przygotowania bazy danych wyników *TRT*, prowadzonych przy zachowaniu całkowitej kontroli parametrów testowych. Łącznie wykonano 33 symulacje numeryczne reprezentujące testy odpowiedzi termicznej gruntu trwające 72 godziny. Dzięki opracowanemu modelowi numerycznemu możliwe było przeprowadzenie testów o dowolnej konfiguracji danych wejściowych tj.: mocy grzewczej, przepływu czynnika oraz parametrów termofizycznych domen

obliczeniowych (właściwości materiałowych wypełnienia, u-rury oraz otaczającego wymiennik ciepła gruntu). Wyniki uzyskane w symulacjach numerycznych poddano analizie modelem *ILS*, a następnie zbadano i porównano błędy wyznaczonego w ten sposób współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Omówiono problemy pojawiające się w trakcie analizy wyników *TRT* metodą *ILS*, a także przedstawiono możliwości rozwinięcia i uzupełnienia istniejących wytycznych dotyczących przeprowadzania i interpretacji wyników *TRT*. Dla analizowanych przypadków stwierdzono, że moc grzewcza i przepływ czynnika roboczego w trakcie testu odpowiedzi termicznej gruntu oraz parametry u-rury nie miały istotnego wpływu na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z zastosowaniem modelu *ILS*. Wykazano natomiast, że jest on silnie zależny od właściwości wymiennika: współczynnika przewodzenia ciepła gruntu i współczynnika przewodzenia ciepła wypełnienia odwiertu.

W drugiej części analizy wrażliwości badano jaki wpływ na dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu na podstawie *TRT* z zastosowaniem modelu *ILS* ma czas trwania testu, a dokładniej – przedział czasu, z którego dane poddawane są analizie. Wyniki każdej z 33 symulacji rozpatrzono modelem *ILS* przyjmując różne wartości początku i końca tego przedziału. Łącznie wykonano 876 takich analiz. Dzięki nim wykazano, że okres z jakiego pobierane są dane do analizy modelem *ILS* jest ważnym czynnikiem wpływającym na dokładność identyfikacji współczynnika przewodzenia ciepła oraz że błąd tej estymacji jest silnie zależny od stosunku przewodności cieplnej gruntu do przewodności cieplnej wypełnienia.

W ostatnim etapie analizy wrażliwości badano związek pomiędzy błędem estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem *ILS*, a dostępnymi w wyniku przeprowadzenia *TRT* danymi. Efektem tych prac jest zależność pozwalająca na skorygowanie tego błędu. Opracowano model statystyczny, w którym zamienna zależna – skorygowana wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu – jest funkcją przewodności cieplnej gruntu będącej wynikiem analizy danych *TRT* modelem *ILS* oraz współczynnika przewodzenia ciepła wypełnienia odwiertu.

W ramach niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono analizę wrażliwości błędu wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła gruntu na podstawie *TRT* z zastosowaniem modelu *ILS* na właściwości wymiennika i czas prowadzenia testu oraz zależność umożliwiającą wyznaczenie skorygowanej wartości tego współczynnika. Wyniki pracy mogą pozwolić na dobór czasu trwania *TRT* i czasu analizy danych prowadzących do uzyskania najdokładniejszych informacji o wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz na skorygowanie uzyskanej wartości tego współczynnika w zależności od właściwości wymiennika ciepła. Dla dużych instalacji gruntowych wymienników ciepła, dla których zalecane jest wykonywanie *TRT*, może to prowadzić do znaczących oszczędności kosztów inwestycyjnych, lub do zapobiegania błędom projektowym.

Spis treści

Oznaczenia	7
Rozdział 1	9
1. Badania literaturowe	9
1.1. Wprowadzenie	9
1.2. Grunt jako źródło ciepła	10
1.3. Pionowe gruntowe wymienniki ciepła.....	12
1.4. Wymiarowanie pionowych gruntowych wymienników ciepła	18
1.4.1. Podstawowe zasady projektowania pionowych GWC.....	18
1.4.2. Aspekty prawne	19
1.4.3. Szczegółowe wytyczne projektowania GWC	19
1.4.4. Środowiskowe konsekwencje błędnego projektowania	22
1.5. Testy in-situ odpowiedzi termicznej gruntu.....	22
1.5.1. Odwiert pilotażowy.....	22
1.5.2. Thermal Response Test (TRT).....	23
1.5.3. Thermal Performance Test (TPT)	30
1.5.4. Disturbed Thermal Response Test (DTRT).....	31
1.5.5. Enhanced Thermal Response Test (ETRT).....	31
1.6. Analiza wyników TRT.....	32
1.7. Podsumowanie badań literaturowych, cel i teza pracy	34
Rozdział 2	38
2. Analiza wrażliwości TRT - badania terenowe	38
2.1. Cel i zakres badań.....	38
2.2. Opis stanowiska do badań TRT	39
2.3. Odwiert testowy	41
2.4. Przebieg badań terenowych	43
2.5. Wyniki pomiarów – TEST 1.....	44
2.5.1. Przebieg testu i zakres analiz.....	44
2.5.2. Efektywna przewodność cieplna	46
2.5.3. Opór cieplny odwiertu	47
2.5.4. Ocena stabilności parametrów testu terenowego.....	49

2.5.5.	Wpływ czasu trwania testu na wyniki pomiarów	50
2.6.	Wyniki pomiarów – TEST 2.....	51
2.6.1.	Przebieg testu i zakres analiz.....	51
2.6.2.	Efektywna przewodność cieplna.....	53
2.6.3.	Ocena stabilności parametrów testu terenowego.....	55
2.6.4.	Wpływ czasu trwania testu na wyniki pomiarów	56
2.7.	Podsumowanie	57
Rozdział 3	58
3.	Model numeryczny TRT	58
3.1.	Cel i zakres prac	58
3.2.	Konstruowanie modelu numerycznego TRT	59
3.2.1.	Wprowadzenie	59
3.2.2.	Wyjaśnienie fizyki zjawiska.....	59
3.2.3.	Założenia ogólne i wielkość modelu.....	61
3.2.4.	Dyskretyzacja.....	62
3.2.5.	Dane wejściowe, warunki brzegowe i początkowe.....	65
3.2.6.	Procedura solvera obliczeniowego.....	69
3.3.	Walidacja i kalibracja modelu numerycznego.....	70
3.3.1.	Wprowadzenie	70
3.3.2.	Walidacja i kalibracja modelu numerycznego TRT względem modelu ILS	71
3.3.3.	Walidacja i kalibracja modelu numerycznego TRT względem testów terenowych	75
3.4.	Podsumowanie	90
Rozdział 4	92
4.	Numeryczna analiza wrażliwości TRT	92
4.1.	Analiza 1 – przedział czasu <2,5 h – 72 h>	92
4.1.1.	Zakres symulacji i analiz	92
4.1.2.	Wyniki symulacji analiz.....	94
4.1.3.	Dyskusja wyników	96
4.1.1.	Podsumowanie.....	99
4.2.	Analiza 2 – różne przedziały czasu	101
4.2.1.	Zakres symulacji i analiz	101

4.2.2.	Wyniki symulacji i analiz	101
4.2.3.	Dyskusja wyników	105
4.2.4.	Podsumowanie	111
4.3.	Metoda poprawy dokładności wyznaczanego modelem ILS współczynnika przewodzenia ciepła gruntu	113
4.3.1.	Model statystyczny skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu	113
4.3.2.	Podsumowanie, weryfikacja efektów i zakres stosowania modelu statystycznego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu	118
Rozdział 5	121
5.	Podsumowanie i wnioski z pracy	121
5.1.	Podsumowanie	121
5.2.	Wnioski główne	121
5.3.	Wnioski szczegółowe	122
5.3.1.	Wnioski z badań terenowych TRT	122
5.3.2.	Wnioski dotyczące symulacji numerycznych TRT	123
5.3.3.	Wnioski z numerycznej analizy wrażliwości TRT	123
5.3.4.	Wnioski dotyczące opracowanego modelu statystycznego	124
Bibliografia	126
Spis tabel	135
Spis rysunków	138

Oznaczenia

<i>TRT</i>	Test Odpowiedzi Termicznej Gruntu (<i>Thermal Response Test</i>)
<i>GWC</i>	Gruntowy Wymiennik Ciepła
<i>COP</i>	Współczynnik Efektywności Pompy Ciepła (<i>Coefficient of Performance</i>)
<i>PC</i>	Pompa ciepła
<i>GPC</i>	Gruntowa Pompa Ciepła
<i>ILS</i>	Model nieskończonego źródła liniowego (<i>Infinite Line Source</i>)
<i>DTRT</i>	Rozproszony Test Odpowiedzi Termicznej Gruntu (<i>Disturbed Thermal Response Test</i>)
<i>ETRT</i>	Ulepszony Test Odpowiedzi Termicznej Gruntu (<i>Enhanced Thermal Response Test</i>)
<i>DTS</i>	Rozproszony pomiar temperatury (<i>Distributed Temperature Sensing</i>)
<i>TPT</i>	Stałotemperaturowy test odpowiedzi termicznej gruntu (<i>Thermal Performance Test</i>)
<i>UDF</i>	Funkcje zdefiniowane przez użytkownika (<i>User Defined Functions</i>)

<i>R</i>	opór cieplny	mK/W
<i>k</i>	współczynnik przejmowania ciepła	$W/(m^2K)$
<i>r</i>	promień	
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	$W/(mK)$
λ_{ILS_S}	skorygowana wartość współczynnika przewodzenia ciepła wyznaczonego metodą ILS	$W/(mK)$
<i>A</i>	powierzchnia	m^2
<i>t</i>	czas	s
t_p	początek przedziału czasowego	h
t_k	koniec przedziału czasowego	h
<i>T</i>	temperatura	$^{\circ}C$
T_0	temperatura gruntu niezakłóconego	$^{\circ}C$
$T_{\dot{s}r}$	średnia temperatura płynu	$^{\circ}C$
ΔT	różnica temperatur	K
<i>Q</i>	moc	kW
<i>q</i>	jednostkowy strumień ciepła	W/m
<i>C</i>	pojemność cieplna	J/kgK
ρ	gęstość	kg/m^3
μ	lepkość dynamiczna	$Pa \cdot s$
α	dyfuzyjność cieplna	m^2/s
<i>H</i>	długość gruntowego wymiennika ciepła	m
<i>n</i>	liczba gruntowych wymienników ciepła	–
<i>L</i>	całkowita długość gruntowego wymiennika ciepła	m
\dot{m}	przepływ masowy płynu	kg/s
\dot{V}	przepływ objętościowy płynu	m^3/h
<i>w</i>	prędkość czynnika pośredniczącego	m/s
<i>s</i>	nachylenie linii średniej temperatury płynu względem $\ln(t)$	–
<i>g</i>	przyspieszenie ziemskie	m/s^2
<i>G</i>	gradient geotermalny	K/m

q_g	geotermalny strumień ciepła	W/m^2
APE	błąd względny (<i>absolute percentage error</i>)	%
$MAPE$	średni błąd względny (<i>mean absolute percentage error</i>)	%
AE	błąd bezwzględny (<i>absolute error</i>)	°C
MAE	średni błąd bezwzględny (<i>mean absolute error</i>)	°C
ME	maksymalny błąd bezwzględny (<i>maximum absolute error</i>)	°C
PE	błąd procentowy	%

Indeksy dolne

f	płyn
r	u-rura
b	wypełnienie odwiertu
g	grunt
odw	odwiert
wew	wewnętrzny promień rury
zew	zewnętrzny promień rury
p	powietrze
w	woda
s	szkielet gruntowy
zas	wlot do wymiennika
pow	wylot z wymiennika
pom	wartość wyznaczona na podstawie danych pomiarowych
num	wartość wyznaczona na podstawie symulacji numerycznych
ILS	wyznaczone z wykorzystaniem modelu ILS
1	wartość wyznaczona na podstawie pomiaru w studni rewizyjnej
2	wartość wyznaczona na podstawie pomiaru w aparaturze TRT

Indeksy górne

dry	suchy
sat	nasycony wodą

Stałe

γ	stała Eulera równa 0,5772
----------	---------------------------

Rozdział 1

1. Badania literaturowe

1.1. Wprowadzenie

Rynek pomp ciepła w Polsce i innych krajach Unii Europejskiej gwałtownie rośnie w ciągu ostatnich lat. Udział sprzedanych pomp ciepła typu glikol-woda w 2010 r. wynosił blisko 45% rynku. W ostatniej dekadzie sprzedaż tego typu pomp ciepła wzrosła o ponad 50%, jednak przy rosnącej sprzedaży innych typów pomp ciepła (m.in. pomp ciepła powietrze-woda), ich udział stopniowo spadał, osiągając w 2018 r. udział 17% [1]. Według raportu opracowanego przez PORT PC, w Polsce w 2018 r. zainstalowanych było 5 380 pomp ciepła glikol-woda [1]. Dla porównania, w Szwecji do 2010 r. zainstalowano ponad 360 000 jednostek GPC z rosnącą liczbą 30 000 instalacji rocznie [2]. Najczęstszym sposobem wymiany ciepła z gruntem w instalacji pompy ciepła jest wykorzystanie sond gruntowych zlokalizowanych w odwiercie o głębokości około 100 m. Wymiana ciepła z otaczającym wymiennik gruntem następuje dzięki krążącemu w sondzie (u-kształtnej) czynnikowi roboczemu. Płyn transportuje ciepło lub chłód do systemu ogrzewania lub chłodzenia budynku. Poziom temperatury czynnika roboczego na wylocie z gruntowego wymiennika ciepła ma bezpośredni wpływ na poziom współczynnika efektywności pompy ciepła (COP), a tym samym na koszty eksploatacji systemu. Szacuje się, że zmiana temperatury czynnika roboczego o 1 K może powodować 2 – 3 % zmianę wartości COP pompy ciepła [3]. Dlatego tak ważne jest zaprojektowanie opłacalnego inwestycyjnie, łatwego w montażu wymiennika ciepła, który zapewni stabilną, długotrwałą pracę systemu, nie generując przy tym wysokich kosztów eksploatacyjnych. Wymienniki składające się z dwóch równoległych rur połączonych na dnie odwiertu w kształt litery 'u' zdominowały rynek gruntowych pomp ciepła. Istnieje jednak wiele niepewności co do ich właściwego projektowania. Niewielkie instalacje, powstające na potrzeby ogrzewania i chłodzenia budynków jednorodzinnych, projektowane są przy użyciu metod wskaźnikowych lub prostych programów symulacyjnych [4][5]. Większe systemy powinny być poddawane uważnej analizie, uwzględniającej wieloletnią eksploatację systemu. Niezależnie od zastosowanej metody, projektowanie systemów gruntowych pomp ciepła wymaga znajomości właściwości termicznych podłoża oraz parametrów technicznych wymiennika. Niestety, nadal znaczącym problemem jest brak świadomości o konsekwencjach nieprawidłowego projektowania i eksploatacji instalacji GPC, brak wiedzy dotyczącej zasad prawidłowego projektowania tych systemów oraz brak przekonania do korzyści wynikających z poniesienia wysokich kosztów inwestycyjnych. W rozdziale 1 niniejszej pracy przedstawiono najbardziej popularne na świecie metody analizy i projektowania gruntowych wymienników pomp ciepła. Szczegółowo omówiono zagadnienia związane testami odpowiedzi termicznej gruntu (*ang. Thermal Response Test - TRT*). Zagadnienia te obejmowały: procedurę testu, sposób interpretacji jego wyników oraz kierunki rozwoju tej metody wyznaczania parametrów gruntu do symulacji i projektowania pionowych wymienników pomp ciepła.

1.2. Grunt jako źródło ciepła

Temperatura gruntu zmienia się wraz z głębokością. Warunki klimatyczne, określone przez temperaturę powietrza zewnętrznego, wiatr, promieniowanie słoneczne, wilgotność powietrza i opady atmosferyczne, wpływają na profil temperatury powierzchniowych warstw gruntu. Ponadto, na rozkład temperatury gruntu mają wpływ również: struktura, właściwości fizyczne oraz pokrycie powierzchni gruntu (twarde podłoże, trawa, śnieg itd.). Poniżej głębokości około 15 m oddziaływanie warunków zewnętrznych znacząco się zmniejsza, temperatura gruntu jest niezmienna w ciągu roku i wzrasta wraz z głębokością w wyniku gradientu geotermalnego.

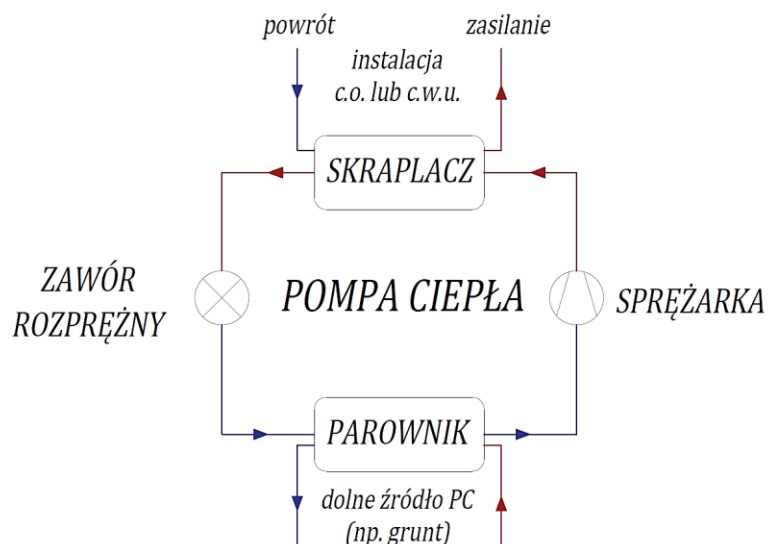
Pierwsze opisy spadku wahań temperatury gruntu wraz z głębokością opisano pod koniec XVII wieku. Odczyty temperatury dokonywane były w piwnicy Observatoire de Paris przez Antoniego Lavoisier, który zainstalował w niej termometr [6]. Dwie dekady później Alexander von Humboldt odwiedza to miejsce podczas studiów w Paryżu i stwierdza średnią obserwowaną temperaturę na poziomie 12°C, zaś sezonowe wahania temperatury wynoszące 0,04°C [7]. W 1778 r. Buffon opisał stały odczyt temperatury gruntu w czasie kolejnych pór roku [8]. Wskazał on również, że do wzrostu temperatury gruntu wraz z głębokością przyczynia się strumień geotermalny, który opisany został dzięki obserwacjom górników [8]. Cordier, w 1827 r., opublikował zbiór danych na temat temperatur w różnych miejscach i jasno wskazywał na wzrost temperatury gruntu wraz z głębokością [9]. Na terenie Observatoire de Paris obliczył ten wzrost na około 3,6°C na 100 m. Bischof jako pierwszy wskazał na wpływ przewodności cieplnej skał na wzrost temperatury gruntu wraz z głębokością [10]. Kolejne badania prowadzone w Szkocji, przez Thomsona i Everetta w 1860 r. [11][12], przyczyniły się do empirycznej walidacji równań na zmniejszenie wahań temperatury gruntu w kierunku głębokości oraz na opóźnienie fazowe.

Ze względu na rozkład temperatury gruntu Popiel i in. rozróżnili trzy strefy [13]:

- strefa powierzchniowa sięgająca głębokości 1 m, w której temperatura gruntu jest bardzo wrażliwa na krótkotrwałe zmiany warunków pogodowych;
- strefa płytka rozciągająca się do głębokości około 1 – 8 m (dla gleb suchych, lekkich) lub 20 m (dla gleb wilgotnych, ciężkich, piaszczystych), gdzie temperatura gruntu jest prawie stała i zbliżona do średniej rocznej temperatury powietrza zewnętrznego; w tej strefie rozkład temperatury gruntu zależy głównie od sezonowych warunków pogodowych;
- strefa głęboka (poniżej około 8-20 m), w której temperatura gruntu nie podlega wahaniom sezonowym i bardzo powoli rośnie wraz z głębokością, zgodnie z gradientem geotermalnym.

Systemy wykorzystujące energię, zarówno w celach grzewczych jak i chłodniczych, zawartą w płytkich warstwach skorupy ziemskiej wyposażone są zazwyczaj w pompa ciepła. Wczesna wizja takiej maszyny służącej zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia została przedstawiona już w 1853 r. przez Thomsona [14]. Praktyczne zastosowanie tych procesów termodynamicznych przypada na drugą połowę XIX w. [6]. 13 lutego 1912 r. Heinrich Zoelly zgłosił patent, w którym opisano gruntowe źródło ciepła (GPC). Pierwsze zastosowanie takiego urządzenia (GPC) szacuje się na lata 30 XX w. [6].

Najważniejszymi elementami gruntowej pompy ciepła (jak w przypadku innych typów PC) są: parownik, skraplacz, sprężarka, zawór rozprężny oraz krążący w nich czynnik chłodniczy – najczęściej R410A. Schemat budowy urządzenia przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1 Schemat budowy pompy ciepła

Gdy instalacja gruntowej pompy ciepła wykorzystywana jest do celów grzewczych, ciepło pobrane z dolnego źródła ciepła – gruntu, dostarczane jest do parownika pompy ciepła, w którym czynnik chłodniczy przejmie energię cieplną i rozpoczyna się cykl sprężania pary. Efektem pracy sprężarki jest wzrost ciśnienia i temperatury czynnika chłodniczego, który następnie trafia do skraplacza, gdzie oddaje zakumulowaną energię cieplną do instalacji centralnego ogrzewania. Ostatnim etapem termodynamicznego cyklu pracy pompy ciepła jest rozprężanie czynnika chłodniczego na zaworze rozprężnym. Aby cykl mógł przebiegać poprawnie konieczne jest doprowadzenie energii elektrycznej do sprężarki. Możliwe jest również wykorzystanie pompy ciepła do chłodzenia, dzięki tzw. rewersyjnym pompom ciepła, które odwracają swój cykl pracy i transportują energię z instalacji wykorzystywanej do chłodzenia do gruntu. Istnieją dwie możliwości chłodzenia budynków przy użyciu gruntowej pompy ciepła: chłodzenie aktywne (w pompach rewersyjnych przy użyciu sprężarki) oraz pasywne (z zastosowaniem dodatkowego wymiennika ciepła – wówczas jedyną energią dostarczoną w procesie jest energia elektryczna niezbędna do napędu pomp obiegowych).

Istnieją dwa podstawowe systemy gruntowych wymienników ciepła, stosowanych do pozyskiwania energii z gruntu: otwarty i zamknięty. W systemach otwartych cyrkulującym (transportującym ciepło) czynnikiem jest woda gruntowa. W systemach zamkniętych – za transport ciepła odpowiada czynnik roboczy cyrkulujący w zamkniętej pętli. Pętla wymiennika ciepła wykonana jest z trwałego materiału umożliwiającego efektywną wymianę ciepła. Płyn krążący w pętli to najczęściej nietoksyczny, bezpieczny dla środowiska roztwór o niskiej temperaturze krzepnięcia. Możliwe jest również zastosowanie czystej wody, co powoduje obniżenie całkowitych kosztów eksploatacji GWC, wymaga jednak dodatkowego zabezpieczenia układu przed zamarzaniem [15]. Całkowita długość gruntowego wymiennika ciepła zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj zastosowanej konfiguracji pętli, obciążenie grzewcze budynku, strefa klimatyczna i innych [16].

Systemy zamknięte można sklasyfikować jako poziome oraz pionowe [17]. W wymiennikach poziomych rury umieszczone są na głębokości około 2 m, pod strefą przemarzania gruntu. Typowa pętla pozioma ma 35 – 60 m na 1 kW mocy grzewczej lub chłodniczej [17]. Szacuje się, iż taka konfiguracja systemu pozyskiwania energii cieplnej jest najbardziej opłacalną, gdy dostępna jest wystarczająca ilość miejsca pod budowę wymiennika. Zasadniczo, wymienniki poziome są

najłatwiejsze do zainstalowania na etapie budowy budynku. Istnieją jednak nowoczesne systemy, które umożliwiają wiercenie poziome, przy minimalnym naruszeniu górnej warstwy gleby, a nawet pozwalają na instalowanie pętli pod istniejącymi budynkami lub podjazdami. W celu zmniejszenia wymaganej powierzchni terenu pod budowę wymiennika opracowuje się nowe kształty wymienników tworzących spirale. Dla wymienników poziomych głównym źródłem ciepła jest padające na powierzchnię terenu promieniowanie słoneczne. Dlatego ważne jest, aby jeśli jest to możliwe nie ograniczać ilości docierającego do powierzchni gruntu promieniowania słonecznego.

Najczęściej stosowanym pionowym typem wymiennika jest sonda gruntowa, składająca się z dwóch równoległych rur połączonych na końcach, potocznie zwana u-rurą. Średnica odwiertu, w którym zamontowany jest gruntowy wymiennik ciepła wynosi zazwyczaj od 110 do 150 mm. Całkowita długość pojedynczego wymiennika zwykle nie przekracza 100 m, ze względu na konieczność spełnienia prawnych uwarunkowań związanych z wykonaniem odwiertów o większych głębokościach (opisanych szczegółowo w pkt. 1.4.2). Po wykonaniu odwiertu, umieszczana jest w nim sonda u-kształtna wykonana z tworzywa sztucznego (polietylenu), a wolna przestrzeń wypełniana jest masą uszczelniającą, zwykle mieszanką na bazie bentonitu. Wypełnienie odwiertu mieszanką na bazie bentonitu zapewnia odpowiedni poziom wymiany ciepła pomiędzy gruntem a wymiennikiem, zabezpiecza przed ewentualnym przedostaniem się czynnika roboczego do wód gruntowych oraz mechanicznym uszkodzeniem wymiennika.

Ponieważ warunki klimatyczne wpływają istotnie na profil temperatury w strefie powierzchniowej i płytkiej, systemy pionowych pętli gruntowych wymienników ciepła wykazują dużą przewagę względem wymienników poziomych, ze względu na możliwość wykorzystania energii zawartej w głębokich warstwach gruntu (charakteryzujących się większą stabilnością temperatury).

1.3. Pionowe gruntowe wymienniki ciepła

Pionowe wymienniki ciepła (GWC) zwane również sondami gruntowymi, są szeroko stosowane ze względu na niezawodność i wysoką wydajność wynikającą z charakterystyki systemu. Pętle pionowe są zwykle droższe inwestycyjnie, jednak gwarantują bardziej stabilną pracę, oczywiście tylko w przypadku ich prawidłowego zaprojektowania. Zapewniają dużą moc przy stosunkowo niewielkiej powierzchni i nie wprowadzają niedogodności w zakresie zagospodarowania terenu. Badacze od lat pracują nad rozwiązaniami konstrukcyjnymi pionowych wymienników ciepła [18]. Obecnie najbardziej popularne są sondy u-kształtne. Możliwe jest łączenie sond w podwójne lub potrójne zestawy. Innym typem są wymienniki koncentryczne lub współosiowe, w których rury o mniejszej średnicy umieszczone są w rurze o większej średnicy (również w bardziej skomplikowanych konfiguracjach).

Istnieje szereg parametrów wpływających na proces wymiany ciepła w GWC. Przewodzenie ciepła w gruntowym wymienniku, pomiędzy krążącym płynem a gruntem jest w rzeczywistości bardzo skomplikowanym procesem. Jak zapisano równaniem (1), całkowity opór cieplny takiego wymiennika (R) składa się z oporu cieplnego pomiędzy płynem a wewnętrzną powierzchnią rury (R_f), oporu cieplnego rury (R_r), całkowitego oporu materiału wypełniającego odwiert (R_b) oraz oporu cieplnego gruntu (R_g).

$$R = R_f + R_r + R_b + R_g, [\text{mK/W}] \quad (1)$$

Jak można zauważyć całkowity opór występujący w procesie wymiany ciepła w gruntowym wymienniku zależy od czterech składowych, z których na trzy wpływ ma projektant (parametry płynu, rury oraz wypełnienia odwiertu), a czwarta jest od niego niezależna (parametry gruntu otaczającego wymiennik), wymaga jednak uważnego zdiagnozowania. Należy więc mieć na uwadze, iż prawidłowe określenie parametrów gruntu, zaprojektowanie wymiennika, dobór odpowiednich materiałów i wykonanie wymiennika mają wpływ na proces wymiany ciepła pomiędzy płynem pośredniczącym a gruntem.

Płyn stosowany w GWC jest najczęściej mieszaniną wody oraz substancji o niskiej temperaturze krzepnięcia. Celem projektanta jest dobór rodzaju czynnika oraz odpowiedniej prędkości przepływu. Opór cieplny pomiędzy płynem a wewnętrzną powierzchnią rury (R_f) opisuje zależność:

$$R_f = \frac{1}{k_f 2\pi r_{wew}} \quad (2)$$

Opór ten zależy więc w głównej mierze od wartości współczynnika przejmowania ciepła między płynem pośredniczącym a powierzchnią rury (k_f), oraz wewnętrznego promienia rury (r_{wew}). Współczynnik przejmowania ciepła zależy jest od prędkości przepływu czynnika roboczego. Aby obniżyć opór cieplny występujący pomiędzy płynem a wewnętrzną ścianą wymiennika należy zwiększyć przepływ objętościowy płynu. Dlatego zwykle pożądane jest utrzymanie przepływów w obszarze turbulentnym, co jednocześnie spowoduje wzrost liczby Nusselta, a w konsekwencji zapewni wysoki współczynnik przejmowania ciepła i niski opór cieplny. Niewielka konwekcja po stronie płynu, w stanie przepływów laminarnych, może powodować znaczny wzrost oporu cieplnego i negatywnie wpłynąć na proces wymiany ciepła. Zmniejszenie prędkości płynu spowoduje również wzrost różnicy temperatur między wlotem a wylotem z GWC oraz zmniejszenie strat ciśnienia.

Opór cieplny rury wymiennika (R_r) opisuje zależność:

$$R_r = \frac{\ln(r_{zew}/r_{wew})}{2\pi\lambda_r} \quad (3)$$

Jak widać opór cieplny rury zależy głównie od właściwości cieplnych materiału, z którego jest wykonana oraz jej konstrukcji (stosunku średnic wewnętrznej i zewnętrznej). Badania pokazują, iż opór cieplny rury może być pomijalny dla relatywnie wysokich wartości przewodności cieplnych materiału (większych niż 2 W/(mK)) [3]. Możliwe jest zastosowanie różnych rodzajów materiałów w obu rurach sondy (zasilającej i powrotnej) w celu ograniczenia zaburzeń termicznych wynikających z wymiany ciepła między nimi [3]. Najczęściej wykorzystywane rury w GWC wykonane są z polietylenu (PE-Xa/HDPE) o współczynniku przewodzenia ciepła wynoszącym $0,3 - 0,7 \text{ W/(mK)}$. Sondy u-kształtne mają średnicę 32, 40, 50 mm. Głowica sondy i elementy połączeniowe, wykonane są z tworzywa sztucznego (polietylenu) lub stali szlachetnej odpornej na korozję. Zwiększenie przewodności cieplnej rury (np. poprzez połączenie polietylenu z drutami z aluminium bądź miedzi) wpływa na intensywność wymiany ciepła między krążącym płynem a gruntem.

Istotny wpływ na proces wymiany ciepła w GWC mają parametry materiału oraz jakość wykonania wypełnienia. Całkowity opór cieplny materiału wypełniającego składa się z oporów przejmowania (kontaktowych) rura - materiał wypełniający (bentonit) (R_{r-b}), materiał

wypełniający – grunt (R_{b-g}) oraz z oporów samego materiału wypełniającego (R_b). Opór przyjmowania ciepła opisuje następująca zależność:

$$R_{kontakt} = \frac{\ln(r_{kontakt} + \delta_{przeźreni}/r_{kontakt})}{2\pi\lambda_{przeźreni}} \quad (4)$$

W równaniu $r_{kontakt}$ jest promieniem powierzchni, na której występuje opór kontaktowy, $\delta_{przeźreni}$ szerokością przestrzeni, a $\lambda_{przeźreni}$ współczynnikiem przewodzenia ciepła materiału wypełniającego przestrzeń. Opory kontaktu zależą przede wszystkim od jakości wypełnienia otworu. W Szwecji popularną praktyką jest pozostawienie odwiertu bez wypełnienia – wówczas przestrzeń pomiędzy rurą a gruntem wypełnia woda gruntowa. W takim przypadku przyjmuje się, iż opory kontaktu równe są 0 [mK/W] [3]. W Europie najczęściej, ze względu na ochronę wód podpowierzchniowych, odwierty wypełnia się mieszanką na bazie bentonitu. Przy bardzo starannym pompowaniu wypełnienia od dołu do góry, możliwe jest osiągnięcie wartości 0 [mK/W] lub bliskiej zeru. W przypadku gorszej jakości wypełnienia opory te wzrastają do 0,02 – 0,03 [mK/W] [19].

Opór cieplny materiału wypełnienia zależy od jego współczynnika przewodzenia ciepła. Najczęściej stosowanym materiałem wypełniającym jest mieszanina bentonitu i cementu o różnych parametrach termicznych i wytrzymałościowych. Materiały ulepszone termicznie, mrozo odporne, charakteryzują wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła, wynoszącym $\lambda_b = 2,0 \text{ W/(mK)}$, ale również wyższą ceną jednostkową w porównaniu do materiałów o gorszych właściwościach, $\lambda_b = 1,0 \div 1,5 \text{ W/(mK)}$. Z uwagi na koszty inwestycyjne, odwierty wypełnia się również zaprawą z dodatkiem piasku kwarcowego lub samym piaskiem kwarcowym. W zależności od poziomu nasycenia wodą, wypełnienie na bazie piasku kwarcowego może charakteryzować się szerokim zakresem współczynnika przewodzenia ciepła od 0,35 W/(mK) dla piasku suchego, do 2,3 W/(mK) dla piasku nasyczonego wodą [20].

Pahud i Matthey [21] badali wpływ konstrukcji wymiennika na opór cieplny odwiertu. Badane przez nich odwierty różniły się między sobą materiałem wypełniającym oraz zastosowaniem lub pominięciem elementów dystansowych. Analizowali oni wypełnienie odwiertu standardową mieszaniną bentonitu i cementu z dodatkiem piasku kwarcowego lub samym piaskiem kwarcowym. Wykazali, że wypełnienie odwiertu nasyconym piaskiem kwarcowym oraz zastosowanie przekładek dystansowych powoduje zmniejszenie oporu cieplnego nawet o 30%.

Oprócz charakteryzowania się odpowiednią wartością współczynnika przewodzenia ciepła, materiał wypełniający powinien być wytrzymały na rozciąganie oraz skurczanie, wywołane przez naprężenia wynikające z wahań temperatury w GWC, mogące prowadzić do awarii wymiennika. Na zwiększenie naprężeń termicznych mają również wpływ gęstość gruntu otaczającego wymiennik oraz niższa przewodność cieplna wypełnienia. W związku z czym, obciążenie grzewcze i chłodnicze wymiennika powinno być zaplanowane w taki sposób, aby spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości mechanicznej GWC. [22]. Ważne jest zatem uważne projektowanie, uwzględnienie konieczności bilansowania energii pobranej i dostarczonej z/do gruntu oraz dostosowanie parametrów instalacji do wytrzymałościowych właściwości materiałów, z których jest wykonany wymiennik.

Opór cieplny gruntu jest najbardziej złożonym i trudnym do określenia oporem w procesie wymiany ciepła w gruntowym wymienniku. Jego wartość jest zmienna w czasie i decyduje o wydajności sondy gruntowej. W warunkach ustalonych, cylindryczne równanie oporów ciepła w gruncie jest funkcją jego przewodności cieplnej:

$$R_g = \frac{\ln(r_g/r_b)}{2\pi\lambda_g} \quad (5)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła λ_g [$W/(mK)$] definiowany jest przez ilość energii Q [W] przepływającej przez jednostkę powierzchni A [m^2] w jednostce czasu t [s], a przepływ wywołany jest gradientem temperatury (ΔT).

$$\lambda_g = \frac{Q}{At(\Delta T)} \quad (6)$$

W warunkach stanu ustalonego jednostkowy strumień ciepła przez ośrodek gruntowy, będący wielkością wektorową definiuje prawo Fouriera:

$$q = -\lambda_g \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (7)$$

Dla odwiertu o promieniu r_b jednostkowy przepływ ciepła q [W/m] można opisać dla ściany odwiertu (granicy pomiędzy odwiertem oraz początkiem gruntu $r \approx r_{odw}$) poprzez przemnożenie równania (7) przez obwód odwiertu $2\pi r_{odw}$, co wyraża równanie (8), gdzie $\frac{\partial T}{\partial r}$ jest gradientem temperatury gruntu na granicy odwiertu.

$$q = \lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} /_{r \approx r_{odw}} \cdot 2\pi r_{odw} \quad (8)$$

Innymi ważnymi parametrami opisującymi zdolność gruntu do transportowania ciepła jest pojemność cieplna C_g [J/m^3K] oraz zdolność gruntu do wyrównywania się temperatur, nazywana dyfuzyjnością cieplną α_g [m^2/s], będąca ilorazem przewodności cieplnej oraz objętościowej pojemności cieplnej:

$$\alpha_g = \frac{\lambda_g}{C_g} \quad (9)$$

Dyfuzyjność cieplna ma przede wszystkim wpływ na zdolność gruntu do szybkich zmian temperatury, a w konsekwencji do wyrównywania się temperatur. Największy wpływ na zmianę dyfuzyjności cieplnej gruntu ma zawartość wody. Po przekroczeniu charakterystycznego dla danego ośrodka gruntowego poziomu zawartości wody, prędkość wzrostu współczynnika przewodzenia ciepła znacząco maleje, przy czym intensywność wzrostu pojemności cieplnej pozostaje bez zmian. Wobec czego, maksymalna wartość dyfuzyjności cieplnej ośrodka gruntowego zostaje osiągnięta przy charakterystycznym dla danego gruntu poziomie wilgotności [23]. Charakterystyczną dla wielofazowego ośrodka gruntowego sekwencję wartości współczynnika przewodności cieplnej można opisać zależnością [24]:

$$\lambda_p \leq \lambda^{dry} \leq \lambda_w \leq \lambda^{sat} \leq \lambda_s \quad (10)$$

Powyzsza zależność opisuje sekwencję przewodności cieplnej gruntu dla poszczególnych składników ośrodka gruntowego: p –powietrze, w –woda, s –szkielet gruntowy. Indeksy górne opisują stan nasycenia ośrodka gruntowego: sat –nasycony, dry –suchy.

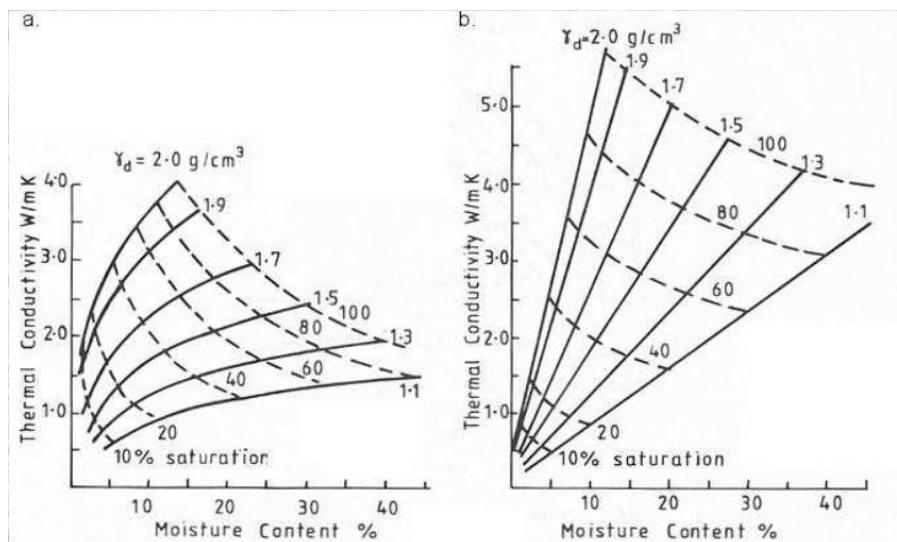
Tabela 1 Parametry termiczne poszczególnych składników złożonego ośrodka gruntowego (na podstawie [24]).

Materiał / składnik	Gęstość ρ [g/cm^3]	Pojemność cieplna C [$10^3 J/(kgK)$]	Przewodność cieplna λ [$W/(mK)$]	Dyfuzyjność cieplna α [$10^{-7}(m^2/s)$]
Woda (20°C)	1,0	4,19	0,60	1,42
Powietrze (20°C)	0,00125	1,00	0,025	0,21
Lód (0°C)	0,917	2,04	2,25	12,0
Kwarc	2,65	0,73	7,69-8,40	43,0
Pozostałe materiały*	2,65	0,73	2,90	15,0
Materia organiczna*	1,30	1,93	0,25	1,0

*wartość średnia

Jak pokazano w powyższej tabeli 1 sekwencja przewodności cieplnej opisana w równaniu (10) wynika z bardzo dużych rozbieżności charakterystyki cieplnej poszczególnych składników złożonego ośrodka gruntowego. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła powietrza jest o rząd wielkości niższa niż wody, co za tym idzie przewodność cieplna gruntu suchego będzie dużo niższa niż nasyconego. Wartość przewodności cieplnej gruntu suchego zwykle nie przekracza 0,5 W/(mK), a transport ciepła w gruncie suchym zwykle odbywa się przez kontakt międzyziarnowy [24]. Przewodność cieplna w gruncie suchym zależy głównie od wielkości oraz ułożenia ziaren. Duży wpływ na przewodność cieplną gruntu ma wypełnienie przestrzeni między ziarnami wodą. W przypadku gruntu w pełni nasyconego, współczynnik przewodzenia ciepła wzrasta i mieści się między wartościami współczynnika przewodności cieplnej szkieletu gruntowego i wody [24]. Prowadzi to do wniosku, iż zawartość wody jest czynnikiem silnie wpływającym na wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Jak widać w powyższej tabeli współczynnik przewodzenia ciepła wody jest 24 krotnie większy niż powietrza, w rezultacie dla gruntu nasyconego wodą może być on o rząd wielkości wyższy niż gruntu suchego. Należy również podkreślić, iż intensywność wzrostu przewodności cieplnej gruntu wraz z zawartością wilgoci będzie zależna od grubości ziaren. Grunty gruboziarniste charakteryzują się intensywnym wzrostem przewodności cieplnej wraz z zawartością wilgoci. Dla gruntów drobnoziarnistych zależność ta nie jest tak znacząca [24]. Niezależnie od poziomu nasycenia, grunty gruboziarniste mają większą przewodność cieplną od gruntów drobnoziarnistych, ze względu na ich skład mineralogiczny (głównie zawartość kwarcu). Wobec czego im więcej minerałów (kwarcu, dolomitu, chlorytu, magnetytu itd.) w szkielecie gruntowym, tym większa jego przewodność cieplna jako wielofazowego ośrodka gruntowego [25]. Skład mineralogiczny jest więc obok poziomu nasycenia najważniejszym czynnikiem mającym wpływ na przewodność cieplną gruntu.

Zasadniczo możliwe jest określenie przybliżonej wartości przewodności cieplnej poszczególnych warstw gruntu, a tym samym średniej wartości przewodności cieplnej całego odwiertu, na podstawie znajomości profilu geologicznego ośrodka gruntowego. W literaturze dostępny jest szereg wartości współczynników przewodzenia ciepła poszczególnych typów gruntu, najczęściej jednak w funkcji zawartości wilgoci (rysunek 2).



Rysunek 2 Nomogramy Johansena (1975) do wyznaczania współczynnika przewodnictwa ciepłego na podstawie gęstości, oraz wilgotności dla gruntów o współczynniku przewodnictwa ciepłego szkieletu ziarnowego; a – niezamarznięty grunt gruboziarnisty, b – zamarznięty grunt gruboziarnisty [26]

W Tabeli 2 przedstawiono właściwości fizyczne wybranych rodzajów gruntu. Różnice pomiędzy wartościami minimalnymi oraz maksymalnymi związane są głównie z zawartością wilgoci w danym ośrodku gruntowym. Zestawienia tabelaryczne często służą do interpretacji wyników odwiertu pilotażowego opisanego szerzej w punkcie 1.5.1 niniejszej pracy.

Tabela 2 Przewodność cieplna, objętościowa pojemność cieplna oraz dyfuzyjność cieplna dla różnych rodzajów gruntu (na podstawie [27])

Rodzaj gruntu	λ_g [W/(mK)]			C_g [MJ/(m ³ K)]	α_g [10 ⁶ (m ² /s)]		
	Min.	Średnia	Maks.		Min.	Średnia	Maks.
Bazalt	1,30	1,70	2,30	2,60	0,50	0,65	0,88
Łupek zielony	2,00	2,60	2,90	2,90	0,69	0,90	1,00
Gabro	1,70	1,90	2,50	2,60	0,65	0,73	0,96
Granit	2,10	3,40	4,10	3,00	0,70	1,13	1,37
Perydotyt	3,80	4,00	5,30	2,70	1,41	1,48	1,96
Gnejs	1,90	2,90	4,00	2,40	0,79	1,21	1,67
Marmur	1,30	2,10	3,10	2,00	0,65	1,05	1,55
Łupek mikowy	1,50	2,00	3,10	2,20	0,68	0,91	1,41
Łupek osadowy	1,50	2,10	2,10	2,50	0,60	0,84	0,84
Wapień	2,50	2,80	4,00	2,40	1,04	1,17	1,67
Łupek ilasty	1,50	2,10	3,50	2,30	0,65	0,91	1,52
Kwarcyt	3,60	6,00	6,60	2,20	1,64	2,73	3,00
Sól	5,30	5,40	6,40	1,20	4,42	4,50	5,33
Piaskowiec	1,30	2,30	5,10	2,80	0,46	0,82	1,82
Iły	1,10	2,20	3,50	2,40	0,46	0,92	1,46
Żwir suchy	0,40	0,40	0,50	1,60	0,25	0,25	0,31
Żwir nasycony	1,80	1,80	1,80	2,40	0,75	0,75	0,75
Piasek suchy	0,30	0,40	0,66	1,60	0,19	0,25	0,34
Piasek nasycony	1,70	2,40	5,00	2,90	0,59	0,83	1,72
Gлина sucha	0,40	0,50	1,00	1,60	0,25	0,31	0,62
Gлина nasycona	0,90	1,70	2,30	3,40	0,26	0,50	0,68

1.4. Wymiarowanie pionowych gruntowych wymienników ciepła

1.4.1. Podstawowe zasady projektowania pionowych GWC

Celem projektantów pionowych gruntowych wymienników ciepła jest dobór minimalnej jego długości tak, aby zapewnić niezbędny poziom wydajności systemu. Podstawowymi danymi wejściowymi do projektowania są: właściwości termiczne gruntu, rozmieszczenie odwiertów, obciążenie pompy ciepła oraz konstrukcja wymiennika. Projekt obejmuje takie informacje jak: średnica odwiertu, konfiguracja wymiennika (pojedyncza/podwójna u-rura), położenie rur i właściwości termiczne wypełnienia odwiertu. Po ustaleniu konstrukcji wymiennika, projektant dobiera odpowiednią jego wielkość zwiększając głębokość lub ilość odwiertów. Poniższe punkty (1.4.2 – 1.4.3) zostały opracowane m.in. na podstawie „Wytycznych projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła. Część 1”, które są pierwszą na polskim rynku usystematyzowaną pozycją wydawniczą zawierającą zbiór informacji niezbędnych do prawidłowego projektowania, wykonania i odbioru instalacji z gruntowymi pompami ciepła. Jednocześnie stanowią one pogląd na zakres regulacji Polskiego prawa w odniesieniu do wykorzystania energii zawartej w płytkich warstwach gruntu [28].

System pozwalający na przekazywanie energii cieplnej z gruntu do budynku obejmuje pole odwiertów (pionowe wymienniki ciepła – sondy gruntowe) oraz pompę ciepła, spełniające wymagania grzewcze i chłodnicze obiektu. Pole odwiertów składa się z n liczby odwiertów o długości H , oddalonych od siebie dystansem B . Całkowita długość odwiertów wynosi L , wyznaczona jest przez $n \times H$. Odwierty mają promień r_{odw} i zwykle składają się z dwóch połączonych rur w kształcie litery ‘u’ o przewodności cieplnej λ_r , średnicy zewnętrznej rury r_{zew} oraz średnicy wewnętrznej r_{wew} . Odwiert zwykle wypełniony jest materiałem uszczelniającym o przewodności cieplnej λ_b i pojemności cieplnej C_b . Grunt charakteryzują wielkości takie jak przewodności cieplna λ_g , dyfuzyjność cieplna α_g i niezakłócona temperatura gruntu T_0 . Otwory są zwykle połączone równolegle. Zazwyczaj zakłada się, że temperatury na wlocie płynu i prędkości przepływu są takie same dla wszystkich otworów wiertniczych. Zakładając znikome zyski/straty ciepła w rurociągach między otworami wiertniczymi a pompą ciepła, wynikające z izolacji termicznej tych odcinków, temperatura wyjściowa pola odwiertów jest równa temperaturze na wlocie pompy ciepła T_{zas_PC} , a temperatura wyjściowa pompy ciepła jest równa temperaturze na wlocie otworu T_{pow_PC} . Natężenie przepływu w każdym otworze wiertniczym jest równe \dot{V}_f/n , gdzie \dot{V}_f jest to całkowite natężenie przepływu w polu odwiertów. W przypadku dostępnych na rynku pomp ciepła T_{zas_PC} może wynosić nawet -7°C w przypadku ogrzewania i nawet 45°C w przypadku chłodzenia. Jednak projektanci najczęściej planują systemy GWC tak, aby $T_{zas_PC} \geq 0^\circ\text{C}$ podczas ogrzewania i $T_{zas_PC} < 45^\circ\text{C}$ podczas chłodzenia. W przeciwieństwie do urządzeń HVAC, które są zwykle wymiarowane na podstawie warunków obciążenia szczytowego, wymiarowanie pola odwiertu musi uwzględniać historię termiczną dostarczania/odbioru ciepła do gruntu oraz czas, w którym rozpocznie się eksploatacja systemu [29].

1.4.2. Aspekty prawne

Instalacje gruntowych wymienników ciepła pracujące na potrzeby grzewcze budynków podlegają przepisom prawnym zawartym w ustawach:

- Prawo wodne (Dz.U. 2021 poz. 2233);
- Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2011 nr 163 poz. 981);
- Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2021 poz. 1973);
- Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. 2021 poz. 741);
- Ustawa o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. 2008 nr 199 poz. 1227).

Główny podział wymagań prawnych dotyczących projektowania i wykonywania gruntowych wymienników ciepła dotyczy głębokości oraz lokalizacji wymiennika. Wymagania te przedstawiono w poniższej tabeli 3.

Tabela 3 Zestawienie wymagań dotyczących procedur wykonywania GWC [28]

Głębokość otworu wiertniczego	Lokalizacja na obszarze górniczym	Projekt robót geologicznych	Plan ruchu zakładu górniczego
≤ 30m	nie	nie	nie
	tak	tak	nie
≤ 100m	nie	tak	nie
	tak	tak	tak
> 100m	niezależnie	tak	tak

Kolejne etapy projektowania i wykonywania GWC opisano poniżej.

- Opracowanie niezbędnej dokumentacji – projektu robót geologicznych oraz planu ruchu zakładu górniczego (jeżeli jest wymagany): zakres dokumentacji określają Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dn. 23.12.2020 (Dz.U. z 2020 r. poz. 2449) oraz inne dokumentacje geologiczne.
- Zgłoszenie projektu i zawiadomienie o przystąpieniu do robót określonych w PRG (robót wiertniczych): projekt ten podlega zgłoszeniu staroście. Rozpoczęcie robót może nastąpić jeżeli w terminie 30 dni od daty złożenia projektu, starosta nie zgłosił do niego sprzeciwu. Dla odwiertów o głębokości powyżej 100 m konieczne jest opracowanie planu ruchu zakładu górniczego, zgodnie z Prawem Geologicznym i Górniczym.
- Przeprowadzenie prac wiertniczych: wiercenia dokonywane są tylko przez osoby posiadające kwalifikacje określone w art. 50, 51, 53 i 112 Prawa Geologicznego i Górniczego, wchodzące w skład kierownictwa i dozoru ruchu zakładu górniczego.
- Sporządzenie dokumentacji: wyniki przeprowadzonych prac powinny być przedstawione i uzasadnione w dokumentacji geologicznej.

1.4.3. Szczegółowe wytyczne projektowania GWC

W praktyce, metody projektowania GWC są różne w zależności od mocy instalacji [30]. Na początku należy zaznaczyć, iż niezależnie od wielkości instalacji wytyczne PORT PC zalecają w procedurze projektowania, przy wykorzystaniu programów do obliczeń symulacyjnych uwzględnić dwa przypadki pracy [28]:

- krótkotrwały intensywny pobór energii z gruntu (np. praca przez 48 h z mocą znamionową w warunkach obliczeniowych),
- długotrwały pobór ciepła (ciągła praca pompy ciepła ze średnim obciążeniem).

Przeprowadzając te analizy należy uwzględnić graniczne wartości parametrów pracy instalacji tj. minimalną temperaturę roztworu glikolu, pozwalającą na pracę pompy ciepła.

W tabeli 4 przedstawiono podstawowe założenia dotyczące projektowania (przygotowywania ofert) małych, średnich i dużych systemów GWC.

Tabela 4 Zestawienie podstawowych założeń projektowych dla systemów GWC różnej wielkości

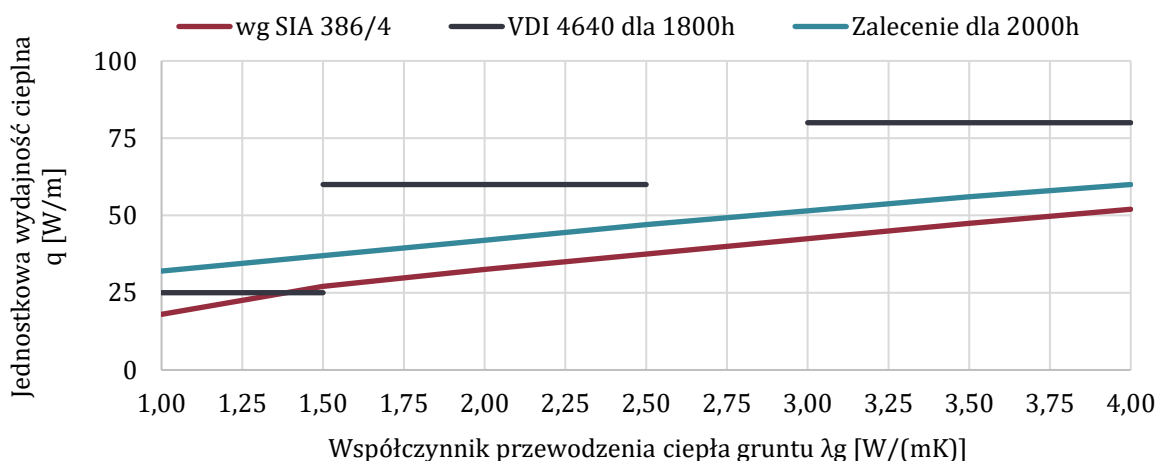
Wielkość instalacji pompy ciepła	Sposób oceny mocy jednostkowej odwiertu Sposób analizy pracy dolnego źródła pompy ciepła
Mała (do 30 kW)	<ul style="list-style-type: none"> – Nominalne warunki pracy: B0/W35. – Czas pracy sprężarki: < 2000h/rok. – Jednostkowa wydajność cieplna gruntowego wymiennika: 40W/mb. – Ilość ciepła pobranego z gruntu: < 80kWh/(m · rok). – Zalecenia: uproszczona analiza pracy systemu oraz wymiarowanie wymiennika na podstawie danych geologicznych.
Średnia (30-100 kW)	<ul style="list-style-type: none"> – Zalecenia: wykorzystanie oprogramowania bazującego na modelowaniu numerycznym lub innych narzędzi symulacyjnych.
Duża (powyżej 100 kW)	<ul style="list-style-type: none"> – Zalecenia: wyznaczenie przewodności cieplnej gruntu przy użyciu urządzenia pomiarowego do testu reakcji termicznej (TRT). – Zalecenia: modelowanie numeryczne pracy systemu dla czasu pracy instalacji wynoszącego co najmniej 50 lat.

Proste zasady projektowania opierają się o metody wskaźnikowe, które najczęściej sprowadzają się do wyznaczenia wymaganej długości odwiertu na podstawie szczytowego obciążenia grzewczego/chłodniczego oraz na podstawie jednostkowej wydajności cieplnej q [W/m]. Metody te są często wykorzystywane w projektowaniu małych systemów gruntowych pomp ciepła. Nie powinny być stosowane w przypadku większych instalacji GWC, gdzie występują m.in. interakcje pomiędzy odwiertami, spowodowane zaburzeniami termicznymi w gruncie i/lub niewielkimi odstępami między odwiertami. Metody takie, nie uwzględniają również oporu cieplnego odwiertów i rzeczywistych parametrów fizycznych gruntu. Metody wskaźnikowe powinny być wykorzystywane jedynie jako wstępne założenia do bardziej zaawansowanych metod projektowych. Producenci pomp ciepła oferują wiele danych tabelarycznych opisujących parametry gruntu służące do wskaźnikowego określenia wymaganej wielkości dolnego źródła projektowanej pompy ciepła. W tabeli 5 zestawiono przykładowe, proponowane przez producentów wartości jednostkowych uzysków ciepła z 1 m.b. odwiertu. Wartości te determinują wielkość dolnego źródła, stają się więc kluczowym elementem, z którego korzystają projektanci systemów zasilanych sondami pionowymi. Należy zwrócić uwagę, że wartości jednostkowego uzysku ciepła dla różnych typów gruntu, różnią się o ponad 100%. Brak podstawowych informacji na temat właściwości gruntu czy przepływu wody gruntowej, może prowadzić do doboru wielkości wymiennika nieadekwatnej do potrzeb instalacji.

Tabela 5 Jednostkowa wydajność cieplna różnych typów gruntu [34]

Rodzaj gruntu	q [W/m]
Żwir, piasek, gleba sucha	<20
Żwir, piasek, zawierające wodę	55-65
Gлина wilgotna	30-40
Wapień, (lity)	45-60
Piaskowiec	55-65
Magmatyty kwaśne (np. granit)	55-70
Magmatyty zasadowe (np. bazalt)	35-55
Gnejs	60-70

Nieco dokładniejsze obliczenia można wykonać w sytuacji, gdy znany jest profil geologiczny gruntu. Wówczas możliwe jest obliczenie średniej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g [W/(mK)]), która posłuży do wyznaczenia jednostkowego uzysku ciepła (q [W/m]). Dla małych systemów pomp ciepła, wykonanie odwiertu pilotażowego dla uzyskania dokładnej informacji o profilu geologicznym jest nieopłacalne. W przypadku braku danych na temat rodzaju gruntu w obszarze, którego dotyczy projekt instalacji, przyjęcie wartości współczynnika przewodzenia ciepła odbywa się na podstawie map geologicznych dostępnych np. w Centralnej Bazie Danych Geologicznych. Należy zwrócić uwagę, że taka metoda pozyskiwania danych daje bardzo niepewne wyniki. Brak precyzji w określeniu rzeczywistego rodzaju gruntu oraz jego wilgotności, może prowadzić do znaczących niedokładności w wyznaczeniu wartości współczynnika przewodzenia ciepła oraz jednostkowej wydajności cieplnej gruntu (q) [35]. Istnieją różne wytyczne opisujące zależność jednostkowej wydajności cieplnej (q) od wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g). Na rysunku 3, za publikacją [28], przedstawiono zależność $q = f(\lambda_g)$ podawaną przez normę SIA 386/4, wytyczne VDI 4640 (dla 1 800 godzin pracy dolnego źródła z pełną mocą) oraz zalecenia według B. Sannera (dla 2 000 godzin pracy dolnego źródła z pełną mocą).



Rysunek 3 Stosunek jednostkowej wydajności cieplnej do współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wg PORT PC [28]

Ponadto, do doboru wielkości gruntowego wymiennika ciepła dla instalacji o mocy > 30 kW zaleca się wykorzystanie oprogramowania pozwalającego na przeprowadzenie długofalowej symulacji pracy instalacji lub modelowania numerycznego. Programy symulacyjne pozwalają na wyznaczenie m.in. przebiegu zmian średniej temperatury płynu w dolnym źródle pompy ciepła

w kolejnych latach eksploatacji [30]. Na tej podstawie możliwe jest określenie najlepszej konfiguracji wymiennika, zapewniającej efektywną pracę systemu przez wiele lat. Należy mieć jednak na uwadze, że oprogramowanie przeznaczone do symulacji GWC wymaga wprowadzenia szeregu danych wejściowych dotyczących parametrów fizycznych gruntu oraz samego wymiennika. Ich określenie ma więc bezpośredni wpływ na wyniki analiz. W przypadku instalacji o mocy $> 100 \text{ kW}$ zaleca się przeprowadzenie testu odpowiedzi termicznej gruntu (TRT). Na podstawie analizy zarejestrowanych danych możliwe jest wyznaczenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu. Ponadto, dla dużych instalacji GWC zaleca się przeprowadzenie modelowania pracy systemu na okres co najmniej 50 lat. Zalecenia dotyczące projektowania małych instalacji można w tym przypadku wykorzystać jedynie do przygotowania wstępnych ofert.

1.4.4. Środowiskowe konsekwencje błędnego projektowania

Większość działalności człowieka ma zauważalny wpływ na środowisko. Podobnie jest z gruntowymi wymiennikami ciepła. Chociaż nie przeprowadzono wielu badań w zakresie wywierania wpływu na środowisko naturalne systemów geotermalnych, to zmiany temperatury najbliższego otoczenia wymiennika wskazują na istotny potencjał oddziaływania na otoczenie. Zmiany temperatury gruntu czy wzorców przepływu wody gruntowej mogą powodować niepożądany wzrost lub spadek temperatury w pobliskich ekosystemach. Przykładem mogą być zakłócenia wrażliwych na temperaturę etapów życia niektórych organizmów. Prowadzono badania dotyczące wydobycia kruszywa poniżej poziomu wody gruntowej, w których analizowano skutki zmian temperatury wody na rozwój pstrąga potokowego i bezkręgowców żyjących w wodzie [36]. Badania te wykazują bardzo wąski zakres tolerancji temperatur poszczególnych etapów rozrodczych tych organizmów. Ponadto badanie mikroorganizmów w warstwach wodonośnych gleby, w których występują zakłócenia termiczne wykazuje wzrost drobnoustrojów w próbkach warstw wodonośnych [37]. Co więcej, nawet jeśli nie zaobserwowano wzrostu liczby bakterii w próbkach to mogły występować zmiany w typach mikroorganizmów. Ponadto wykazano, że istnieje analogia między przepływem wody gruntowej a przepływem ciepła w ziemi i pod wieloma względami problem dystrybucji praw do energii pod powierzchnią jest podobny do praw do wody. Wskazane jest więc wdrożenie procedur zarządzania inwestycjami geotermalnymi w celu zapewnienia sprawiedliwego dostępu do energii płytkich warstw podpowierzchniowych. Szczególną uwagę tutaj należy zwrócić na oddziaływanie systemów między sobą [38][39][40][41]. Konieczne są więc badania wydajności systemu gruntowych wymienników ciepła i ich wpływu na środowisko pozwalające określić najlepszy sposób ich wykorzystania – zrównoważony dla środowiska naturalnego.

1.5. Testy in-situ odpowiedzi termicznej gruntu

1.5.1. Odwiert pilotażowy

Pierwszym etapem projektowania dużych instalacji gruntowych wymienników ciepła (GWC) jest, poza uzyskaniem niezbędnych pozwoleń, wykonanie odwiertu pilotażowego. Celem procesu jest ustalenie rzeczywistych właściwości hydrogeologicznych terenu objętego projektem. Odwiert pilotażowy jest najczęściej wykorzystywany w późniejszym etapie do wykonania testu

odpowiedzi termicznej (TRT), a następnie przeznaczany jest pod jeden z eksploatowanych wymienników ciepła.

Odwiert pilotażowy dostarcza wielu informacji na temat grup petrologicznych gruntu na terenie, na którym ma powstać instalacja. Są to ważne informacje, pomocne przy doborze odpowiedniej techniki wiercenia, jak i wyznaczenia przybliżonej przewodności cieplnej gruntu [42]. W 1989 r. National Rural Electric Cooperative Association, Oklahoma State University I International Ground Source Heat Pump Association wspólnie opublikowali książkę pt. "Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems — Field manual" [43]. W publikacji tej przedstawiono bardzo szeroki zakres przewodności cieplnej dla różnych rodzajów skały. Jednocześnie jednak zasugerowano, że identyfikacja rodzaju skały jest niewystarczająca do określenia jej przewodności cieplnej, gdyż istnieje silna zależność pomiędzy wartością przewodności cieplnej gruntu a jego wilgotnością, gęstością, występowaniem materii organicznej czy minerałów [44]. Dokładne określenie wartości przewodności cieplnej gruntu na podstawie wyników analizy odwiertu pilotażowego jest więc bardzo trudne. Stanowi on jednak ważny element w procesie projektowania dużych instalacji GWC. Pozwala również na przeprowadzenie testu odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) przed rozpoczęciem prac projektowych.

1.5.2. Thermal Response Test (TRT)

1.5.2.1. Rys historyczny

Głównym powodem późnego zainteresowania technologią gruntowych pomp ciepła (lata 80-te XX w.) był brak informacji mogących wspomóc projektowanie wielkości gruntowych wymienników ciepła. Dopiero, wywołany globalnym kryzysem energetycznym, wzrost zainteresowania tą technologią spowodował rozpoczęcie badań mających wspomóc projektantów systemów GWC w pozyskiwaniu potrzebnych danych wejściowych, zwłaszcza przewodności cieplnej gruntu. W warunkach laboratoryjnych powszechnie stosowaną metodą określenia przewodności cieplnej gruntu jest test polegający na wprowadzeniu do próbki gruntu niewielkiej wielkości sondy igłowej [24]. Ze względu na niewielkie wymiary sondy (średnica ok. 2,5 mm, długość ok. 10 cm) wprowadza się ją ręcznie, nie naruszając struktury badanej próbki. Sonda w swojej budowie zawiera element grzewczy (dostarczający stałą ilość energii cieplnej) oraz czujnik temperatury. Analizy danych dokonuje się poprzez dopasowanie modelu analitycznego do danych uzyskanych w trakcie badania [24]. Sposób określenia współczynnika przewodzenia ciepła z wykorzystaniem sondy igłowej został uregulowany i odpowiada procedurom zawartym w normach: IEEE 442 (2018) [45] oraz ASTM D5334-14 (2014) [46]. Na uwagę zasługuje fakt, iż procedura wykonywania testu w drugiej z wymienionych norm przewiduje, iż do określenia wartości przewodności cieplnej badanego ośrodka gruntowego powinno się wykorzystywać odczyty temperatury pochodzące z dwóch faz – fazy grzania oraz fazy chłodzenia (zakończenia wygrzewania). Dzięki takiej procedurze możliwe jest dokładniejsze określenie szukanych parametrów. Artykuł Mogensena z 1983 r., w którym zaproponował wykorzystanie całego odwiertu jako sondy igłowej i u-rury z krążącym w niej płynem jako liniowego źródła ciepła był punktem wyjścia do prac naukowców związanych z opracowaniem mobilnego urządzenia do przeprowadzania testów obecnie nazywanych testami odpowiedzi termicznej gruntu (*ang. Thermal Response Test - TRT*) [47].

Jeffrey Spitler oraz Signhild Gehlin w 2015 roku dokonali przeglądu prac poświęconych testom odpowiedzi termicznej gruntu, głównie z przełomu lat 80-tych i 90-tych, opisując rozwój pierwszych urządzeń do wykonywania TRT [48]. Pierwsze urządzenie zaproponowane przez Mogensena w 1983 r. [42] miało zapewnić stałą moc chłodniczą dzięki wykorzystaniu agregatu wody lodowej, pompy obiegowej oraz czujników temperatury. Celem opisanej przez niego metody było wyznaczenie oporu cieplnego odwiertu, jednak w swoim artykule wskazuje on, iż możliwe jest również wyznaczenie przewodności cieplnej gruntu na podstawie wyników uzyskanych w takim teście. Jego artykuł stał się punktem wyjścia dla naukowców, którzy rozpoczęli w połowie lat 90-tych budowę przenośnych stanowisk do wykonywania TRT. Kolejne testy wykonywane były już z założeniem wygrzewania odwiertu m.in. przez Hellstroma i Nordella [49]. W 1994 r. w Oklahoma State University przeprowadzono pierwszy niemobilny test TRT przy użyciu pompy ciepła [48]. Wyniki testu przeanalizowano wykorzystując model nieskończonego źródła liniowego (*ang. Infinite Line Source – ILS*), zasugerowanego przez Mogensena jako odpowiedniego do tego celu. Propozycję stanowiska opracowano jesienią i przedłożono National Rural Electric Cooperative Association w celu opracowania mobilnej jednostki do przeprowadzania testów *in situ*. W międzyczasie zespół przedstawił swoje plany firmie wiertniczej Ewbank and Associates (obecnie: Ewbank Geo Testing), która sfinansowała budowę pierwszej platformy testowej. Przeprowadzone dzięki platformie testy pozwoliły na dopracowanie i uszczegółowienia elementów składowych stanowiska [48]. Zespół Oklahoma State University zatrudnił doktoranta Treya Austina do pracy nad projektem urządzenia, które powstało wiosną 1996 r. i do końca roku przeprowadzono dzięki niemu 26 testów w Oklahomie, Teksasie i Dakocie Południowej [48]. Urządzenie wyposażone zostało w źródło ciepła składające się z trzech grzałek elektrooporowych o mocy 1, 1,5 i 2 kW. Umożliwiło to zmianę mocy dostarczanej do odwiertu w zakresie od 1 – 4,5 kW. Jednostkową ilość ciepła na metr odwiertu (dla odwiertów o długości całkowitej 80 m) można było dostosować w zakresie 0 – 55 W/m. Zastosowano typowe prędkości przepływu czynnika rzędu 0,16 dm³/s, wartość przepływu regulowano zaworem iglicowym. Dokonywano pomiaru temperatury, natężenia przepływu i zużycia energii, a wszystkie dane rejestrowano za pomocą przenośnego rejestratora danych w odstępach 2,5 minutowych. Jednocześnie rozwój TRT postępował w Szwecji, gdzie budowę stanowiska do przeprowadzania testów terenowych rozpoczął zespół studentów pod nadzorem Charlesa Eklöf i Signhild Gehlin. Platforma nazywała się TED 9 i została szczegółowo opisana w literaturze [50][51]. Zarówno amerykańskie, jak i szwedzkie stanowiska testowe umożliwiały dostarczenie stałej ilości ciepła do odwiertu i kontrolowanie temperatury krążącego płynu. Próbowano udoskonalić stanowiska poprzez zmniejszenie wahań napięcia dzięki zastosowaniu komercyjnego regulatora napięcia, jednak stwierdzono, iż ulepszenia te są niezadowalające. Straty ciepła ograniczano poprzez dokładną izolację przewodów. W 1997 r. prywatna firma Groenholland zbudowała pokazowe stanowisko do TRT, wyposażone w pompę ciepła, zbiornik buforowy i zawór kontrolny [52]. Testy stały się coraz bardziej popularne i zaczęto je wykonywać w innych krajach Europy.

1.5.2.2. Opis instalacji i procedura wykonywania TRT

Mobilne testy odpowiedzi termicznej stosowane są przede wszystkim do określenia dwóch wielkości: „efektywnej” przewodności cieplnej λ_{ILS} oraz „efektywnego” oporu cieplnego R_{odw} . Termin „efektywny” stosuje się ze względu na dużą niejednorodność gruntu, co opisano we

wcześniejszych częściach pracy. Ponadto, na przewodzenie ciepła w gruncie bardzo duży wpływ ma przepływ wody gruntowej oraz adwekcja [53][54][55][56][57][58][59]. Dlatego wyznaczone wartości zarówno przewodności cieplnej gruntu, jak i oporu cieplnego odwiertu nieuchronnie obejmują wpływ tych parametrów.

Sprzęt do wykonywania TRT powinien być wykonany w taki sposób, aby możliwe było jego łatwe transportowanie oraz bezpiecznie pozostawienie w miejscu wykonywania testu – zazwyczaj służą do tego lekkie przyczepy samochodowe. Podstawowa aparatura służąca do wykonania testu TRT składa się z grzałki elektrooporowej, czujników temperatury na zasilaniu i powrocie z odwiertu, przepływomierza, pompy obiegowej, zaworów i zabezpieczeń oraz rejestratora danych.

Ogólna procedura przeprowadzania testu odpowiedzi termicznej gruntu bazuje na tej zaproponowanej przez Mogensena w 1983 r. [42]. Test polega najczęściej na dostarczaniu stałej ilości energii cieplnej do odwiertu w określonym czasie. Zarejestrowany średni wzrost temperatury czynnika krążącego w wymienniku ciepła będzie bardziej stromy dla gruntów o niższym przewodnictwie cieplnym, ponieważ ciepło z otworów wiertniczych nie jest odprowadzane tak szybko, jak w przypadku wyższego przewodnictwa cieplnego. Aby uzyskać dokładną wartość parametrów gruntu, ważne jest prawidłowe ustawienie aparatury pomiarowej i minimalizacja wpływu zakłóceń zewnętrznych. Jest to łatwiejsze w przypadku ogrzewania gruntu (za pośrednictwem elektrycznych grzałek oporowych) niż w przypadku chłodzenia (za pośrednictwem pompy ciepła). Jednak, nawet przy ogrzewaniu rezystancyjnym, wahania napięcia w sieci mogą powodować wahania mocy cieplnej dostarczanej do gruntu. Innym źródłem odchylenia są warunki pogodowe, wpływające głównie na rury łączące urządzenie badawcze z GWC oraz na temperaturę wewnętrzną stanowiska badawczego. Stanowisko wymaga dobrej izolacji termicznej przewodów, a czasami konieczna jest klimatyzacja zabudowanego stanowiska badawczego, tak jak to miało miejsce w USA [60]. Na zakłócenia powstające w trakcie testu wpływa również wnikanie wody deszczowej, które może powodować zmiany mierzonej temperatury płynu. Dłuższy czas trwania testu umożliwia statystyczną korektę fluktuacji mocy i wpływu warunków pogodowych, a także daje bardziej wiarygodną ocenę wartości poszukiwanych parametrów. W planowaniu TRT należy dokonać kilku wyborów m.in. metody wyznaczenia niezakłóconej temperatury gruntu, doboru mocy źródła ciepła, prędkości przepływu cieczy oraz czasu trwania testu.

1.5.2.3. Niezakłócona temperatura gruntu

Niezakłócona temperatura gruntu nie jest potrzebna do wyznaczenia przewodności cieplnej gruntu, jednak wartość oporu cieplnego wymiennika jest na nią wrażliwa. Istnieje kilka metod pozwalających na wyznaczenie niezakłóconej temperatury gruntu. W zależności od możliwości technicznych należy wybrać taką, dzięki której wyniki pomiarów będą możliwie dokładne.

Podstawową metodą jest monitorowanie i uśrednienie temperatury krążącego w wymienniku płynu przed uruchomieniem urządzenia grzewczego. Metoda ta została zaproponowana przez Kavanaugh [60], a następnie zakwestionowana przez Gehlin i Nordella [61], którzy wykazali, iż podejście to może prowadzić do poważnych błędów, gdy stosowane jest w odwiercie zlokalizowanym w zimnej strefie klimatycznej. Doszli jednak do wniosku, iż dokonanie pomiarów w niewielkich interwałach czasowych może dać rozsądne wyniki. Uwzględniając prędkość przepływu czynnika przez wymiennik możliwe jest więc określenie temperatury na kolejnych

metrach głębokości odwiertu. W celu zmierzenia w ten sposób niezakłóconej temperatury gruntu, należy uważnie przestrzegać zachowania przepływów laminarnych.

W literaturze opisano ponadto wykorzystanie sond bezprzewodowych do pomiaru temperatury w GWC. Urządzenie takie porusza się wraz z przepływającym płynem przez u-rurę w trakcie prowadzenia testu [62]. Sondy wyposażone są w czujnik temperatury, a niektóre również w czujnik ciśnienia pozwalający na określenie głębokości, na której nastąpił pomiar temperatury [63]. Zdarzają się również sondy o tej samej gęstości, co krążący płyn, wówczas sonda porusza się z prędkością płynu, a tym samym na podstawie prędkości przepływu i wewnętrznej średnicy rury, można wyznaczyć temperaturę w danym punkcie pomiarowym [63]. Pomimo wszelkich zalet sond bezprzewodowych, to praktyczne ich wykorzystanie wymaga większej ilości przeprowadzonych eksperymentów [64][65].

Austin zalecał wyznaczanie niezakłóconej temperatury gruntu przy pomocy czujników zanurzeniowych, za pomocą których wykonywało się pomiar w równych odstępach czasowych i następnie uśredniało wynik [66]. Sanner i in. [67] zaproponowali ulepszony TRT (*ang. Enhanced Thermal Response Test - ETRT*). Rekomendują oni, by analizować wyniki pomiarów temperatury płynu na całej długości wymiennika. Również Fujii i in., oprócz pomiaru niezakłóconej temperatury gruntu, zaproponowali pomiar zmian temperatury wzdłuż GWC podczas całego testu. Miało to na celu określenie właściwości termicznych gruntu w funkcji głębokości oraz pionowego rozkładu przewodnictwa cieplnego gruntu [68]. Ponadto Rohner i in. [69] opisali małą bezprzewodową sondę, którą umieszcza się w wymienniku ciepła, wykonując pomiar niezakłóconej temperatury gruntu. Dzięki własnemu ciężarowi sonda opada na dno wypełnionej cieczą u-rury. Podczas opadania sonda rejestruje temperaturę i ciśnienie w ustalonych odstępach czasu. Następnie sondę wypłukuje się na powierzchnię za pomocą pompy.

Jedną z bardziej zaawansowanych metod stosowanych w TRT jest rejestracja temperatury za pomocą kabli światłowodowych. Jest ona oparta na metodzie rozproszonego pomiaru temperatury (*ang. Distributed Temperature Sensing - DTS*). Jednostka DTS wysyła impulsy laserowe przez światłowód podczas całego procesu pomiarowego, które powodują odbicie rozproszonego światła z powrotem do jednostki DTS [70][71]. Wykorzystując czujniki światłowodowe możliwy jest ciągły, liniowy pomiar temperatury wzdłuż odwiertu.

W ostatnich badaniach dotyczących początkowej temperatury gruntu, analizowano również wpływ gradientu geotermalnego na wynik TRT [72]. Gradient geotermalny jest różny w różnych regionach świata i zwykle zawiera się w zakresie od 0,5 do 3,0 K na 100 m. Aby przeanalizować wpływ początkowego rozkładu temperatury na wynik TRT, Wagner i in. [73] oszacowali przewodność cieplną gruntu i opór cieplny odwiertu w oparciu o sztuczne zbiory danych TRT generowane dzięki opracowanemu modelowi numerycznemu dla wymienników (podwójnej u-rury) zlokalizowanych w odwiertach o typowym gradiencie geotermalnym (0°C na 100 m do 5,2°C na 100 m). Wyniki ich badań pokazują, że gradient geotermalny może powodować niedoszacowanie wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu przy zastosowaniu metody opartej na ILS. Błąd ten może przekraczać 10% dla gradientu 5,2°C na 100 m. Jest to szczególnie ważne, gdy test prowadzony jest na obszarze o stosunkowo wysokim gradiencie geotermalnym [73]. Ponadto, wpływ na początkowy rozkład temperatury w gruncie mogą mieć inne systemy geotermalne, systemy kanalizacyjne lub ciepłownicze, szczególnie w obszarach miejskich.

1.5.2.4. Czas trwania TRT

Czas trwania testu stał się nieoczekiwanie jednym z najbardziej kontrowersyjnych tematów podjętych przez badaczy. Z założenia czas ten powinien zapewnić odpowiednią dokładność otrzymywanych wyników i być osiągalny ekonomicznie. Austin i in. zalecają, aby czas trwania testu pozwolił na osiągnięcie wymaganej dokładności powinien wynosić około 50 h [66]. Kavanaugh zalecił dużo krótszy czas 36 – 48 godzin, gdy w procesie wiercenia stosuje się duże ilości płuczki lub gdy odwiert wypełniony jest masą o niskiej przewodności cieplnej [74]. Czas 48 godzin jest uważany przez niektórych autorów publikacji za minimalny okres testowy [76]. Późniejsze prace wprowadziły zależności, które pozwalają na określenie wymaganego czasu trwania testu [75]. Dłuższy czas trwania testu umożliwia statystyczną korektę fluktuacji mocy i wpływu warunków klimatycznych, skutkiem czego pozwala na uzyskanie wyników obciążonych mniejszym błędem. Wraz z rosnącym wykorzystaniem komercyjnym TRT, pojawiła się jednak potrzeba skracania czasu trwania testu. Pożądany czas jego trwania wynosi ok. 12 h i wynika głównie z potrzeby obniżania kosztów energii elektrycznej oraz kwestii technicznych związanych z nadzorowaniem stanowiska w trakcie trwania pomiarów. Zasadniczo, istnieją jednak istotne ograniczenia w zakresie skracania okresu pomiarowego, ponieważ dla dokładnego wyznaczenia poszukiwanych parametrów (współczynnika przewodzenia ciepła gruntu i oporu cieplnego odwiertu) osiągnięty musi zostać stabilny przepływ ciepła w gruncie. W ciągu pierwszych kilku godzin zaś, na zmiany temperatury krążącego płynu wpływają głównie parametry fizyczne wymiennika (u-rury i wypełnienia), a nie otaczającego wymiennik gruntu. Do oceny minimalnego czasu trwania Eklöf i Gehlin zdefiniowali zależność [50]:

$$t_{min} = \frac{5r_{odw}^2}{\alpha_g} \quad (11)$$

Według autorów, najkrótszy czas trwania testu t_{min} jest stosunkiem promienia odwiertu r_{odw} oraz dyfuzyjności cieplnej gruntu ($\alpha_g = \lambda_g / \rho_g C_g$) wyznaczonej na podstawie oszacowanych wartości przewodności cieplnej, gęstości oraz pojemności cieplnej gruntu. Bujok i wsp. [56] badali wpływ czasu TRT na precyzję wyznaczania przewodności cieplnej gruntu i oporu cieplnego odwiertu. Wyniki pokazały, że średnia względna różnica przewodności cieplnej gruntu między pełnym czasem trwania (czyli 70 h) a skróconym (24 h) wyniosła 6,53%, a oporu cieplnego otworu wiertniczego 7,76%. Natomiast różnice wyników między badaniami trwającymi 60 godzin i 70 godzin wyniosły około 1%. Pomimo wielu badań, czas trwania testu nadal nie został precyzyjnie i jednoznacznie określony.

1.5.2.5. Moc źródła ciepła i przepływ czynnika w trakcie TRT

W procesie określania parametrów testowych należy zwrócić uwagę na konsekwencje wielkości dobranego przepływu płynu i mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu w trakcie TRT. Opory cieplne odwiertu zależą w dużej mierze od prędkości przepływu płynu. Zasadniczo uznaje się, iż wskazane jest utrzymanie prędkości przepływu płynu podobnych do stosowanych później, w trakcie eksploatacji systemu. Istotne jest również dobranie odpowiedniego poziomu ilości ciepła dostarczanego do odwiertu. Badacze Oklahoma State University (OSU) prowadzili eksperymenty z wieloma poziomami ilości energii, jednak nie znaleźli żadnej zauważalnej przewagi [48]. Należy dodatkowo rozważyć kwestię, czy test w warunkach wygrzewania czy chłodzenia gruntu jest bardziej odpowiedni, i który z nich daje dokładniejsze wyniki. Przewagą

przewodzenia testu na drodze wygrzewania gruntu jest znacznie mniej złożona konstrukcja sprzętu testowego, która wymaga wyposażenia w grzałkę rezystancyjną. Taka konstrukcja stanowiska ma pozytywny wpływ na niezawodność i kontrolę procesu. Teoretycznie pomiar przeprowadzony w trybie ogrzewania powinien dawać prawie takie same wartości jak pomiar przy chłodzeniu GWC, przynajmniej w gruncie, w którym dominuje przewodzący transfer ciepła.

W typowym TRT ciepło jest wytwarzane przez grzałkę elektryczną i oddawane do gruntu z prawie stałą szybkością, której rekomendowana moc powinna zapewniać jednostkowy strumień ciepła możliwie zbliżony do warunków późniejszej eksploatacji. W rzeczywistości problemy z uzyskaniem stałej mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu, wywołane są zmianami napięcia elektrycznego grzałki. Według wytycznych ASHRAE [77] akceptowalna stabilność mocy grzewczej w trakcie TRT uzyskiwana jest przy odchyleniu standardowym $\leq 1,5\%$ mocy średniej i maksymalnej zmienności (skokach) $\leq 10,0\%$ mocy średniej. Gdy odchylenia mocy w trakcie testu są większe, można uzyskać akceptowalne wyniki, jeżeli maksymalne odchylenie średniej temperatury płynu w pętli jest $\leq 0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dużym problemem są również przerwy w dostawie energii elektrycznej do zasilenia grzałki, awarie grzałki elektrycznej lub inne nieoczekiwane zdarzenia, które powodują przerwanie testu przed upływem wymaganego czasu trwania, wystarczającego do oszacowania przewodności cieplnej gruntu. Jeśli TRT zostanie ponownie uruchomiony natychmiast po usunięciu problemów technicznych, duże wahania energii dostarczanej do gruntu powodują problemy z analizą wyników. Większość metod analizy zakłada stałą temperaturę gruntu na początku testu, a założenie to jest nieważne, jeśli test zostanie ponownie uruchomiony przed upływem czasu potrzebnego do powrotu gruntu do stanu początkowego. W przypadku przerwania procedury testu, ASHARE [77] zaleca okres oczekiwania od 10 do 12 dni przed ponownym testowaniem (jeżeli upłynęło 48 godzin od jego rozpoczęcia). Interesujące podejście do analizy danych testów, w których wystąpiły przerwy w zasilaniu przedstawili w swojej pracy Luo i in. [78]. Autorzy zaproponowali metodę polegającą na dzieleniu zbioru danych na sekcje charakteryzujące się stałą mocą i wyznaczeniu na ich podstawie parametrów gruntu.

1.5.2.6. Ograniczenia i dokładność TRT

Badacze pracują nad określeniem wpływu wielorakich zakłóceń testu na jego wyniki [79]. Prowadzone są badania zarówno eksperymentalne [80][81], jak i bazujące na modelach numerycznych [82]. Oszacowanie błędu w interpretacji wyników testu jest zagadnieniem trudnym i złożonym, ponieważ wpływa na niego wiele czynników. Analiza wyników TRT z wykorzystaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (*ang. Infinite Line Source - ILS*), wymaga przestrzegania konkretnych założeń. Jeśli którekolwiek z nich nie zostało spełnione, uzyskane szacunkowe parametry gruntu (efektywna przewodność cieplna gruntu i opór cieplny odwiertu) mogą być obciążone istotnym błędem. Najważniejszym założeniem analizy danych modelem ILS jest to, że przewodzenie ciepła jest jedynym procesem transportu ciepła w GWC. Tak więc, w sytuacjach, w których występuje ruch wód gruntowych, założenie to jest nieprawdziwe, a analiza wyników modelem ILS obciążona jest dużym błędem [82][83][84][85][86][87]. W typowych testach stosuje się wygrzewanie GWC przy stosunkowo wysokich wartościach mocy ($>50\text{ W/m}$), wówczas może wystąpić zjawisko konwekcji indukowanej termicznie, co również unieważnia główne założenia tej metody analizy danych (ILS). Kolejne założenie dotyczy właściwości ośrodka gruntowego (przewodność cieplna, pojemność cieplna, temperatura

początkowa) – powinny być izotropowe i quasi-stałe przestrzennie. Wymiennik ciepła może być traktowany jako źródło liniowe, gdy pojemność cieplna odwiertu jest uznawana za stałą.

Badania prowadzone w ramach TRT, jak każde inne, obarczone są możliwością wystąpienia różnego rodzaju błędów. Są to: błędy pomiarowe, błąd niezachowania stałej mocy urządzenia grzewczego, zmiany warunków otoczenia lub nawet zmienny ruch wód gruntowych (np. wywołany przez opady atmosferyczne) [87]. Błąd pomiaru związany jest z precyzją czujników stosowanych w aparaturze TRT. Wpływa on na wartości rejestrowane podczas testu, a tym samym na dokładność szacowania parametrów gruntu. Na błąd estymacji parametrów gruntu z wykorzystaniem TRT wpływają również błędnie określone rzeczywista długość odwiertu i/lub parametry fizycznych wymiennika (tj. gęstość płynu, średnica otworu, pojemność cieplna płynu), które są szacowane lub pozyskiwane z innych źródeł (np. kart katalogowych producentów). Błędy te są poważne, ponieważ nie zmieniają się podczas eksperymentu, a wprowadzają błąd systematyczny. Bardzo ważnym zagadnieniem w analizie błędów estymacji parametrów gruntu jest oddziaływanie środowiska zewnętrznego, mające wpływ na straty ciepła z aparatury badawczej lub przeciwnie, jej nadmierne przegrzewanie. Wykazano, że największy wpływ na zakłócenia ma absorpcja promieniowania słonecznego [49]. Problem ten nie jest jednak nadal szeroko zbadany. Zaleca się stosowanie jasnego koloru materiału izolacyjnego i obudowy stanowiska oraz osłonięcie go namiotem baldachimowym. Przewody łączące odwiert ze stanowiskiem badawczym powinny być zaizolowane termicznie, a samo stanowisko powinno znajdować się możliwie blisko odwiertu. Ostatecznie, na wyniki estymacji parametrów gruntu wpływa błąd zastosowanego modelu interpretacji wyników. Nawet jeżeli analiza danych pomiarowych oraz sam test terenowy zostały przeprowadzone z najwyższą starannością, wynik (oszacowanie przewodności cieplnej gruntu i oporu cieplnego odwiertu) jest obciążony błędem wynikającym z założeń zastosowanego do interpretacji wyników modelu.

1.5.2.7. Praktyczne wytyczne dotyczące przeprowadzania TRT

Opisane poniżej wytyczne dotyczące przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) zostały opracowane przez grupę ekspertów IEA ECES w ramach porozumienia wykonawczego: Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage of the International Energy Agency [88]. Oprócz nich istnieją również inne, opracowane przez ASHRAE [77] lub IGSHPA [89] i innych [90]. Podstawowe wymagania dla TRT to:

- utrzymanie stałego obciążenia grzewczego;
- rejestracja temperatury płynu na wlocie i wylocie z wymiennika;
- minimalny czas trwania testu wynoszący około 50 h;
- interpretacja wyników testu zgodna z założeniami wykorzystywanej metody oceny parametrów.

Aparatura testowa powinna być wyposażona w grzałkę elektryczną z możliwością regulacji mocy grzewczej. Przepływ czynnika należy zapewnić poprzez dobór odpowiedniej pompy obiegowej. Ponadto, stanowisko należy wyposażyć w zawór regulacyjny, umożliwiający precyzyjny dobór wielkości natężenia przepływu oraz przepływomierz i czujniki temperatury kompatybilne z rejestratorem danych pomiarowych. Należy zainstalować odpowiednie urządzenia zabezpieczające obieg GWC przed przegrzaniem, utratą przepływu oraz nadmiernym wzrostem ciśnienia. Czujniki temperatury należy zamontować możliwie blisko wlotu i wylotu z odwiertu. Rozdzielczość czasowa zapisu danych pomiarowych powinna wynosić maksymalnie

10 minut. W celu ograniczenia wpływu strat ciepła do otoczenia oraz wyeliminowania wahań obciążenia cieplnego odwiertu, wymagana jest izolacja urządzeń i rurociągów. Zalecany jest również pomiar temperatury powietrza zewnętrznego w trakcie TRT. Stosowanie zdalnego systemu monitorowania danych pomiarowych, pozwala na stałą kontrolę parametrów testowych. Poza powyższymi zaleceniami dotyczącymi stanowiska TRT, podręcznik ASHRAE wprowadza dodatkowe wytyczne:

- dane geologiczne należy pozyskać w miejscowych, odpowiednich dla danego kraju urzędach;
- czas pomiędzy wykonaniem GWC a testem powinien być większy niż 5 dni;
- temperaturę należy mierzyć za pomocą czujników o dokładności $\pm 0,28$ °C;
- ilość energii dostarczanej do GWC należy mierzyć z dokładnością odczytu 2 %;
- długość przewodów łączących jednostką testową z GWC powinna być równa bądź mniejsza niż 1,2 m;
- rury oraz elementy hydrauliczne stanowiska powinny być zaizolowane termicznie w celu ograniczenia strat ciepła.

Na miejscu badania, aparatura TRT musi być szczelnie połączona z wymiennikiem ciepła, a rury łączące powinny być zaizolowane termicznie. Wymiennik ciepła i obieg urządzenia badawczego muszą być wypełnione czynnikiem roboczym, najlepiej wodą. Jeśli może wystąpić zamarzanie płynu, należy użyć mieszaniny przeciw zamarzaniu o znanej pojemności cieplnej i gęstości. Ważne jest, aby dokładnie usunąć całe powietrze uwięzione w płynie poprzez zainstalowanie odpowiedniego urządzenia do odpowietrzenia. Równie ważne jest zachowanie odpowiednich procedur w trakcie przeprowadzania testu. W tym samym czasie, gdy uruchamiana jest pompa obiegowa, należy rozpocząć rejestrację temperatury. Aby określić początkową, niezakłóconą temperaturę gruntu, możliwe są dwie opcje. Pierwszą jest pomiar profilu temperatury wewnątrz rur wymiennika ciepła (bez cyrkulacji). Drugą pomiar temperatury w trakcie pierwszych 10 – 20 minut pompowania. Po czynnościach wstępnych włącza się źródło ciepła (lub chłodzenia). Obciążenie grzewcze w trakcie testu powinno być adekwatne do zakładanego obciążenia grzewczego odwiertu w trakcie eksploatacji. Typowe jego wartości dla gruntów o niskiej przewodności wynoszą około 30 W/m, a dla gruntów o wysokiej przewodności około 80 W/m. Natężenie przepływu należy dobrać tak, aby zapewnić przepływ turbulentny w wymienniku ciepła przez cały pomiar (poza okresem powolnego przepompowywania czynnika przez wymiennik dla ustalenia niezakłóconej temperatury gruntu, jeżeli stosowana jest taka metoda określania jej wartości).

1.5.3. Thermal Performance Test (TPT)

Test polegający na utrzymaniu stałej temperatury płynu na wlocie do wymiennika (*ang. Thermal Performance Test - TPT*) jest stosunkowo nową metodą eksperymentalną w porównaniu do TRT i jest stosowana od połowy 2000 roku zarówno w palach energetycznych, jak i konwencjonalnych GWC. Niewiele jest jednak badań uzasadniających jego wprowadzenia oraz przewagę nad standardowym testem TRT. Technicznie, TRT i TPT mają różne eksperymentalne warunki brzegowe, jednak oba mierzą reakcję cieplną GWC i otaczającego gruntu. TRT zakłada stałą moc w trakcie testu, TPT stałą temperaturę na wejściu do wymiennika. W literaturze jest wiele sprzeczności co tego, czy informacje jakie można uzyskać w wyniku interpretacji TPT są tożsame z tymi pozyskiwanymi w ramach procedury TRT. W niektórych badaniach

przeprowadzono zarówno TPT, jak i TRT w celu zbadania wydajności cieplnej GWC i porównania oszacowanych za pośrednictwem obu metod parametrów gruntu [91]. Wyniki badań nie są zgodne, badacze z różnym powodzeniem szacują właściwości gruntu wykorzystując TPT [91][92][93][94][95][96].

Choi i in. [92][93] zaproponowali koncepcję rozbudowy standardowego stanowiska TRT o regulator temperatury pozwalający na przeprowadzenie testów stałotemperaturowych, z jego zastosowaniem z powodzeniem oszacowali parametry projektowe GWC. Jia i in. [94] przeprowadzili TPT i oszacowali przewodność cieplną gruntu za pomocą aparatury badawczej, która może działać zarówno w trybie grzania jak i chłodzenia. Aydin i in. [95] opracowali nową metodę analizy danych, która umożliwia oszacowanie przewodności cieplnej gruntu na podstawie tego typu testów. Sposób wykorzystania danych pozyskiwanych z TPT nie został jednak w pełni omówiony i nie ma jednoznacznej procedury prezentowania i analizy wyników z takich testów [93]. Pożądane jest opracowanie metody, która umożliwi porównanie wyników testów prowadzonych w różnych warunkach testowych, dla różnych konfiguracji GWC.

Podsumowując: metodologia wykonywania i estymacji parametrów na podstawie wyników TPT jest nowa i wymaga dalszych badań. W porównaniu z konwencjonalnym TRT, badacze wskazują na wiele zalet związanych ze skróceniem czasu trwania testu, stabilności parametrów i dokładności estymacji współczynnika przewodzenia ciepła [91].

1.5.4. Disturbed Thermal Response Test (DTRT)

Podstawowa idea rozłożonego testu odpowiedzi termicznej gruntu (DTRT) jest podobna do konwencjonalnego TRT. Główna różnica polega na tym, że rejestracja temperatury płynu nie ogranicza się tylko do wlotu i wylotu z sondy lecz zachodzi na całej długości GWC. Najczęstszą metodą rejestrowania temperatury w teście DTRT są techniki światłowodowe [70]. Zarówno w konwencjonalnym TRT jak i DTRT możliwe jest przeprowadzenie pomiarów dla dwóch faz ogrzewania oraz chłodzenia. Podczas wykonywania DTRT wyznacza się jednostkowy strumień ciepła dla kolejnych odcinków GWC. Jest to istotne, gdyż wartość mocy jednostkowej dostarczanej do gruntu ma bezpośredni wpływ na wyznaczoną wartość współczynnika przewodzenia ciepła. W przypadku typowego TRT zakłada się, że jednostkowe obciążenie cieplne jest stałe w każdym punkcie odwiertu, a obliczane jest poprzez podzielenie całkowitego obciążenia cieplnego przez długość GWC. Nie jest to zgodne z rzeczywistością, gdyż płyn traci ciepło wzdłuż rury, a średnia temperatura płynu zmniejsza się wraz z głębokością. Oberdorfer wykazał, że efekt ten zwiększa się wraz ze spadkiem prędkości płynu [97]. W przypadku DTRT dzieli się więc odwiert na sekcje i przeprowadza obliczenie mocy jednostkowej dla każdej z nich na podstawie różnicy temperatur ($T_{pk} - T_{pp}$) między punktem początkowym (pp) i końcowym (pk) każdej sekcji, zgodnie z poniższym równaniem:

$$q(t) = \rho_f \cdot \dot{V}_f \cdot C_f \cdot (T_{pk} - T_{pp}) \quad (12)$$

1.5.5. Enhanced Thermal Response Test (ETRT)

Ulepszony test odpowiedzi termicznej (ETRT) w założeniach ma zapewniać równe obciążenie cieplne wzdłuż całego odwiertu [98]. Polega on na wygrzewaniu gruntu przy użyciu miedzianego przewodu grzewczego umieszonego wzdłuż u-rury i ciągłym pomiarze temperatury na całej głębokości odwiertu podczas fazy ogrzewania [70]. Zakłada się, że zastosowanie kabla grzejnego umożliwia dostarczanie stałej, niezakłóconej ilości ciepła do odwiertu w odróżnieniu do

klasycznego TRT czy DTRT polegających na ogrzewaniu krążącego wewnątrz u-rury płynu. W przeciwieństwie więc do TRT i DTRT założenie stałej mocy na całej długości odwiertu jest zdecydowanie bliższe rzeczywistości i jej wartość może być w prosty sposób określona poprzez podzielenie całkowitej mocy cieplnej przez długość odwiertu. Światłowody i przewody miedziane są często łączone w przewody hybrydowe, więc ogrzewanie i rejestrowanie przebiegu zmian temperatury odbywa się w tym samym miejscu wewnątrz GWC. Inną ważną różnicą w porównaniu do metod z zastosowaniem krążącego płynu jest brak możliwości pobierania ciepła z gruntu, co jest oczywiste, ze względu na zastosowaną metodę transferu ciepła (przewód miedziany).

1.6. Analiza wyników TRT

Do analizy wyników TRT stosowano wiele procedur, od uproszczonych metod analitycznych po modele numeryczne. Najwcześniejszym podejściem analitycznym do obliczania wymiany ciepła w gruncie był model nieskończonego źródła liniowego Kelvina [99]. Co ciekawe, sam Kelvin nie podał w swoich pracach rozwiązania tego modelu. Jego badania były jednak podstawą do dalszych prac nad opracowaniem modeli matematycznych do opisu rozkładu temperatury wokół źródeł o skończonej długości. Rozwiązanie modelu nieskończonego źródła liniowego opracował Whitehead [100]. Jest to rozwiązanie zawierające liczne uproszczenia, w tym dwa najważniejsze: przenoszenie ciepła następuje jedynie na drodze czystego przewodzenia, a źródłem ciepła jest źródło liniowe, które wytwarza ciepło w sposób ciągły. W modelu tym grunt jest postrzegany jako ośrodek o znanej temperaturze początkowej, a odwiert jako nieskończone źródło liniowe. Proces wymiany ciepła jest więc uproszczony i traktowany jako jednowymiarowy. Bardziej zaawansowanym modelem jest model cylindryczny, w którym GWC traktowany jest jako cylinder o nieskończonej długości, umieszczony w ośrodku o jednorodnej temperaturze początkowej i właściwościach termicznych. Model ten również zakłada, że transport ciepła w GWC występuje jedynie na drodze przewodzenia. Obecnie model ten, obok modelu nieskończonego źródła liniowego jest najczęściej wykorzystywany do interpretacji wyników TRT [101][102][103]. Wyżej opisane modele nieskończonego źródła liniowego i źródła cylindrycznego zaniebują osiowym przepływem ciepła wzdłuż głębokości odwiertu. Znaczącego postępu dokonał Eskilson (1987) biorąc pod uwagę skończoną długość odwiertu [29]. Założył on, że grunt jest jednorodny ze stałymi temperaturami początkowymi i granicznymi, a pojemność cieplna elementów wymiennika, takich jak u-rura i wypełnienie jest pomijana. Podstawą tego modelu jest równanie przewodzenia ciepła we współrzędnych cylindrycznych. W porównaniu z modelem nieskończonego źródła liniowego, wraz z czasem, temperatura dąży do osiągnięcia stanu ustalonego, co lepiej odzwierciedla rzeczywiste warunki wymiany ciepła w GWC. W modelu nieskończonego źródła liniowego, temperatura ta dąży do nieskończoności.

W praktyce, najczęściej i najpowszechniej stosowaną do analizy danych pozyskanych z TRT jest metoda bazująca na modelu nieskończonego źródła liniowego (*ang. Infinite Line Source - ILS*). Zgodnie z teorią źródła liniowego Kelvina reakcję temperatury w gruncie ze względu na stałą szybkość ekstrakcji ciepła podaje równanie:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda_g} \int_{\frac{r^2}{4\alpha_g t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda_g} E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha_g t} \right) \quad (13)$$

W równaniu tym r oznacza odległość od źródła liniowego, t oznacza czas od rozpoczęcia eksploatacji systemu; T opisuje temperaturę gruntu w dystansie r i czasie t ; T_0 to niezakłócona temperatura gruntu; q to jednostkowe obciążenie cieplne na metr wymiennika; a λ_g i α_g to przewodność i dyfuzyjność cieplna homogenicznego ośrodka gruntowego. Rozwiązanie powyższej całki zostało opisane w publikacjach [104-111]: E_1 jest całką wykładniczą, która dla dużych wartości parametru $\alpha_g t/r^2$ może być wyznaczona prostym równaniem:

$$E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha_g t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha_g t}{r^2}\right) - \ln(\gamma),$$

więc:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda_g} \cdot \ln\left(\frac{4\alpha_g t}{r^2\gamma}\right) \quad (14)$$

W równaniu tym $\gamma = 0,5772$ jest stałą Eulera. Chociaż model ten cechuje prostota i niewielki czas obliczeń, może być on zastosowany tylko dla niewielkich rur, w wąskim przedziale czasowym. W części opracowań podano informacje, że model ten jest obciążony dużym błędem kiedy $\alpha_g t/r^2 < 20$ [112]. W innych zaś, że może być stosowany dla $\alpha_g t/r^2 \geq 5$ [16].

Rozpowszechnienie stosowania równania (14) zostało zapoczątkowane przez Mogensena, który zaproponował jego praktyczne wykorzystanie [42]. Zastosowanie to obejmuje pewne uproszczenia:

- rozwiązaniem modelu jest temperatura na ścianie odwiertu;
- przewodzenie ciepła zachodzi w stanie quasi-ustalonym;
- średnia temperatura płynu jest obliczana jako średnia na wlocie i wylocie z wymiennika.

Dla tych założeń, równanie opisujące średnią temperaturę płynu przy stałym impulsie cieplnym może być przedstawione równaniem:

$$T_{sr}(t) = \frac{q}{4\pi\lambda_{ILS}} \ln(t) + \frac{q}{4\pi\lambda_{ILS}} \cdot \ln\left(\frac{4\lambda_{ILS}}{C_g r_b^2 \gamma}\right) + R_{odw} \cdot q + T_0 \quad (15)$$

W tym przypadku λ_{ILS} to efektywna przewodność cieplna gruntu [$W/(mK)$], a R_{odw} to efektywny opór cieplny odwiertu [$K/(W/m)$].

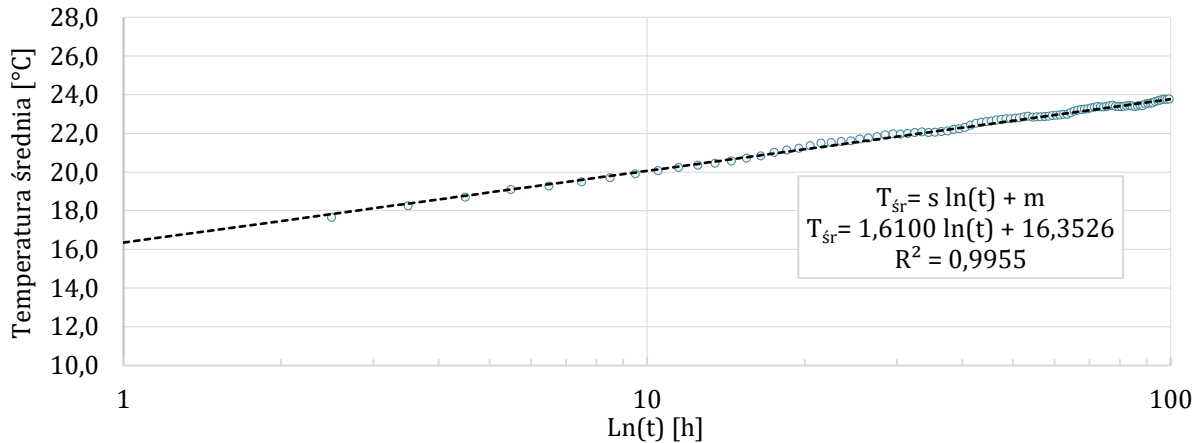
Równie to znalazło szerokie zastosowanie w analizie wyników TRT. Zawiera ono trzy nieznanne parametry, a mianowicie: λ_{ILS} , R_{odw} i C_g , ale tylko dwa z nich można określić bezpośrednio z równania za pomocą metody opisanej poniżej. Wolumetryczna pojemność cieplna (C_g) ma niewielki wpływ na średnią temperaturę płynu w trakcie TRT [72], stąd jej wartość jest zazwyczaj wstępnie szacowana. Wartości λ_{ILS} i R_{odw} są określane albo za pomocą dwuparametrowej procedury dopasowania, albo częściej za pomocą metody regresji liniowej. W tym drugim przypadku temperatura płynu $T_{sr}(t)$ jest wykreślana w funkcji logarytmu czasu $\ln(t)$, dzięki czemu uzyskuje się funkcję liniową:

$$T_{sr}(t) = s \cdot \ln t + m \quad (16)$$

W równaniu (16) s to nachylenie krzywej, a m to przecięcie z rzędną. Należy zauważyć, że regresja liniowa ma zastosowanie tylko wtedy, gdy procesy termiczne w GWC osiągnęły stan ustalony. Zatem pierwsze godziny testu, kiedy krzywa nie podąża za tym trendem liniowym, muszą zostać pominięte. Przybliżenie wartości λ_{ILS} jest możliwe przy użyciu następującego równania, podanego m.in. przez Eklöf i Gehlin [50]:

$$\lambda_{ILS} = \frac{Q}{4\pi Hs} \quad (17)$$

W równaniu tym Q jest mocą dostarczaną do odwiertu, H długością gruntowego wymiennika ciepła, a λ_{ILS} efektywną przewodnością cieplną. Wykres będący wynikiem analizy danych przykładowego TRT przedstawia rysunek 4.



Rysunek 4 Wyniki testu odpowiedzi termicznej

Przybliżenie wartości oporu cieplnego odwiertu (R_b) jest możliwe dzięki przekształceniu równania (15). Opór cieplny można wyznaczyć dla punktu w czasie $t = 1$ h, dla którego $\ln(t) = 0$ oraz $T_{sr} = T_{sr-1}$ (dla $t = 1$ h):

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda_{ILS}} \cdot \left[\frac{T_{sr-1} - T_0}{s} - \ln\left(\frac{4\alpha_g t}{Yr_{odw}^2}\right) \right] \quad (18)$$

1.7. Podsumowanie badań literaturowych, cel i teza pracy

Zagadnienia dotyczące pozyskiwania danych do projektowania oraz samego projektowania pionowych gruntowych wymienników ciepła są obszarem szerokich prac badawczych [113][114]. Badania te, głównie ze względu na kwestię wysokich kosztów testów in-situ, opierają się często na modelowaniu numerycznym [36].

Prowadzone są badania nad poziomem wpływu różnych czynników na jakość wymiany ciepła w dolnym źródle [115]. Główne obszary badań dotyczą: lokalizacji instalacji i związanych z nią warunków klimatycznych, warunków hydraulicznych w dolnym źródle, przepływu wody gruntowej, parametrów wymiennika (przewodności cieplnej materiału wypełniającego; średnicy odwiertu, odległości pomiędzy rurami wymiennika [73], rozwiązań wielorurowych [21], grubości ścianki u-rury, przewodności cieplnej u-rury [4]), parametrów fizykochemicznych czynnika krążącego w wymienniku oraz bilansowania obciążenia grzewczego/chłodniczego [116].

Podsumowując zaś tematykę samych testów odpowiedzi termicznej, to od lat 80-tych XX wieku do dziś TRT przekształciło się w rutynowe narzędzie do badania parametrów termicznych gruntu w celu użycia ich do projektowania instalacji GWC. Procedura wykonywania testów odpowiedzi termicznej gruntu oraz podstawowe modele analityczne służące do wyznaczania parametrów gruntu na ich podstawie są powszechnie znane i stosowane na całym świecie. TRT są wykonywane w Europie, Ameryce Północnej i Azji Wschodniej. Zasadniczo uważa się, iż

wykonanie testu odpowiedzi termicznej jest uzasadnione ekonomicznie dla instalacji składających się z więcej niż 10 odwiertów. W Chinach TRT wymagany jest dla instalacji GPC pracujących na potrzeby budynków o powierzchni ponad 5 000 m² [79]. Warunkiem niezbędnym dla uzyskania prawidłowych wyników estymacji parametrów gruntu na podstawie TRT jest wysoka dokładność pomiaru temperatury, staranna konfiguracja i działanie urządzeń oraz wystarczająco długi czas trwania testu. Standardowa metoda oceny oparta na modelu nieskończonego źródła liniowego jest w większości przypadków wystarczająca, jednak cały czas wymaga szczegółowego rozpoznania w zakresie generowanych niedokładności.

Analizując literaturę stwierdzono kilka kierunków rozwoju badań nad testami TRT, wskazywanych jako obszary istotnie tego wymagające. Należą do nich: opracowanie modelu uwzględniającego większą liczbę parametrów gruntu, szczegółowa analiza wrażliwości TRT na parametry wymiennika, wpływ wody gruntowej, zmniejszenie czasu trwania testu, poszukiwanie najlepszej procedury testu. Ponieważ testy terenowe (in-situ) w wielu krajach nie są wykonywane (z uwagi na ich koszt) oraz nie pozwalają na wielokrotne badania przy zmiennych założeniach (głównie z uwagi na czas ich trwania), badacze coraz częściej wykorzystują narzędzia do modelowania numerycznego w celu odtworzenia testów terenowych i ich modyfikacji. Wykorzystanie analizy numerycznej, choć również jest czasochłonne, pozwala na wprowadzanie właściwie nieograniczonych modyfikacji założeń testu, konfiguracji wymiennika, parametrów fizycznych materiałów, z którego wykonany jest wymiennik oraz gruntu. Badacze opracowują własne bądź modyfikują już istniejące modele wymiany ciepła w GWC i implementują je do programów takich jak MATLAB, COMSOL, ANSYS FLUENT/CFX czy TRANSYS [117][118].

Jednym z obszarów badań poruszanych obecnie w pracach naukowych jest wpływ wody gruntowej na wyniki TRT oraz wymianę ciepła w gruntowym wymienniku [57]. Badacze wskazują na zależności pomiędzy przewodnością hydrauliczną a zdolnością akumulacji ciepła w górotworze [119] oraz stosują zewnętrzne modele przepływu wody np. HYDRUS, który w połączeniu z narzędziami stochastycznymi pozwala na badanie zachowań termicznych w gruncie [120]. Badacze wskazują na konieczność kontynuowania badań nad wpływem wody gruntowej na pracę GWC, co podkreśla fakt realizacji inwestycji w stanowisko badawcze pozwalające na takie badania w warunkach in-situ [121]. W skład tego stanowiska wchodzi odwierty wyposażone w gruntowe wymienniki ciepła oraz studnie rewizyjne i pompujące oddalone od wymienników o około 20 m. Prędkość przepływu wody gruntowej badano poprzez dodanie do wody pompowanej roztworu NaCl i mierzeniu przewodności elektrycznej w studniach rewizyjnych. Jednak, w warunkach większości instalacji badawczych GWC nie ma możliwości przeprowadzenia badań dotyczących przepływu wody gruntowej na taką skalę, a modelowanie numeryczne staje się bardzo dobrą alternatywą dla tego kierunku prac badawczych.

Kolejnym obszarem badań i modelowania numerycznego jest modyfikacja założeń testu oraz parametrów fizycznych wymiennika. Tematy poruszane przez badaczy to prędkość przepływu czynnika roboczego w trakcie testu TRT, wpływ przewodności cieplnej materiału wypełniającego oraz stężenie roztworu glikolu [122]. Badano również wpływ zmienności temperatury wraz z głębokością, oraz rozstaw trzonów u-rury na wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu i oporu cieplnego odwiertu [123][124][125][126]. W zakresie konstrukcji wymiennika modele numeryczne są również wykorzystywane do opracowywania nowych kształtów u-rury np. o owalnym przekroju i badania jego wpływu na opór cieplny wymiennika oraz straty ciśnienia [119]. Również w tym obszarze badacze podkreślają, że prace powinny być kontynuowane poprzez analizę wrażliwości kolejnych czynników zakłócających na wyniki testu TRT,

przeprowadzanych na wymiennikach o różnej konstrukcji. Niezbędne są również dalsze prace nad ujednoczeniem procedury analizy danych z testu TRT [127].

Inne badania skierowane są na analizę wpływu zakłóceń zewnętrznych na wyniki testu. Warto pamiętać, że stanowiska do przeprowadzania TRT bardzo często mają rozległą budowę, zamontowane są na przyczepach samochodowych oraz zwykle zamknięte w metalowej obudowie. Wpływ warunków atmosferycznych na wyniki testu będzie tym większy im bardziej rozbudowane stanowisko. Modele numeryczne są więc wykorzystywane do analizy wpływu zakłóceń takich jak: promieniowanie słoneczne, temperatura powietrza zewnętrznego, skoki napięcia w sieci energetycznej czy przerwy w dostawie energii [128][62].

Część badań dotyczy bezpośrednio problemów związanych z modelowaniem numerycznym i obejmuje m.in. próby skrócenia czasu obliczeniowego, uproszczenia modeli numerycznych, zmniejszenia gęstości siatki obliczeniowej, porównania wyników analizy modeli 1D/3D oraz ocenę wpływu przyjętych warunków brzegowych [129]. Warto jednak podkreślić, że nie wszystkie z opisanych powyżej analiz przeprowadzane są na kompleksowych modelach numerycznych. Walidacja modeli opisanych w literaturze nie zawsze przeprowadzana jest na rzeczywistych danych pomiarowych, a np. na modelach analitycznych [122], innych modelach opisanych w literaturze [130][131][132] lub stanowiskach badawczych opisywanych jako sandboxy [126] (niewielkich rozmiarów skrzynie wypełnione piaskiem). Ponadto, opisywane modele numeryczne wykorzystują różne założenia dotyczące warunków brzegowych związanych z temperaturą płynu na wlocie do wymiennika. Można w tym miejscu wyróżnić dwa opisywane w literaturze podejścia – warunek brzegowy temperatury na wlocie do wymiennika wprowadzony jest jako baza danych temperatur zmierzonych w przyjętym kroku czasowym [126]. Jest to podejście łatwiejsze do implementacji, jednak z uwagi na ograniczenie jakim jest ściśle utrzymana, oczekiwana temperatura, podejście to budzi wątpliwości co do uniwersalności opracowanego modelu oraz jego walidacji, która zwykle przeprowadzana jest na podstawie średniej temperatury płynu. Podsumowując – podejście to, zdaniem autorki niniejszej pracy nie umożliwia sprawdzenia, czy przyjęta konstrukcja wymiennika dobrze odzwierciedla rzeczywisty opór cieplny odwiertu (temperatura na wlocie do wymiennika zawsze będzie zbieżna z pomiarami i nie pozwala na uzyskanie rzeczywistej odpowiedzi gruntu na dostarczanie do niego określonej ilości energii). Drugim podejściem do założeń dotyczących warunku brzegowego na wlocie do wymiennika jest stała różnica temperatur (stała moc) [85]. Procedura ta jest bardziej wymagająca, jednak dzięki niej opracowany model jest dużo bardziej uniwersalny – pozwala na analizę odpowiedzi termicznej gruntu dla dowolnych parametrów testowych i przede wszystkim, lepiej odzwierciedla rzeczywisty opór odwiertu.

Podsumowując, badacze w dalszym ciągu dążą do opisanie wpływu jak największej ilości parametrów na wyniki testu, sprecyzowania czasu trwania testu, opracowania metody testowania i aparatury testowej pozwalającej na zmniejszenie kosztów i implementację w mniejszych instalacjach gruntowych wymienników ciepła. Pomimo trwających intensywnych badań nad testami odpowiedzi termicznej gruntu, dalsze prace są niezbędne dla poszerzenia i wzmocnienia możliwości zastosowania i niezawodności TRT. Najnowsze publikacje naukowe [127-136] wskazują na konieczność kontynuowania badań zmierzających do minimalizacji błędów estymacji parametrów gruntu.

- Niezbędne jest opracowanie bardziej zaawansowanych metod pozwalających na wyznaczenie związku między przebiegiem temperatury płynu w trakcie TRT a parametrami termicznymi wymiennika i otaczającego go gruntu.

- Niezbędne jest opracowanie modelu, który w bardziej dokładny sposób będzie opisywał efektywność wymiany ciepła w GWC i będzie łatwy do zastosowania.
- Konieczne są badania nad rozwojem metod analizy wyników bardziej zaawansowanych testów TRT, które wciąż mają wiele niedociągnięć.
- Konieczne są badania nad wpływem wód gruntowych, jak i innych parametrów na wyniki TRT. Należy opracować ogólną metodę oceny niepewności wyników identyfikacji parametrów gruntu.

W kontekście powyższych stwierdzeń, analiza wrażliwości wpływu parametrów wymiennika na wyniki testu odpowiedzi termicznej gruntu jest niezbędna do opracowania lepszych, bardziej dokładnych procedur testowania oraz dokładniejszych metod analizy wyników. Prace w tym obszarze stanowiąc będą ważny wkład w rozwój terenowych testów odpowiedzi termicznej gruntu. W literaturze poruszany jest wielokrotnie problem niedokładności estymacji parametrów gruntu najczęściej wykorzystywanym modelem do analizy danych z testu – modelem ILS. Za jego powszechnym stosowaniem przemawia łatwość obliczeń wykonywanych z jego zastosowaniem. Brak jest jednak cały czas precyzyjnych wytycznych dotyczących tego jakie zakłócenia i w jakim stopniu wpływają na wyniki TRT oraz na estymowane modelem ILS parametry gruntu. W związku z tym postawiono tezę i cel pracy.

Teza: *Możliwe jest opracowanie metody pozwalającej na poprawę dokładności wyznaczanego na podstawie testu odpowiedzi termicznej gruntu (ang. Thermal Response Test – TRT) z zastosowaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (ang. Infinity Line Source – ILS) efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.*

Cel: Celem pracy jest przedstawienie ogólnych zasad pozwalających na ocenę dokładności estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z zastosowaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (ILS) w zależności od parametrów TRT, czasu trwania testu i właściwości wymiennika ciepła, a także metody pozwalającej na zwiększenie dokładności wyznaczanego modelem ILS współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.

2. Analiza wrażliwości TRT – badania terenowe

2.1. Cel i zakres badań

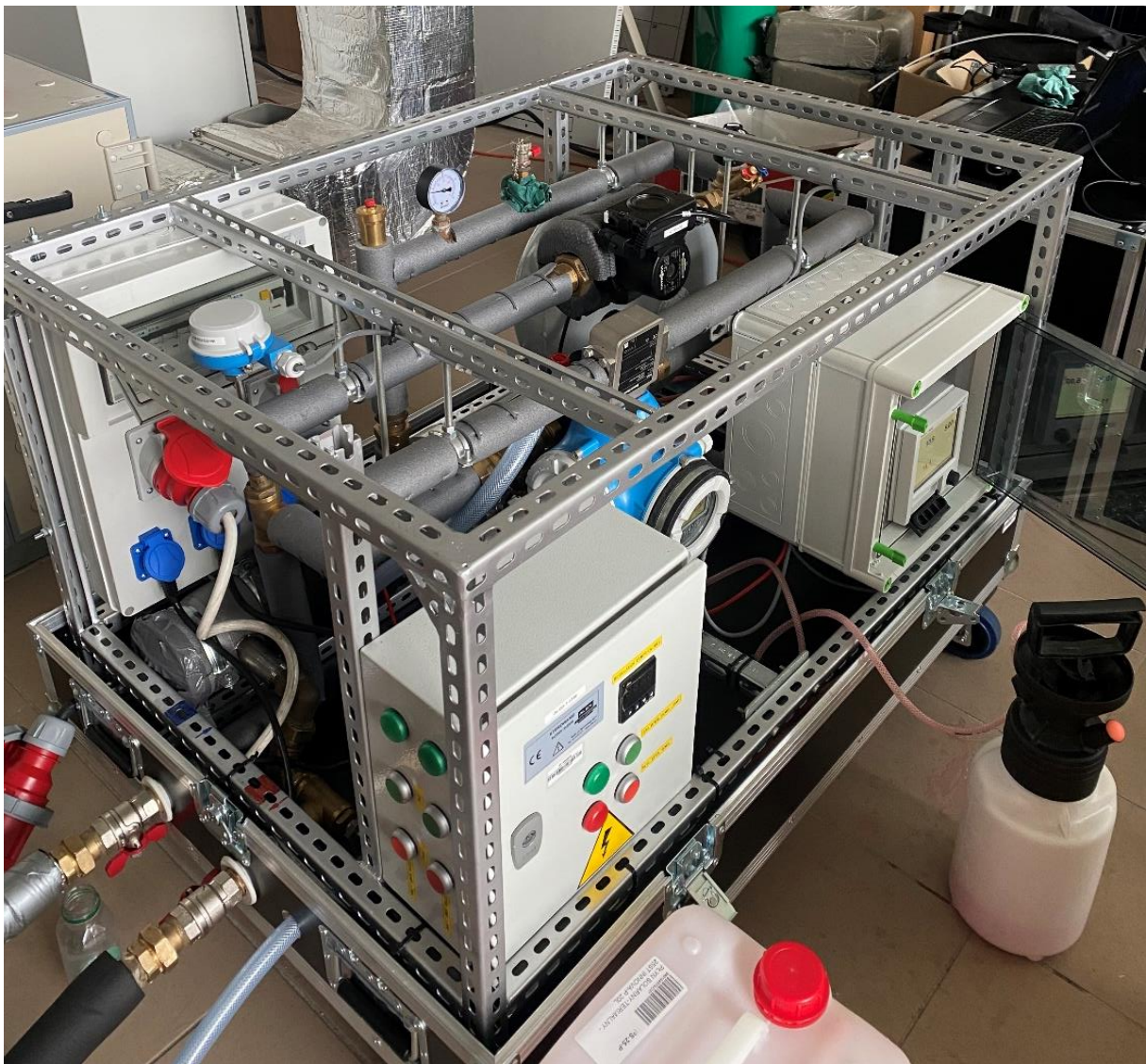
Terenowe testy odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) miały dwa cele. Pierwszym była ocena wpływu wybranych parametrów testu na wyniki estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu. Drugim, pozyskanie danych wejściowych do konstruowania i walidacji modelu numerycznego TRT w oprogramowaniu Ansys Fluent (ten etap prac przedstawiono w Rozdziale 3). Testy terenowe przeprowadzono zgodnie z rekomendacjami zawartymi w literaturze przedmiotu [137]. Dane pomiarowe poddano analizie metodą nieskończonego źródła liniowego (ILS). Najważniejsze problemy rozpatrywane w ramach przeprowadzonych badań przedstawiono poniżej.

- Wpływ zmiany mocy grzewczej grzałki elektrycznej zasilającej instalację TRT na wyniki estymacji efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu i oporu cieplnego odwiertu. Stanowisko badawcze zostało opracowane w sposób umożliwiający zmianę mocy grzewczej grzałki elektrycznej w zakresie 2/4/6 kW. Testy przeprowadzono dla mocy grzewczej wynoszącej 2 i 4 kW.
- Wpływ zmiany przepływu czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła na wyniki estymacji oporu cieplnego odwiertu oraz efektywnej przewodności cieplnej gruntu. Czynnikiem pośredniczącym w przeprowadzonych testach był wodny roztwór glikolu propylenowego. Testy przeprowadzono dla przepływów 0,5 i 1,0 m³/h, co było możliwe dzięki zastosowanemu w stanowisku badawczym zaworowi regulacyjnemu.
- Wpływ lokalizacji aparatury pomiarowej na wyniki estymacji oporu cieplnego odwiertu oraz efektywnej przewodności cieplnej gruntu. Badania zaplanowano w taki sposób, aby w największym stopniu wykorzystać możliwości zarówno stanowiska, jak i miejsca, w którym realizowano pomiary. Aparaturę pomiarową TRT podłączono do obiegu dolnego źródła w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła, oddalonym o około 23 m od odwiertu. Dodatkowo, instalacja gruntowego wymiennika ciepła wyposażona była w urządzenia pomiarowe, czujniki temperatury i przepływomierz tej samej klasy co w aparaturze TRT, podłączone do systemu BMS budynku i zlokalizowane w studni rewizyjnej przy badanym odwiercie. Warto zaznaczyć, że część opisywanych w literaturze stanowisk do TRT była zlokalizowana nie przy odwiercie, a właśnie w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła i wykorzystywała ją jako urządzenie grzewcze/chłodnicze w aparaturze testowej [138]. Badania terenowe wpływu odległości stanowiska od odwiertu na wyniki analiz mogą mieć więc walor poznawczy i opiniotwórczy w zakresie zasadności takich prac badawczych.
- Analiza stabilności parametrów testowych, którą wykonano poprzez porównanie wyników pomiarów z teoretycznym przebiegiem testu uzyskanym z modelu ILS. Na tej podstawie oceniono poziom zakłóceń wywołanych przez otoczenie zewnętrzne oraz wahania mocy grzałki elektrycznej.

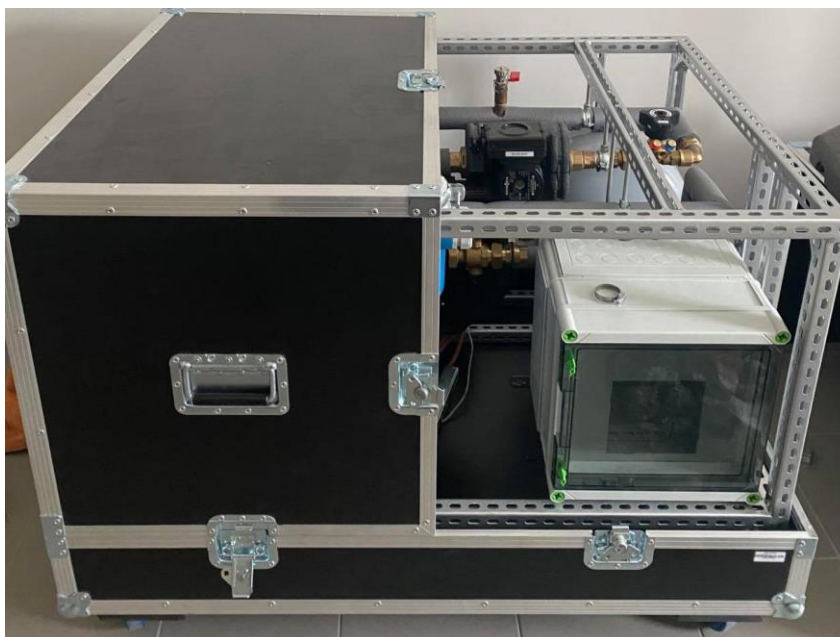
- Analiza wpływu przedziału czasu z jakiego pobierano dane do analizy (nazywanego dalej „czasem trwania testu”) na dokładność estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu z zastosowaniem modelu ILS.

2.2. Opis stanowiska do badań TRT

Pierwszym etapem planowania terenowych testów odpowiedzi termicznej gruntu przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej był projekt stanowiska badawczego. Głównymi założeniami konstrukcyjnymi były: kompaktowy rozmiar umożliwiający transport stanowiska niewielkim samochodem dostawczym oraz możliwość przeprowadzania testów w warunkach utrzymania stałej mocy bądź stałej temperatury zasilania czynnika pośredniczącego. Schemat oraz zdjęcia zrealizowanego stanowiska badawczego przedstawiono na rysunkach 5-7.

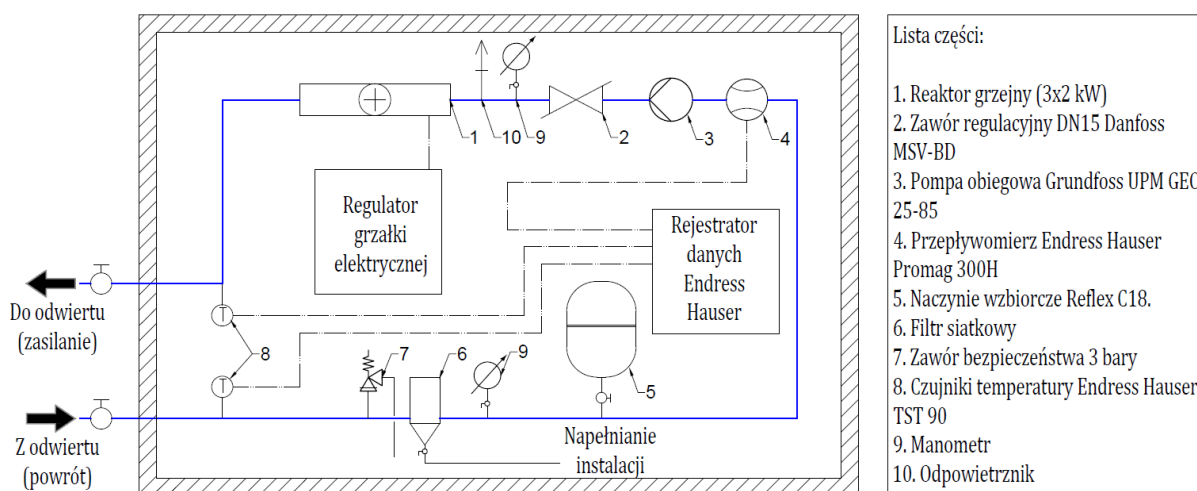


Rysunek 5 Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) - przygotowanie stanowiska do pomiarów



Rysunek 6 Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) - przygotowanie stanowiska do transportu

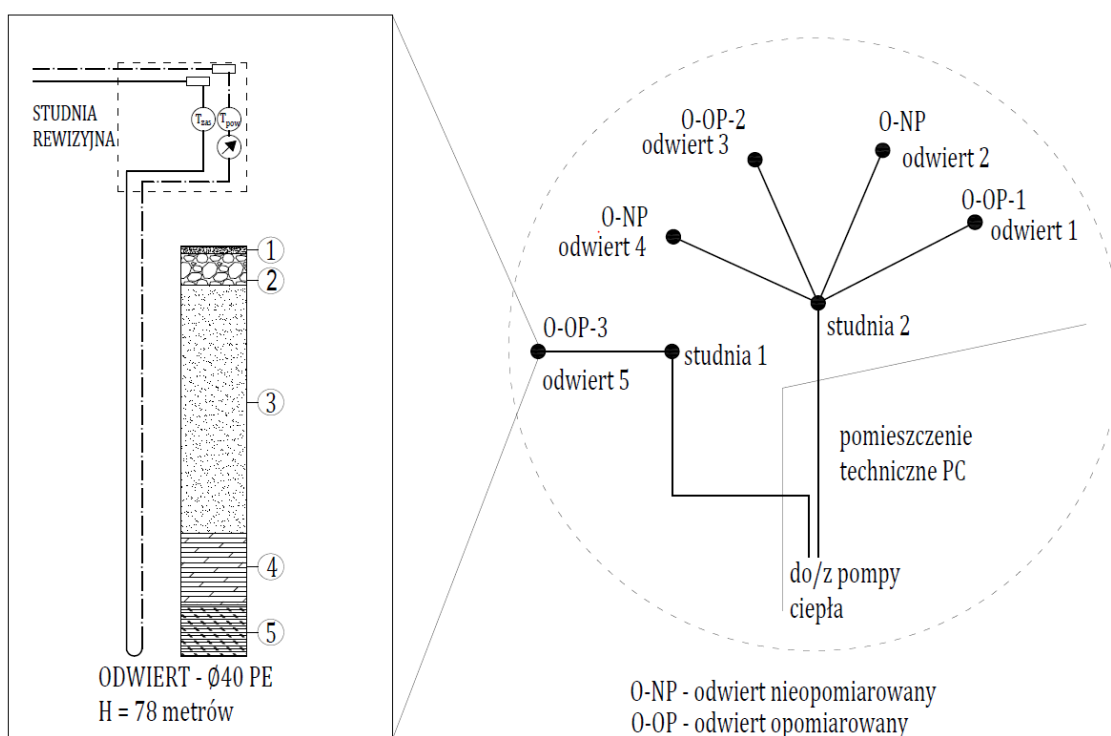
W zaprojektowanym stanowisku badawczym podstawowymi elementami pomiarowymi są czujniki temperatury na zasilaniu i powrocie z odwiertu oraz przepływomierz. Dane urządzeń pomiarowych zestawiono w tabeli 7 w punkcie 2.4. Źródłem ciepła jest grzałka elektryczna z regulacją mocy 2/4/6 kW oraz dodatkowym regulatorem umożliwiającym utrzymanie stałej temperatury zasilania. Przepływ czynnika pośredniczącego wymuszony jest pracą pompy obiegowej. Instalacja wyposażona jest ponadto w zabezpieczenia (naczynie wzbiorcze oraz zawór bezpieczeństwa), rejestrator wartości pomiarowych (temperatur oraz przepływu), armaturę odcinającą, regulator przepływu, filtr oraz odpowietrzenia. Króćce przyłączeniowe umożliwiają podłączenie instalacji badawczej do odwiertów, w których zamontowane są sondy u-kształtne o średnicach DN25, DN32 lub DN40. Wszystkie elementy znajdują się w skrzyni transportowej, zabezpieczającej aparaturę pomiarową przed niepożądanym dostępem oraz umożliwiającą wygodny transport stanowiska.



Rysunek 7 Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) - schemat stanowiska

2.3. Odwiert testowy

Badania terenowe przeprowadzono na gruntowym wymienniku ciepła zlokalizowanym w Świdnicy. Profil geologiczny oraz podstawowe właściwości termofizyczne wymiennika przedstawiono na rysunku 8 oraz w tabeli 6. Badany odwiert (odwiert 5/O-OP-3) jest jednym z 5 odwiertów wchodzących w skład instalacji gruntowej pompy ciepła pracującej na cele grzewcze budynku biurowego. Wymiennik ciepła ma długość 78 m i składa się z pojedynczej sondy u-kształtnej, o średnicy 40 mm i grubości ścianki 3,7 mm, wykonanej z polietylenu, zainstalowanej w odwiercie o średnicy 153 mm. Przestrzeń pomiędzy u-rurą a gruntem wypełniona jest zaprawą bentonitową. Odwiert zwieńczono studnią rewizyjną, w której zlokalizowane są urządzenia pomiarowe: czujniki temperatury zasilania i powrotu oraz przepływomierz. Ze studni rewizyjnej, przewodami o średnicy 40x3,7 mm, czynnik pośredniczący transportowany jest do pomieszczenia technicznego pompy ciepła. Badany odwiert nie był eksploatowany przez kilka miesięcy poprzedzających opisywane w pracy doktorskiej pomiary.



Rysunek 8 Profil geologiczny oraz schemat przedstawiający lokalizację badanego odwiertu

Na podstawie informacji o profilu geologicznym odwiertu oraz na podstawie danych literaturowych (dokładnie według „wartości zalecanych” podanych w tabeli 6) oszacowano średnią wartość współczynnika przewodzenia ciepła wynoszącą $1,62 W/(mK)$, gęstość gruntu wynoszącą $1899 kg/m^3$ oraz objętościową pojemność cieplną wynoszącą $2,37 kJ/(kgK)$. Należy mieć na uwadze, że wartości tych charakterystycznych parametrów są silnie zależne od rodzaju gruntu, ale i od poziomu jego nasycenia. Przy braku znajomości poziomu nasycenia gruntu błąd przyjęcia wartości przewodności cieplnej może być znaczący, i sięgać ponad 50%. Wartość tej przewodności cieplnej ma zaś bezpośredni wpływ na wyniki symulacji pracy dolnego źródła pompy ciepła i tym samym wielkość projektowanego gruntowego wymiennika ciepła (GWC). Tak

więc ewentualna pomyłka w przyjęciu tej danej wejściowej niezbędnej do zaprojektowania GWC nie pozostanie bez wpływu na koszty inwestycji i/lub koszty eksploatacji systemu. Stąd, przy większych inwestycjach zalecane jest wykonywanie terenowych testów odpowiedzi termicznej gruntu dla pozyskania informacji o efektywnej przewodności cieplnej dolnego źródła, a nie jedynie przybliżonych szacunków jej wartości.

Tabela 6 Profil geologiczny badanego odwiertu oraz zestawienie parametrów fizycznych poszczególnych rodzajów gruntu (na podstawie [28])

Nr	Głębokość	Rodzaj gruntu	Współczynnik przewodzenia ciepła		Pojemność cieplna		Gęstość	
Jedn.	[m]	-	[W/(mK)]		[kJ/(kgK)]		[kg/m ³]	
1	0,2-1,5	Glina żółta	sucha		sucha		zalecane	1770
			zalecane	0,40	zalecane	1,6		
			min.	0,40	min.	1,51	min.	1410
			max.	0,90	max.	1,62	max.	2200
			nasycona		nasycona			
			zalecane	1,60	zalecane	2,40		
			min.	0,90	min.	1,60		
			max.	2,22	max.	3,40		
2	1,5-7,5	Żwiry grube	suchy		suchy		zalecane	2000
			zalecane	0,40	zalecane	1,5		
			min.	0,39	min.	1,40	min.	1700
			max.	0,52	max.	1,62	max.	2100
			nasycony		nasycony			
			zalecane	1,80	zalecane	2,40		
					min.	2,28		
					max.	2,88		
3	7,5-5	Glina szara, zapiaszczona	sucha		sucha		zalecane	2015
			zalecane	0,40	zalecane	1,6		
			min.	0,40	min.	1,51	min.	1340
			max.	0,90	max.	1,62	max.	2270
			nasycona		nasycona			
			zalecane	1,60	zalecane	2,4		
			min.	0,90	min.	1,60		
			max.	2,22	max.	3,40		
4	56-70	Iły szaro niebieskie	suchy		zalecane	2,30	zalecane	1709
			zalecane	0,40	min.	2,13		
			min.	0,40	max.	2,42	min.	1340
			max.	0,90			max.	2100
			nasycony					
			zalecane	1,60				
			min.	0,90				
			max.	2,22				
5	70-78	Iły szaro niebieskie zawęglone	suchy		zalecane	2,30	zalecane	1480
			zalecane	0,40	min.	2,13		
			min.	0,40	max.	2,42		
			max.	0,90				
			nasycony					
			zalecane	1,60				
			min.	0,90				
			max.	2,22				
ŚREDNIA WAŻONA				1,62		2,37		1899

2.4. Przebieg badań terenowych

W ramach badań terenowych przeprowadzono dwa testy odpowiedzi termicznej gruntu (TRT). W tabeli 7 zestawiono najważniejsze informacje na ich temat. Testy przeprowadzone były na jednym odwiercie badawczym. Czas pomiędzy kolejnymi testami zapewniał powrót gruntu do stanu ustalonego. Dane pomiarowe z testów rejestrowane były zarówno w obrębie stanowiska badawczego opracowanego w ramach rozprawy doktorskiej i podłączonego do obiegu dolnego źródła w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła, oddalonym o około 23 m od odwiertu (wariant 2), jak i za pomocą urządzeń pomiarowych zainstalowanych w studni rewizyjnej przy badanym odwiercie (wariant 1).

Tabela 7 Zestawienie przeprowadzonych testów terenowych i ich najważniejsze parametry

Oznaczenie testu	Moc w trakcie testu	Przepływ w trakcie testu	Czas trwania testu	Prędkość czynnika pośredniczącego
TEST 1	$Q = 4 \text{ kW}$	$\dot{V} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$	120 h	$w = 0,333 \text{ m/s}$
TEST 2	$Q = 2 \text{ kW}$	$\dot{V} = 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$	95 h	$w = 0,166 \text{ m/s}$

Wariant 1

Dzięki zamontowanym w studni rewizyjnej czujnikom możliwy był pomiar parametrów TRT bezpośrednio przy odwiercie. Dostęp do danych pomiarowych z tych urządzeń pomiarowych możliwy był poprzez połączenie z systemem BMS budynku. Dane zapisywane były w kroku czasowym równym 1 minutę. W trakcie przeprowadzonych pomiarów rejestracji i archiwizacji podlegały następujące dane:

- temperatura na wlocie do odwiertu – temperatura zasilania (T_{zas_1}), °C;
- temperatura na wylocie z odwiertu – temperatura powrotu (T_{pow_1}), °C;
- strumień objętości czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła (\dot{V}_1), m^3/h .

Wariant 2

Dane z zaprojektowanego w ramach pracy doktorskiej stanowiska do przeprowadzania TRT były zapisywane w kroku czasowym równym 1 minutę w rejestratorze danych wchodzącym w jego skład, z którego były następnie sczytywane na kartę SD. Do odczytu danych zapisanych w formacie DAT wykorzystano program komputerowy Field Data Manager firmy Endress Hauser. W trakcie przeprowadzonych pomiarów rejestracji i archiwizacji podlegały następujące dane:

- temperatura na wlocie do odwiertu – temperatura zasilania (T_{zas_2}), °C;
- temperatura na wylocie z odwiertu – temperatura powrotu (T_{pow_2}), °C;
- strumień objętości czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła – (\dot{V}_2), m^3/h .

Najważniejsze informacje dotyczące elementów pomiarowych wchodzących w skład instalacji zaprojektowanej w ramach pracy doktorskiej oraz instalacji badanego wymiennika gruntowej pompy ciepła zestawiono w tabeli 8. Podano w niej zarówno dokładność urządzeń pomiarowych, jak i niepewność standardową typu B dla pomiarów bezpośrednich. Jednocześnie, na jej podstawie, wyznaczono niepewności pomiaru wielkości pośrednich, średniej temperatury płynu w gruntowym wymienniku ciepła oraz mocy grzewczej kierowanej do odwiertu. Niepewność wyznaczenia średniej temperatury wynosi $\pm 0,020 \text{ K}$, natomiast niepewność wyznaczenia mocy grzewczej wynosi $\pm 1,1 \%$ wartości mierzonej.

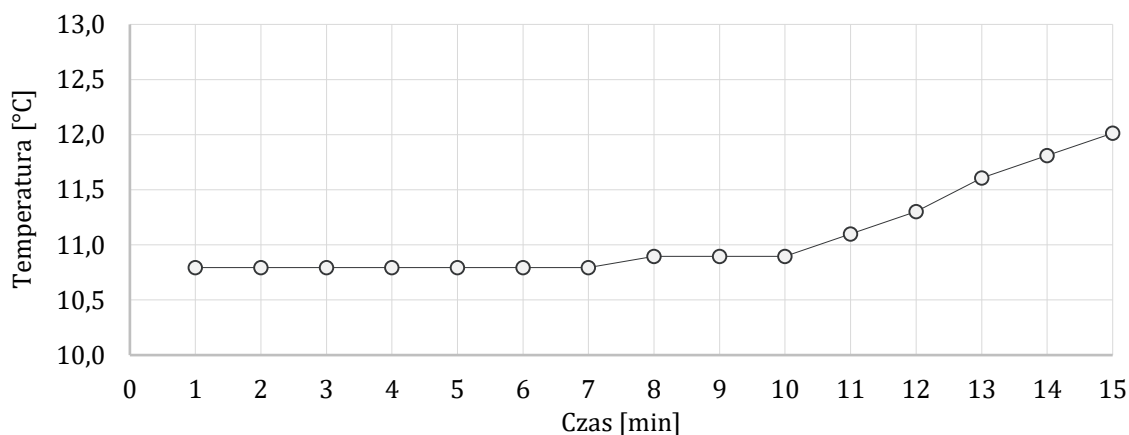
Tabela 8 Zestawienie elementów pomiarowych

Elementy pomiarowe w systemie BMS budynku			
Wartość mierzona	Urządzenie, producent	Dokładność	Niepewność pomiaru
Temperatury czynnika pośredniczącego (T_{zas_1}), (T_{pow_1})	Czujniki temperatury RTD TST90, Pt100, Endress+Hauser	$\pm 0,05$ K, $0 \div 120$ °C	$\pm 0,029$ K
Przepływ czynnika pośredniczącego (\dot{V}_1)	PROLine Promag 10 P, Endress+Hauser	$\pm 0,5$ %	0,29 %
Elementy pomiarowe w przenośnym stanowisku badawczym do przeprowadzenia TRT			
Wartość mierzona	Urządzenie, producent	Dokładność	Niepewność pomiaru
Temperatury czynnika pośredniczącego (T_{zas_2}), (T_{pow_2})	Czujniki temperatury RTD TST90, Pt100, Endress+Hauser	$\pm 0,05$ K, $0 \div 120$ °C	$\pm 0,029$ K
Przepływ czynnika pośredniczącego (\dot{V}_2)	Promag H 300, 5H3B08, Endress+Hauser	$\pm 0,5$ %	0,29 %

2.5. Wyniki pomiarów – TEST 1

2.5.1. Przebieg testu i zakres analiz

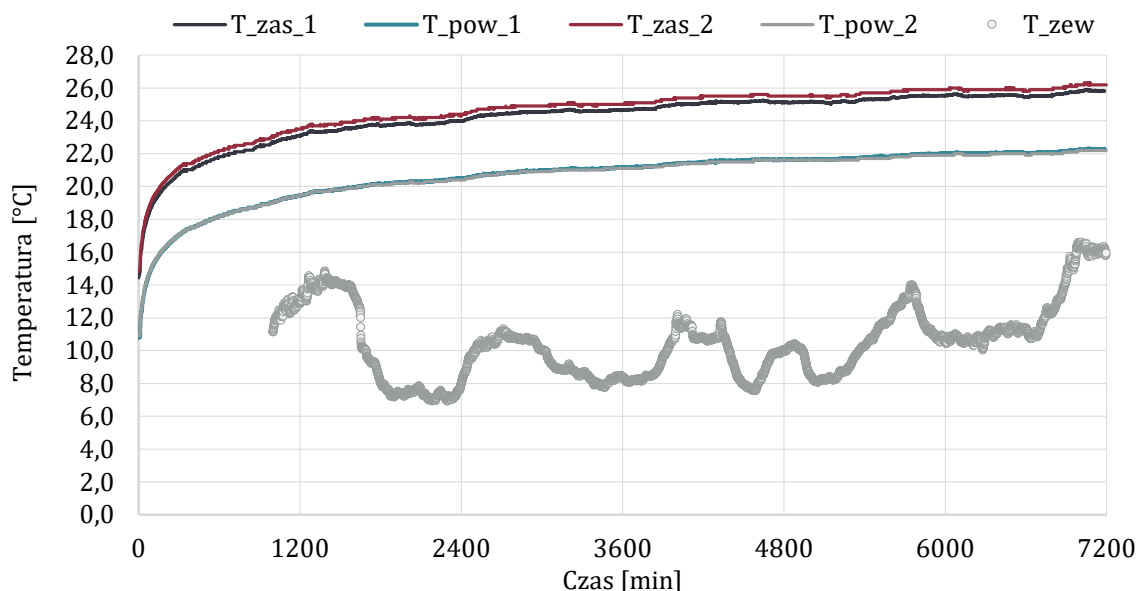
Konstrukcja odwiertu nie pozwalała na przeprowadzenie szczegółowego pomiaru profilu niezakłóconej temperatury gruntu. Został on więc wykonany metodą uproszczoną, poprzez pomiar temperatury czynnika pośredniczącego na wyjściu z odwiertu w trakcie jego powolnego przepompowywania przez wymiennik. Czas przepływu czynnika przez cały wymiennik wyniósł około 7 min. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg zmian temperatury na wylocie z wymiennika. Jak można zauważyć, przez pierwsze 7 min temperatura ta nie zmieniała się w sposób istotny, a jej średnia wartość wynosiła $T_0 = 10,8$ °C. Temperaturę tę wykorzystano w dalszej części prac w obliczeniach wartości oporu cieplnego odwiertu oraz jako daną wejściową (jeden z warunków brzegowych) w opracowanym modelu numerycznym TRT.



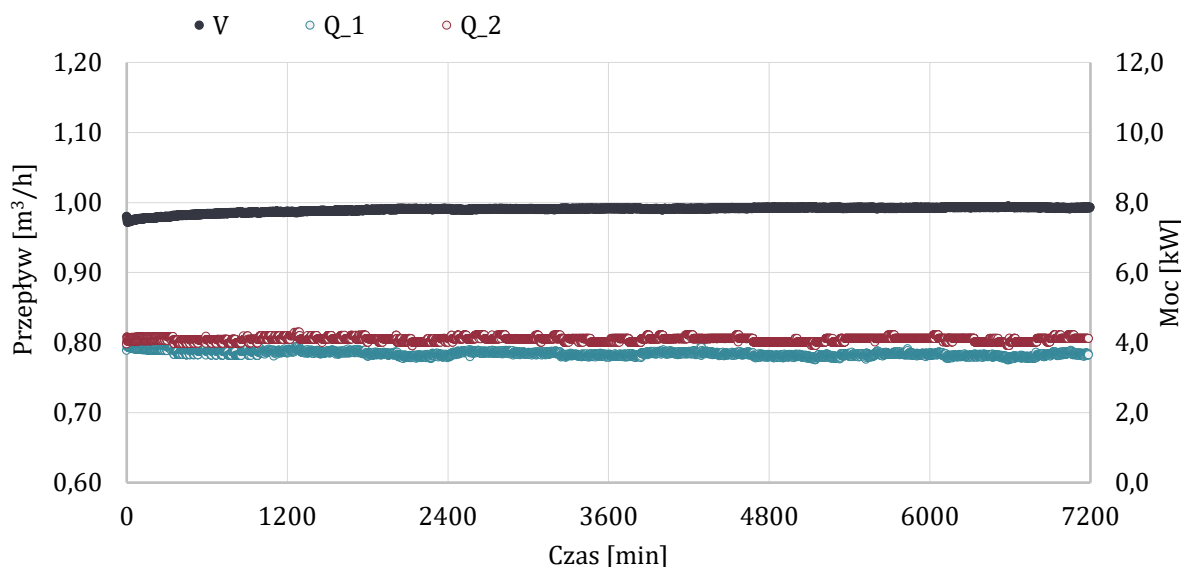
Rysunek 9 Temperatura czynnika na wylocie z wymiennika (T_{pow_1}) w pierwszym etapie TRT (TEST 1)

Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach TRT (TEST 1) przedstawiono na rysunku 10. Zauważalna jest różnica pomiędzy wartościami temperatury zasilania wymiennika ciepła

zmierzonymi w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła i w studni rewizyjnej, różnica ta wynosi średnio 0,4 K. Temperatura powrotu z wymiennika jest niższa od temperatury zasilania, w związku z tym mniejsze są straty ciepła na odcinku pomiędzy pomieszczeniem a studnią, stąd nie zaobserwowano istotnych różnic między temperaturą mierzoną w pomieszczeniu a w studni rewizyjnej. Średnia różnica tych temperatur wynosi 0,05 K. Studnia zlokalizowana jest około 23 m od stanowiska badawczego, co oznacza, że jednostkowa strata ciepła na odcinku zasilającym wyniosła 18,8 W/m.



Rysunek 10 Zmiany temperatur w trakcie TESTU 1 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła)



Rysunek 11 Moc cieplna dostarczana do odwiertu oraz przepływ czynnika w trakcie TESTU 1 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pom. w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pom. w pom. techn. pompy ciepła)

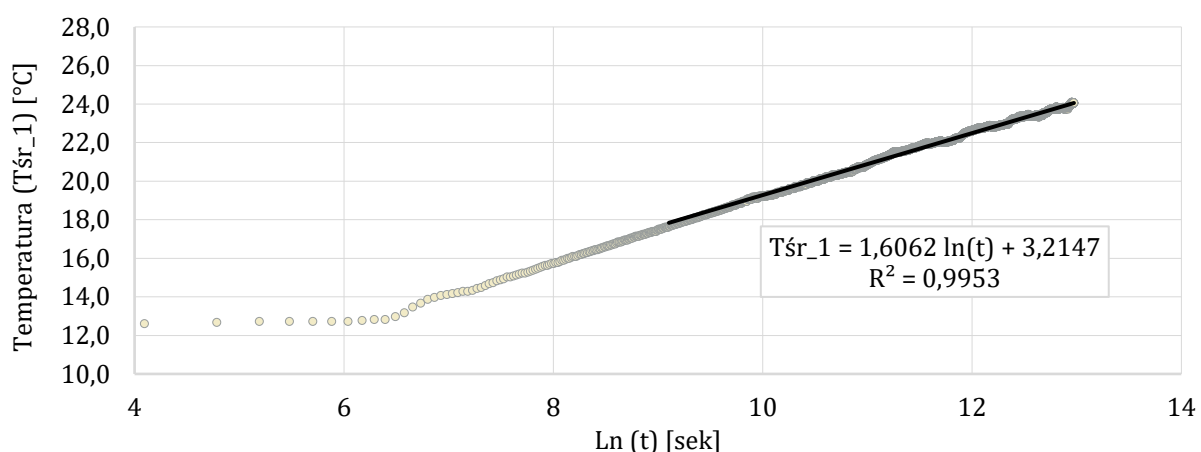
W przypadku stosowania prostych modeli analitycznych, w tym modelu ILS, do interpretacji wyników TRT bardzo ważne jest utrzymanie stałych parametrów testu, takich jak przepływ oraz moc grzałki elektrycznej. Ich wartości w trakcie TESTU 1 przedstawiono na rysunku 11. W trakcie całego czasu trwania pomiarów uzyskano bardzo stabilny przepływ oraz moc dostarczaną do

odwiertu. Jednostkowy strumień ciepła dostarczany do odwiertu wynosił średnio $q = 47,1 \text{ W/m}$ (wariant 1) i $q = 52,4 \text{ W/m}$ (wariant 2).

Na podstawie przedstawionych na rysunkach 9-11 danych pomiarowych wyznaczono efektywną przewodność cieplną gruntu (λ_{ILS}) oraz opór cieplny odwiertu (R_{odw}) metodą nieskończonego źródła liniowego (ILS). Analizę przeprowadzono dla danych pomiarowych ze studni rewizyjnej, rejestrowanych przez system BMS (wariant 1), oraz rejestrowanych przez aparaturę TRT w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (wariant 2). Dzięki temu możliwe było określenie różnic w wartościach parametrów gruntu wyznaczonych dla zróżnicowanej lokalizacji sprzętu pomiarowego. Dodatkowo, przeprowadzono analizę wpływu przedziału czasu, z którego pobierane były dane do wyznaczenia parametrów gruntu na uzyskiwane wyniki.

2.5.2. Efektywna przewodność cieplna

Przeprowadzono analizę wyników TRT wykorzystując model nieskończonego źródła liniowego (ILS) oraz uwzględniając dane od 2,5 h (zgodnie z zaleceniami w literaturze [137]) do 119 h godziny testu. Wyznaczona na podstawie danych z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w studni (wariant 1) wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynosi $\lambda_{ILS} = 2,33 \text{ W/(mK)}$. Szczegółowe wyniki zestawiono w tabeli 9 oraz na rysunku 12.

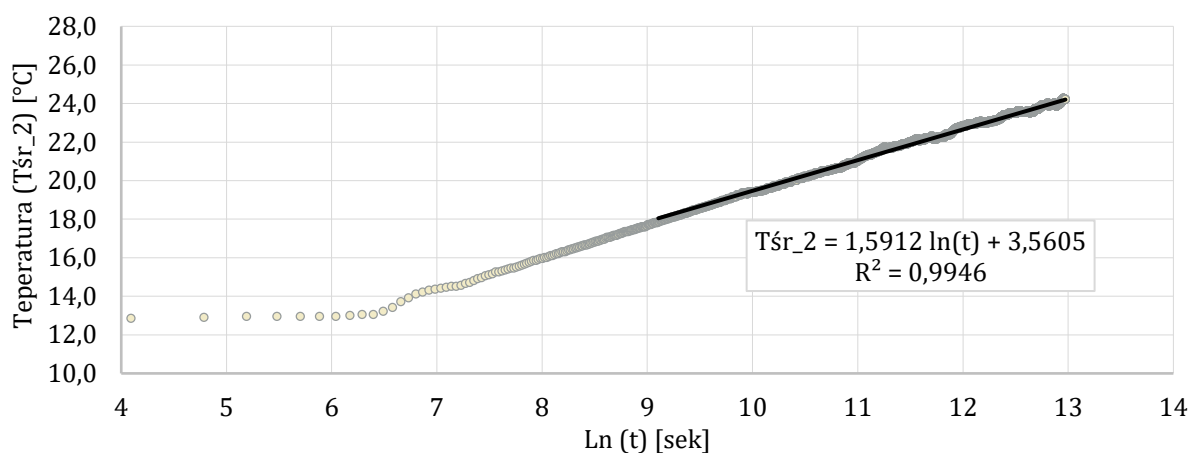


Rysunek 12 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu odpowiadającą okresowi testu 2,5 – 119 h

Tabela 9. Wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1)

Parametr	Wartość	Jednostka
$\lambda_{ILS} = q/(4\pi s) = \dot{m}C_f(T_{zas} - T_{pow})/(4\pi Hs)$	2,33	W/(mK)
gdzie:		
q – jednostkowy strumień ciepła	47,1	W/m
\dot{m} – przepływ masowy płynu	0,285	kg/s
$(T_{zas} - T_{pow})$ – średnia różnica temperatur płynu na wlocie i wylocie z GWC	3,56	K
H – długość gruntowego wymiennika ciepła (GWC)	78	m
C_f – ciepło właściwe płynu	3,617	kJ/(kgK)
ρ_f – gęstość płynu	1031	kg/m^3
s – nachylenie linii $T_{sr} = f(\ln(t))$	1,6062	-

Wyniki analizy przeprowadzonej na podstawie danych z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła zestawiono w tabeli 10 i na rysunku 13. W tym przypadku wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynosi $\lambda_{ILS} = 2,62 \text{ W}/(\text{mK})$. Stwierdzono więc błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynikający z lokalizacji aparatury pomiarowej w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (w tym przypadku było to 23 m od miejsca zainstalowania wymiennika ciepła), wynoszący 12,5% względem wyników uzyskanych na podstawie pomiarów zrealizowanych bezpośrednio przy odwiercie.



Rysunek 13 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 2) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu odpowiadającą okresowi testu 2,5 - 119 h

Tabela 10. Wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1)

Parametr	Wartość	Jednostka
$\lambda_{ILS} = q/(4\pi s) = \dot{m}C_f(T_{zas} - T_{pow})/(4\pi Hs)$	2,62	W/(mK)
gdzie:		
q – jednostkowy strumień ciepła	52,4	W/m
\dot{m} – przepływ masowy płynu	0,283	kg/s
$(T_{zas} - T_{pow})$ – średnia różnica temperatur płynu na wlocie i wylocie GWC	3,986	K
H – długość gruntowego wymiennika ciepła (GWC)	78	m
C_f – ciepło właściwe płynu	3,617	kJ/(kgK)
ρ_f – gęstość płynu	1031	kg/m ³
s – nachylenie linii $T_{sr} = f(\ln(t))$	1,5912	-

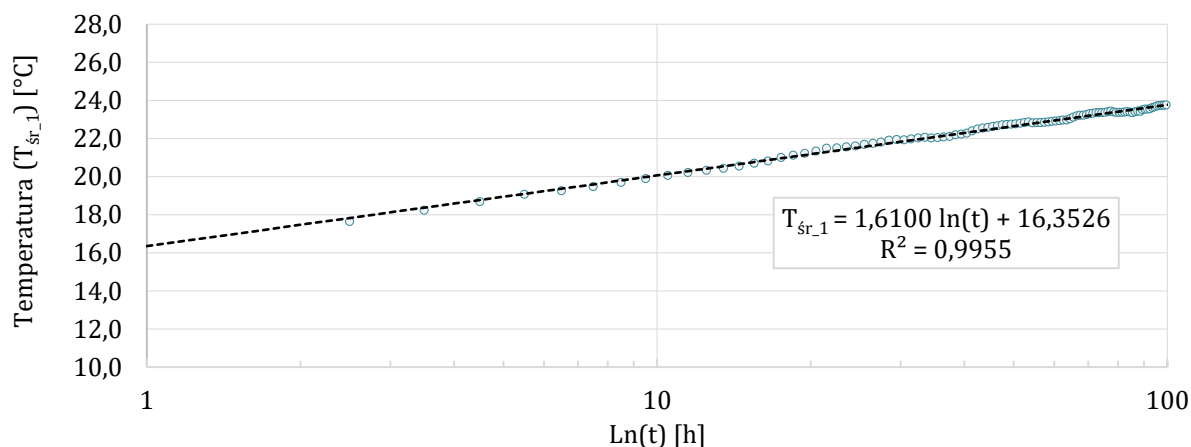
2.5.3. Opór cieplny odwiertu

Największy wpływ na opór cieplny odwiertu mają: przewodność cieplna wypełnienia odwiertu (w badanym wymienniku jest to zaprawa bentonitowa), średnica odwiertu (w badanym wymienniku wynosząca 153 mm) oraz odstęp między rurą zasilającą i powrotną, który w części wymienników stabilizowany jest przez dedykowane separatory mające na celu poprawienie ich właściwości termofizycznych (w badanym wymienniku separatory nie zostały zastosowane).

W tabeli 11 oraz na rysunku 14 zestawiono wyniki obliczeń pomocniczych oraz oporu cieplnego odwiertu, przeprowadzonych na podstawie danych z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w studni rewizyjnej (wariant 1). Obliczenia przeprowadzono dla uśrednionych danych godzinowych. Wartość oporu cieplnego odwiertu wynosi $R_{odw} = 0,0896 \text{ mK}/\text{W}$.

Tabela 11 Wyniki obliczeń oporu cieplnego odwiertu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1)

Parametr	Wartość	Jednostka
$R_{odw} = \frac{1}{4\pi\lambda_{ILS}} \left[\frac{T_{sr-1} - T_0}{s} - \ln \left(\frac{4\alpha_g T_{sr-1}}{\Upsilon r_{odw}^2} \right) \right]$	0,0896	mK/W
gdzie:		
λ_{ILS} – przewodność cieplna gruntu	2,33	W/(mK)
Υ – stała Eulera	0,5772	
T_0 – niezakłócona temperatura gruntu	10,80	°C
$T_{sr-1} (t = 1h)$ – ekstrapolowana średnia temperatura płynu w pierwszej godzinie testu	16,35	°C
α_g – dyfuzyjność cieplna gruntu	0,001862	m ² /h
r_{odw} – promień odwiertu	0,075	m
s – nachylenie linii $T_{sr} = f(\ln(t))$	1,6100	-

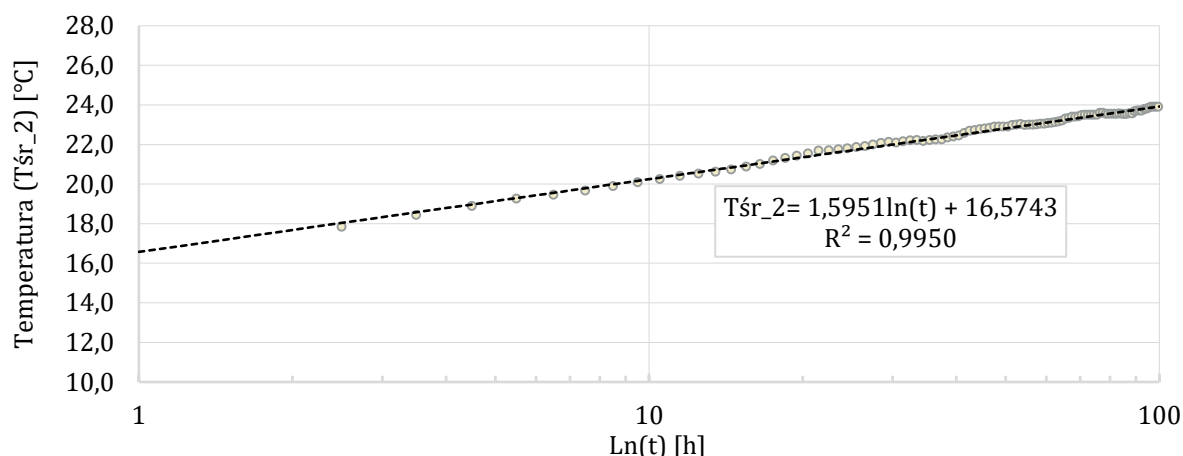


Rysunek 14 Wyznaczenie ekstrapolowanej średniej temp. płynu w pierwszej godzinie TESTU 1 (wariant 1)

W tabeli 12 oraz na rysunku 15 zestawiono wyniki obliczeń pomocniczych oraz oporu cieplnego odwiertu (wynoszącego w tym przypadku $R_{odw} = 0,0807$ mK/W), przeprowadzonych na podstawie danych z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (wariant 2). Obliczenia przeprowadzono dla uśrednionych danych godzinowych.

Tabela 12 Wyniki obliczeń oporu cieplnego odwiertu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 2)

Parametr	Wartość	Jednostka
$R_{odw} = \frac{1}{4\pi\lambda_{ILS}} \left[\frac{T_{sr-1} - T_0}{s} - \ln \left(\frac{4\alpha_g T_{sr-1}}{\Upsilon r_{odw}^2} \right) \right]$	0,0807	mK/W
gdzie:		
λ_{ILS} – przewodność cieplna gruntu	2,62	W/(mK)
Υ – stała Eulera	0,5772	-
T_0 – niezakłócona temperatura gruntu	10,80	°C
$T_{sr-1} (t = 1h)$ – ekstrapolowana średnia temperatura płynu w pierwszej godzinie testu	16,57	°C
α_g – dyfuzyjność cieplna gruntu	0,002105	m ² /h
r_{odw} – promień odwiertu	0,075	m
s – nachylenie linii $T_{sr} = f(\ln(t))$	1,5951	-



Rysunek 15 Wyznaczenie ekstrapolowanej średniej temp. płynu w pierwszej godzinie TESTU 1 (wariant 2)

Uzyskano różne wartości oporu cieplnego odwiertu w zależności od lokalizacji aparatury pomiarowej, podobnie jak różne były wyznaczone dla obu wariantów umiejscowienia czujników współczynniki przewodzenia ciepła gruntu. W przypadku lokalizacji aparatury pomiarowej w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (w tym przypadku było to 23 m od miejsca zainstalowania wymiennika ciepła) stwierdzono błąd wyznaczenia wartości oporu cieplnego odwiertu wynoszący 9,9% względem wyników uzyskanych na podstawie pomiarów zrealizowanych bezpośrednio przy odwiercie.

2.5.4. Ocena stabilności parametrów testu terenowego

Uzyskanie stabilnych parametrów w trakcie TRT jest jednym z podstawowych warunków umożliwiających przeprowadzenie analizy danych pomiarowych z wykorzystaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (ILS). Natomiast, sam model ILS może być wykorzystany jako poziom odniesienia dla bardziej zaawansowanych analiz i modeli uwzględniających m.in. zakłócenia wywołane wpływem warunków atmosferycznych [84]. Taką analizę porównawczą wykonano poniżej.

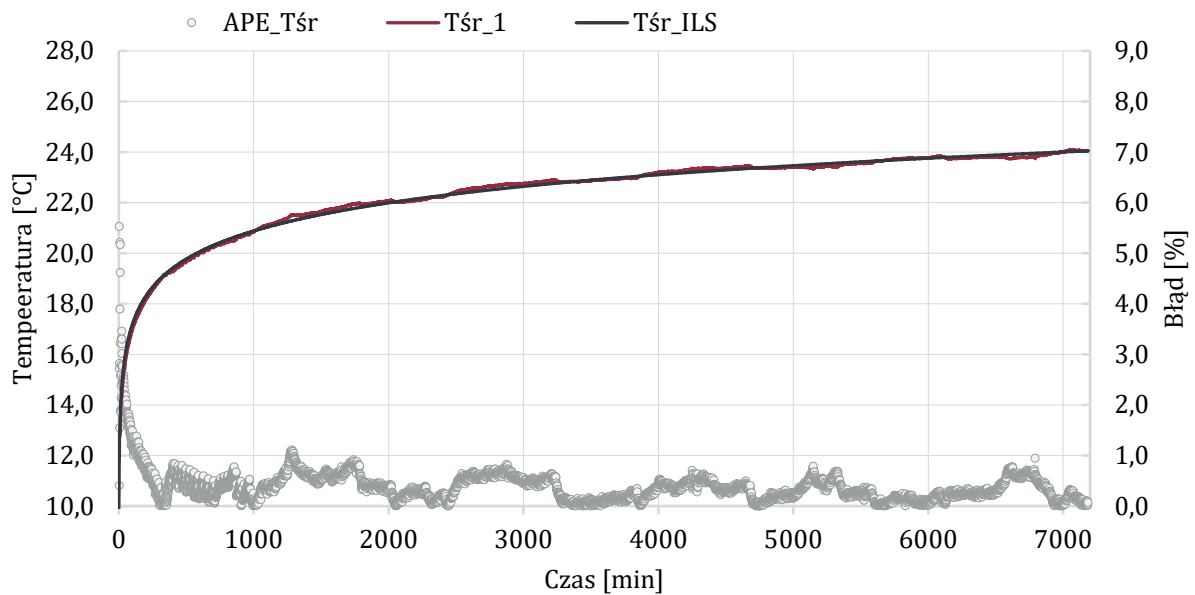
Średnia temperatura krążącego w wymienniku płynu, przybliżona modelem ILS wyrażona jest zależnością (19).

$$T_{sr}(t) = \frac{q}{4\pi\lambda_{ILS}} \ln(t) + \frac{q}{4\pi\lambda_{ILS}} \ln\left(\frac{4\lambda_{ILS}}{C_g r_{odw}^2 \gamma}\right) + R_{odw} \cdot q + T_0 \quad (19)$$

Wykorzystując wyniki pomiarów (TEST 1 - wariant 1) równanie (19) przekształcono do postaci opisanej zależnością (20):

$$T_{sr_ILS} = \frac{q}{4\pi\lambda_{ILS}} \ln(t) + 3,2147 \quad (20)$$

Na rysunku 16 przedstawiono wartości średniej temperatury płynu krążącego w GWC (T_{sr_ILS}) obliczone na podstawie powyższej zależności oraz wartości tej temperatury wynikające z pomiarów (T_{sr_1}). Widoczny na tym rysunku błąd względny wartości temperatury wyznaczonej modelem ILS i wartości zmierzonej jest dość wysoki jedynie w początkowych minutach testu. Już po około 150 minutach osiąga wartości około 1 % i utrzymuje się maksymalnie na tym poziomie do końca trwania procedury TRT.



Rysunek 16 Porównanie zmierzonej i wyznaczonej na podstawie modelu ILS średniej temperatury płynu w GWC dla warunków TESTU 1 (wariant 1)

Średnia odchyłka (ang. *Mean absolute percentage error* – MAPE) wartości temperatury płynu krążącego w gruntowym wymienniku ciepła obliczonej z zastosowaniem modelu ILS względem wartości zmierzonej, wyznaczona na podstawie równania (21) wynosi zaledwie 0,39 %. Niewielka wartość tej odchyłki świadczy o dobrej stabilności parametrów testu.

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{ILS} - T_{pom}}{T_{pom}} \right| \quad (21)$$

2.5.5. Wpływ czasu trwania testu na wyniki pomiarów

Zgodnie z wytycznymi opisanymi w pierwszej części pracy, wymagany dla uzyskania prawidłowych wyników estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu czas trwania TRT powinien wynosić od 36 do 72 h [51] [138]. Zalecenia te są jednak nadal szeroko dyskutowane w literaturze przedmiotu, dlatego zdecydowano się na przeanalizowanie wpływu zmiany tego czasu na wyniki obliczeń. Analizę danych wykonano dla przedziałów czasu rozpoczynających się w $t_p = 2,5$ h, a kończących kolejno w $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110\}$ h. Analizę przeprowadzono dla danych pomiarowych zarejestrowanych przez urządzenia zainstalowane w studni (wariant 1), a jej wyniki zestawiono w tabeli 13 oraz na rysunku 17.

Tabela 13. Wyniki estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych

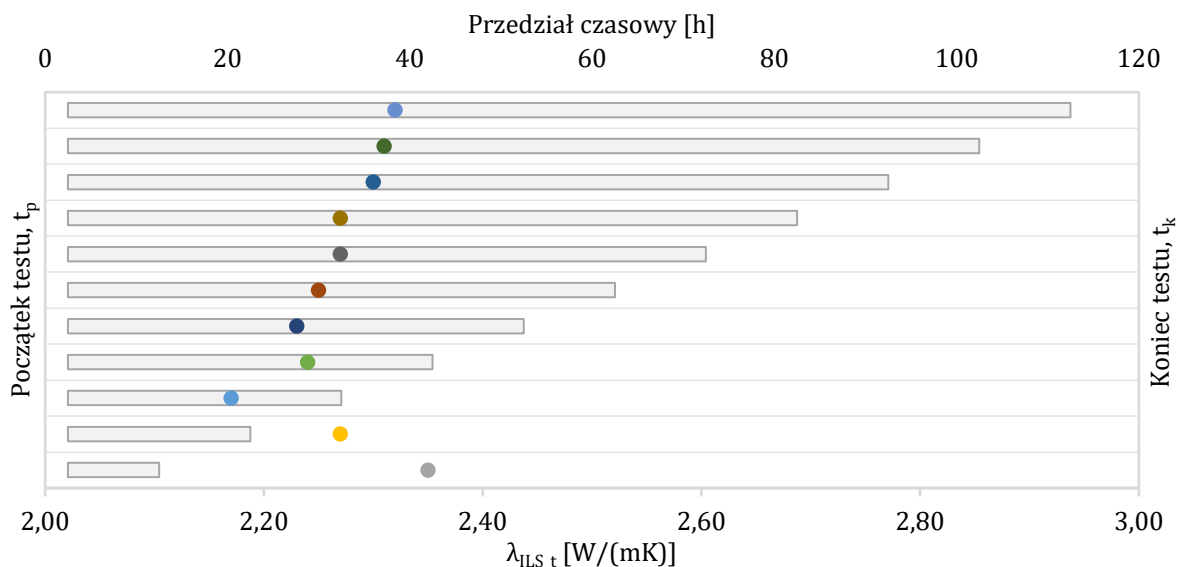
Początek testu, t_p [h]	2,5										
Koniec testu, t_k [h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
s [-]	1,6441	1,6869	1,7566	1,6942	1,7003	1,6806	1,6642	1,6617	1,6344	1,6264	1,6154
q [W/m]	48,44	48,00	47,97	47,60	47,59	47,47	47,41	47,37	47,24	47,20	47,13
$\lambda_{ILS,t}$ [W/(m ² K)]	2,35	2,27	2,17	2,24	2,23	2,25	2,27	2,27	2,30	2,31	2,32
APE [%]	0,86	2,58	6,87	3,86	4,29	3,43	2,58	2,58	1,29	0,86	0,43

Na podstawie zależności (22) wyznaczono błąd wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wyznaczonego dla kolejnych okresów pomiarowych ($\lambda_{ILS,t}$) względem wartości tego współczynnika wyznaczonego dla pomiarów z okresu od 2,5 do 119 h ($\lambda_{ILS} = 2,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

$$APE = \frac{|\lambda_{ILS,t}^i - \lambda_{ILS}|}{\lambda_{ILS}} \cdot 100\% \quad (22)$$

gdzie 'i' oznacza numer analizy, a 't' oznacza inny niż referencyjny przedział czasu analizy.

Błąd wyznaczenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu uzyskanych dla skróconych czasów analizy względem wartości wyznaczonej na podstawie pomiarów zakończonych w 119 godzinie wyniósł maksymalnie 6,87%. Niestety, nie jest możliwe stwierdzenie jaki dokładnie wpływ na wielkość tego błędu miał czas analizy, a jaki chwilowe zakłócenia w przebiegu TRT. Zakłócenie te były niewielkie, jednak skracanie czasu analizy mogło spowodować intensyfikację ich wpływu na wyniki obliczeń prowadzonych metodą ILS. Warto zaznaczyć, że na skutek braku znajomości rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu, wskazane błędy nie pozwalają diagnozować błędów samego modelu ILS, a jedynie błąd poszczególnych wyników względem przyjętego poziomu referencyjnego, czyli wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wyznaczonego dla czasu analizy wynoszącego 2,5 - 119 h.



Rysunek 17 Wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu $\lambda_{ILS,t}$ wyznaczone na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych

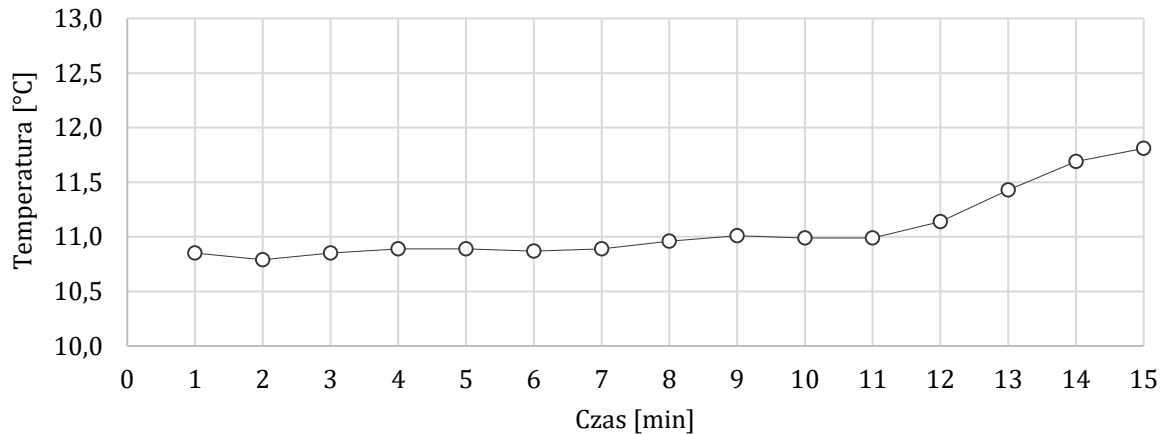
2.6. Wyniki pomiarów – TEST 2

2.6.1. Przebieg testu i zakres analiz

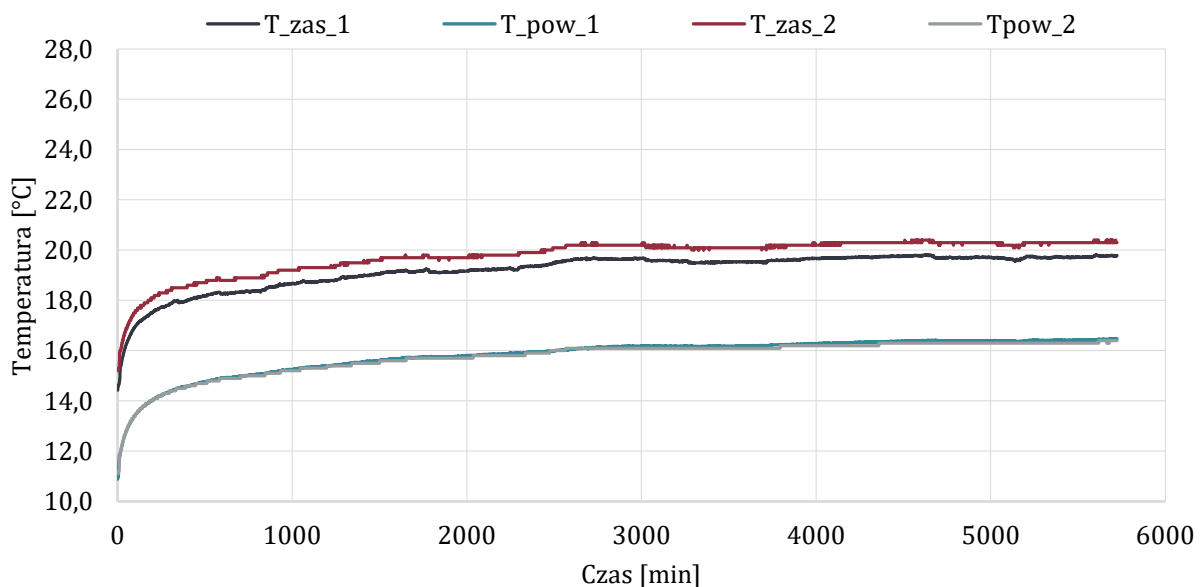
Drugi test odpowiedzi termicznej gruntu (TEST 2) został przeprowadzony dla mocy grzewczej grzałki elektrycznej oraz strumienia czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła zmniejszonych o połowę względem wartości przyjętych w trakcie TESTU 1. Warto zwrócić uwagę na korzyści wynikające z tego rozwiązania. Rekomendowane w literaturze jednostkowe moce grzewcze w trakcie TRT zawierają się w zakresie 49,2 – 82 W/m. Dla rozpatrywanego wymiennika oznacza to moc grzałki elektrycznej w granicach 3,8 – 6,4 kW. Obniżenie mocy urządzenia grzewczego oraz skrócenie czasu trwania testu skutkować będą niższym kosztem wykonania TRT. Tak więc, TEST 2 przeprowadzono dla oceny wpływu znacząco zmniejszonej mocy grzewczej grzałki

elektrycznej oraz zmniejszonego przepływu czynnika na wyniki estymacji współczynnika przewodzenia gruntu metodą ILS.

Wyniki pomiarów zarejestrowane w czasie TESTU 2 przedstawiono na rysunkach 18-20. Na rysunku 18 przedstawiono wartości temperatury płynu na wylocie z wymiennika w pierwszych 15 minutach testu (zarejestrowane w trakcie powolnego przepompowywania płynu przez GWC). Jak można zauważyć, przez pierwsze 7 min temperatura ta nie zmieniała się w sposób istotny, a jej średnia wartość wynosiła $T_0 = 10,9 \text{ } ^\circ\text{C}$.



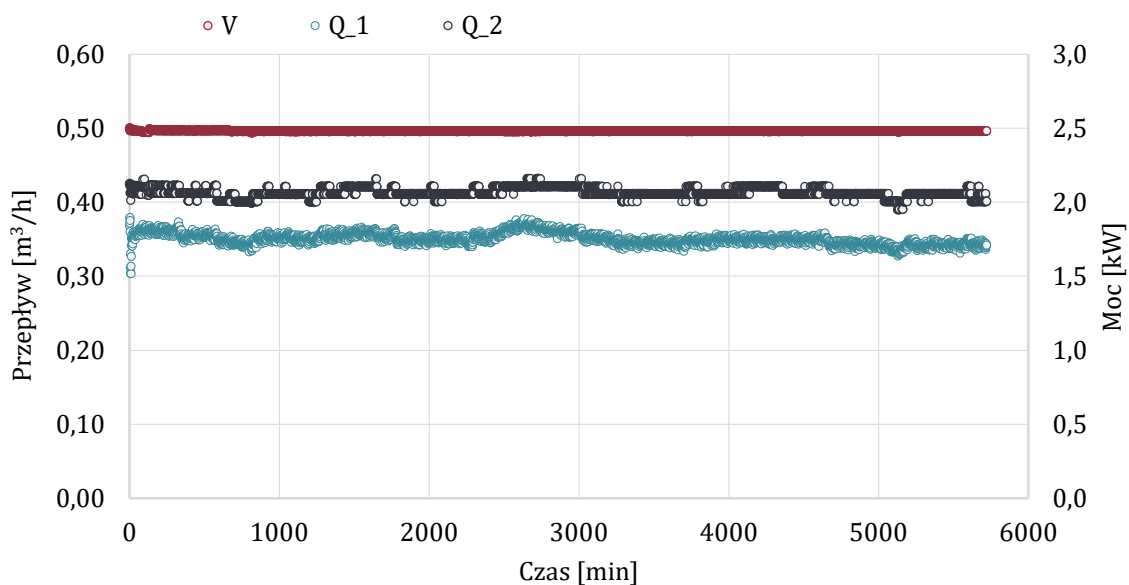
Rysunek 18 Temperatura czynnika na wylocie z wymiennika (T_{pow_1}) w pierwszym etapie TRT (TEST 2)



Rysunek 19 Zmiany temperatur w trakcie TESTU 2 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła)

Na rysunku 19 przedstawiono zmiany wartości temperatur płynu krążącego w GWC rejestrowanych przez czujniki temperatury w studni rewizyjnej (wariant 1) oraz przez aparaturę TRT zainstalowaną w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (wariant 2). Zauważalna jest różnica pomiędzy wartościami temperatur zasilania wymiennika ciepła zmierzonymi w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła i w studni rewizyjnej, różnica ta wynosi średnio $0,6 \text{ K}$. Nie zaobserwowano istotnych różnic między temperaturą powrotu z GWC mierzoną w pomieszczeniu a w studni rewizyjnej, średnia różnica tych temperatur wynosi $0,07 \text{ K}$. W wyniku zakłóceń, które pojawiły się po 61 godzinie trwania TRT, zdecydowano, że obliczenia

przewodności cieplnej gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu będą wykonywane dla okresu od 2,5 h do 61 h. W pozostawionym w analizie czasie trwania pomiarów (do 61 godziny) w trakcie TESTU 2 uzyskano bardzo stabilny przepływ oraz moc dostarczaną do odwiertu (rysunek 20). Jednostkowy strumień ciepła dostarczany do odwiertu wynosił średnio $q = 22,6 \text{ W/m}$ (wariant 1) i $q = 26,5 \text{ W/m}$ (wariant 2).

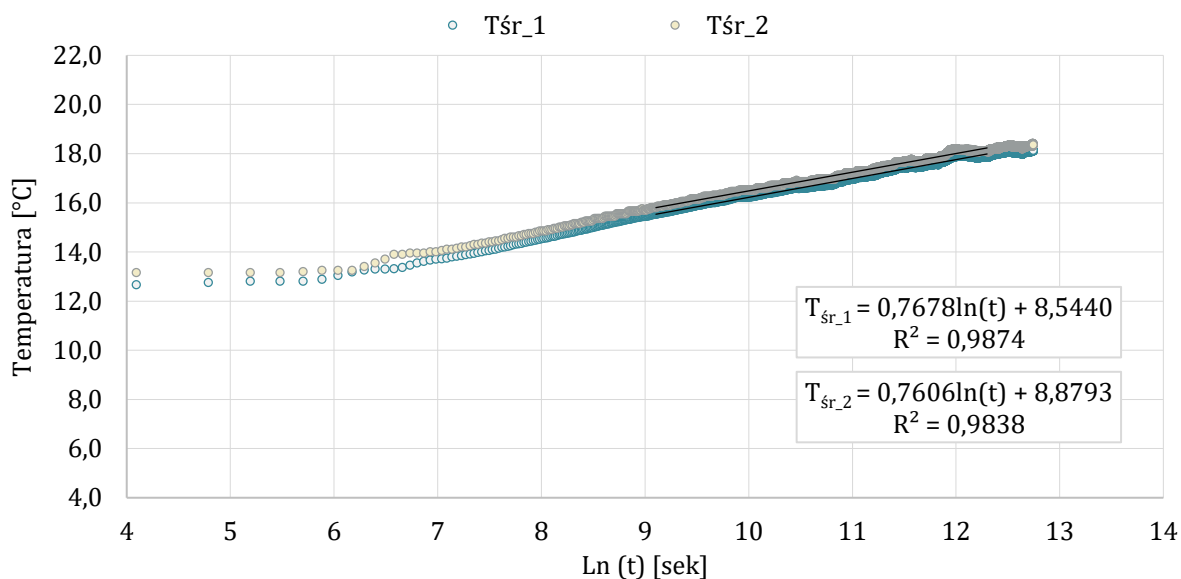


Rysunek 20 Moc cieplna dostarczana do odwiertu oraz przepływ czynnika w trakcie TESTU 1 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pom. w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pom. w pom. techn. pompy ciepła)

Na podstawie przedstawionych na rysunkach 18-20 danych pomiarowych wyznaczono efektywną przewodność cieplną gruntu (λ_{ILS}) oraz opór cieplny odwiertu (R_{odw}) metodą nieskończonego źródła liniowego (ILS). Analizę przeprowadzono dla danych pomiarowych ze studni rewizyjnej, rejestrowanych przez system BMS (wariant 1), oraz rejestrowanych przez aparaturę TRT (wariant 2). Dodatkowo, przeprowadzono analizę wpływu przedziału czasu, z którego pobierane były dane do wyznaczenia parametrów gruntu na uzyskiwane wyniki.

2.6.2. Efektywna przewodność cieplna

Na rysunku 21 przedstawiono zmiany wartości średniej temperatury płynu krążącego w GWC w funkcji logarytmu z czasu dla obu lokalizacji czujników pomiarowych, w studni rewizyjnej (wariant 1) oraz pomieszczeniu technicznym (wariant 2) podczas TESTU 2. Obliczenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu przeprowadzono analogicznie jak dla TESTU 1. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 14. Wartość efektywnej przewodności cieplnej gruntu wynosi $\lambda_{ILS} = 2,34 \text{ W/(mK)}$ dla wariantu 1 i $\lambda_{ILS} = 2,77 \text{ W/(mK)}$ dla wariantu 2. Wartość oporu cieplnego odwiertu wynosi $R_{odw} = 0,1451 \text{ mK/W}$ dla wariantu 1 i $R_{odw} = 0,1297 \text{ mK/W}$ dla wariantu 2. Uzyskano różne wartości parametrów gruntu w zależności od lokalizacji aparatury pomiarowej. W przypadku lokalizacji aparatury pomiarowej w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (w tym przypadku było to 23 m od miejsca zainstalowania wymiennika ciepła) stwierdzono błąd wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynoszący 18,4 % oraz błąd wyznaczenia oporu cieplnego odwiertu wynoszący 10,6% względem wyników uzyskanych na podstawie pomiarów zrealizowanych bezpośrednio przy odwiercie.



Rysunek 21 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1 i 2) w funkcji $\ln(t)$ wraz z liniami trendu odpowiadającymi okresowi testu 2,5 - 61 h

Tabela 14. Wyniki estymacji parametrów gruntu na podstawie danych z TESTU 2 (wariant 1 i 2)

Parametr	Wariant 1	Wariant 2	Jednostka
λ_{ILS} – efektywna przewodność cieplna gruntu	2,34	2,77	W/(mK)
R_{odw} – opór cieplny odwiertu	0,1468	0,1312	mK/W

Wyniki analizy danych pomiarowych z TESTU 1 (dla 4 kW i 1 m³/h) i TESTU 2 (dla 2 kW i 0,5 m³/h) dla obu wariantów lokalizacji czujników pomiarowych, wariant 1 (w studni rewizyjnej przy odwiercie) i wariant 2 (w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła, około 23 metry od odwiertu) podsumowano poniżej.

- Wartości przewodności cieplnej gruntu obliczone na podstawie pomiarów w studni (wariant 1) dla TESTU 1 i TESTU 2 różnią się zaledwie o 0,43%.
- Wartości przewodności cieplnej gruntu obliczone na podstawie pomiarów w pomieszczeniu (wariant 2) dla TESTU 1 i TESTU 2 różnią się o 5,73%.
- Większą różnicę w wartości przewodności cieplnej gruntu pomiędzy wariantem 1 a 2 uzyskano w TEŚCIE 2 – 18,38% niż w TEŚCIE 1 – 12,45%.
- Wartości oporu cieplnego odwiertu wyznaczone na podstawie pomiarów w studni (wariant 1) dla TESTU 1 i TESTU 2 różnią się o 63,9%.
- Wartości oporu cieplnego odwiertu wyznaczonego na podstawie pomiarów w pomieszczeniu (wariant 2) dla TESTU 1 i TESTU 2 różnią się o 62,6%.
- Większą różnicę w wartości oporu cieplnego odwiertu pomiędzy wariantem 1 a 2 uzyskano w TEŚCIE 2 – 10,65% niż w TEŚCIE 1 – 9,93%.

Podsumowując, redukcja mocy grzewczej i przepływu płynu w GWC o połowę w trakcie TRT (w analizowanym przypadku) nie miała istotnego wpływu na wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS. Natomiast, wartości oporu cieplnego gruntu wyznaczone dla danych pomiarowych z TESTU 1 i 2 różnią się znacząco, co jest prawdopodobnie efektem znacznie zmniejszonego przepływu czynnika w GWC. Niestety, ze względu na zakłócenia jakie pojawiły się w trakcie TESTU 2, analiza pozyskanych z niego danych możliwa była dla okresu od

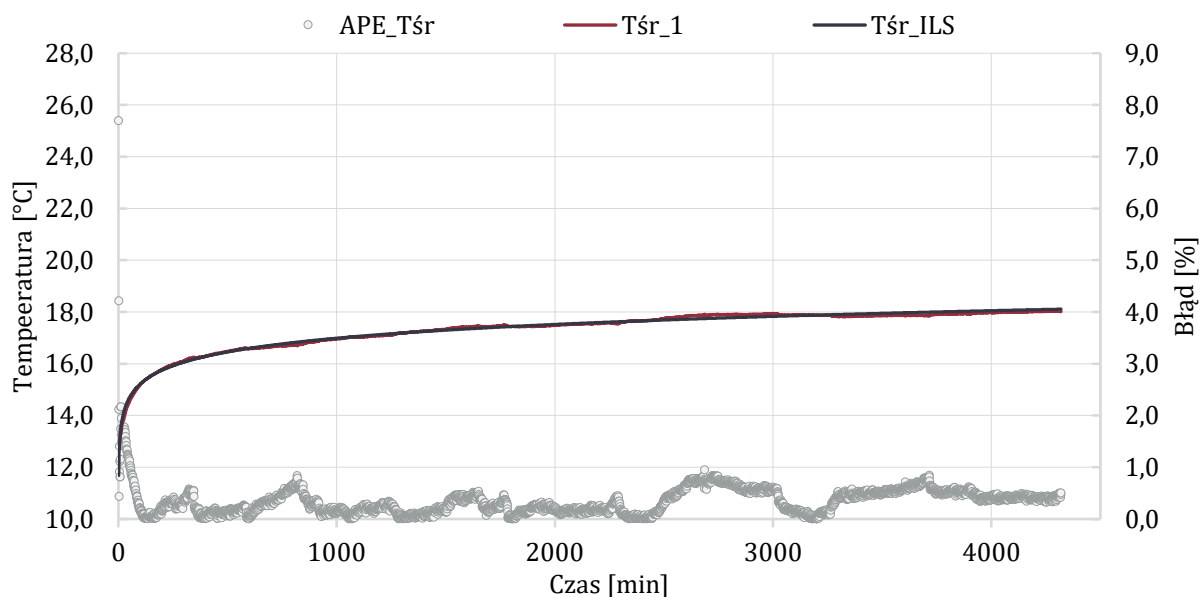
2,5 do 61 godziny, a nie do 119 godziny (jak w przypadku TESTU 1). Tak więc, wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie danych z TESTU 1 i TESTU 2 różnią się czasem analizy, aczkolwiek w obu przypadkach czas ten jest dość długi. Zalecenia podawane w literaturze dotyczące czasu trwania TRT (maksymalnie 72 h) pozwalają zakładać, że po 60 godzinie testu wpływ na wyniki mają już raczej zakłócenia, jakie pojawiły się w trakcie pomiarów niż czas przyjęty do analizy danych. Warto zauważyć, że badania dotyczące wrażliwości TRT na różne czynniki prowadzone w warunkach terenowych są problematyczne w interpretacji. Trudno bowiem o precyzyjną ocenę, który z czynników i w jakim stopniu miał wpływ na uzyskane rezultaty analizy danych. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że przy zachowaniu stabilnych parametrów prawdopodobnie istnieje możliwość przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu w warunkach zredukowanej mocy oraz przepływu płynu, przy zachowaniu dobrej dokładności estymacji parametrów gruntu, aczkolwiek co najmniej przepływ płynu w GWC powinien być dostosowany do docelowych warunków eksploatacji, jego wartość ma bowiem istotny wpływ na wartość oporu cieplnego odwiertu.

2.6.3. Ocena stabilności parametrów testu terenowego

Podobnie jak dla TESTU 1, dla TESTU 2 wykonano ocenę stabilności parametrów w trakcie TRT. Wykorzystując wyniki pomiarów (TEST 2 - wariant 1) równanie (19) przekształcono do postaci opisanej zależnością (23):

$$T_{sr_ILS} = \frac{q}{4\pi\lambda_{ILS}} \ln(t) + 8,5440 \quad (23)$$

Na rysunku 22 przedstawiono wartości średniej temperatury płynu krążącego w GWC (T_{sr_ILS}) obliczone na podstawie powyższej zależności oraz wartości tej temperatury wynikające z pomiarów (T_{sr_1}). Widoczny na tym rysunku błąd względny wartości temperatury wyznaczonej modelem ILS i wartości zmierzonej już po około 50 minutach osiąga wartości poniżej 1 % i utrzymuje się maksymalnie na tym poziomie do końca trwania procedury TRT.



Rysunek 22 Porównanie zmierzonej i wyznaczonej na podstawie modelu ILS średniej temperatury płynu w GWC dla warunków TESTU 2 (wariant 1)

Średnia odchyłka (MAPE) wartości temperatury płynu krążącego w gruntowym wymienniku ciepła obliczonej z zastosowaniem modelu ILS względem wartości zmierzonej wyznaczona na podstawie równania (21) wynosi zaledwie 0,34 %. Ta niewielka odchyłka, tak jak w przypadku TESTU 1, świadczy o dobrej stabilności parametrów testu.

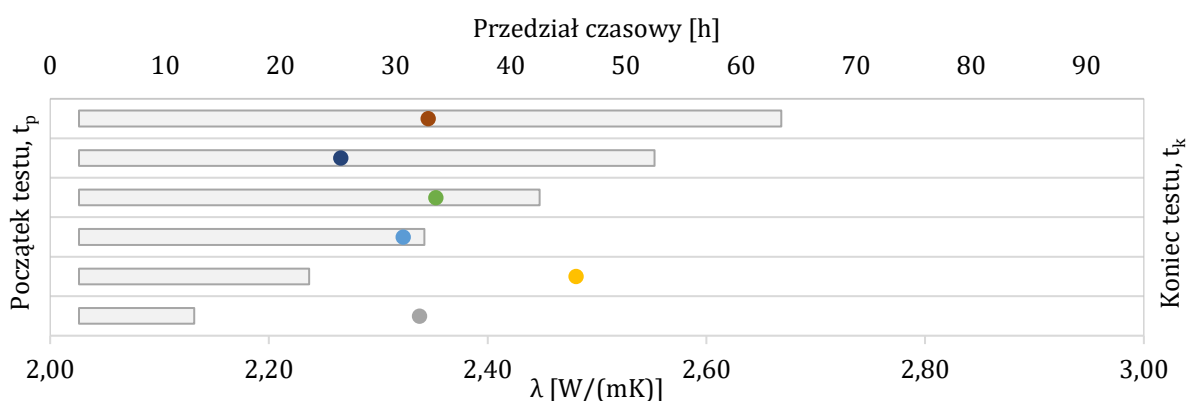
2.6.4. Wpływ czasu trwania testu na wyniki pomiarów

Analizę wrażliwości wyników estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu na zmianę okresu pomiarowego dla TESTU 2 przeprowadzono dla danych pomiarowych zarejestrowanych przez urządzenia zainstalowane w studni (wariant 1), a jej wyniki zestawiono w tabeli 15 oraz na rysunku 23. Analizę danych wykonano dla przedziałów czasu rozpoczynających się w $t_p = 2,5$ h, a kończących kolejno w $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 61\}$ h.

Tabela 15. Wyniki estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 2 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych

Początek testu, t_p [h]	2,5					
Koniec testu, t_k [h]	10	20	30	40	50	61
s [-]	0,7759	0,7220	0,7746	0,7625	0,7969	0,7678
q [W/m]	22,78	22,50	22,60	22,53	22,68	22,60
$\lambda_{ILS,t}$ [W/(m ² K)]	2,34	2,48	2,32	2,35	2,27	2,34
APE [%]	0,10	6,02	0,74	0,54	3,17	0,25

W tabeli 15 przedstawiono błąd (APE) wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wyznaczonego dla kolejnych okresów pomiarowych ($\lambda_{ILS,t}$) względem wartości tego współczynnika wyznaczonego dla przedziału czasu od 2,5 do 61 h (λ_{ILS}). Obliczenia tego błędu wykonano zgodnie z opisanym wcześniej równaniem (22). TEST 2 (przeprowadzony dla mniejszych o połowę mocy grzewczej oraz przepływu) nie wykazał większej wrażliwości wyniku estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu na zmianę okresu pomiarowego analizy niż TEST 1. W odniesieniu do wartości efektywnej przewodności cieplnej wynoszącej 2,34 W/(mK), maksymalny błąd względny (APE) wynosi 6,02%.



Rysunek 23. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu $\lambda_{ILS,t}$ wyznaczona na podstawie danych z TESTU 2 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych

2.7. Podsumowanie

W ramach badań terenowych przeprowadzono dwa testy odpowiedzi termicznej gruntu na gruntowym wymienniku ciepła zlokalizowanym w Świdnicy. Parametry testów ustalono w sposób mający pozwolić na porównanie wyników estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu dla różnych mocy grzewczych oraz różnych przepływów. Dodatkowo, dla każdego z testów analizowano dane pozyskane na podstawie dwóch zestawów urządzeń pomiarowych: czujników zamontowanych w studni rewizyjnej (wariant 1) oraz czujników zamontowanych w aparaturze TRT zainstalowanej w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła (wariant 2). Szczegółowe wnioski z przeprowadzonych badań przedstawiono poniżej.

- Przeprowadzone badania wykazały znaczący wpływ lokalizacji aparatury badawczej na wyniki estymacji parametrów gruntu modelem ILS. Jeśli jest to możliwe, aparatura TRT powinna znajdować się możliwie blisko odwiertu i być zabezpieczona przed oddziaływaniem warunków zewnętrznych (stratami ciepła i nasłonecznieniem).
- Stwierdzono niewielki wpływ zarówno mocy urządzenia grzewczego, jak i przepływu płynu w GWC w trakcie testu odpowiedzi termicznej na wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu modelem ILS. Natomiast, zmiana parametrów TRT wpłynęła istotnie na wartość oporu cieplnego odwiertu (czynnikiem decydującym o uzyskaniu różnych wartości była prawdopodobnie zmiana przepływu płynu w wymienniku).
- Wyniki analizy danych z TRT uzyskane z wykorzystaniem metody nieskończonego źródła liniowego (ILS) okazały się dość wrażliwe na „czas trwania testu” (w tym przypadku okres, z którego pobrano dane pomiarowe do analizy). Dokładną ocenę tej wrażliwości utrudniły niewielkie, ale jednak występujące w trakcie procedury TRT zakłócenia.
- Stwierdzono, że przeprowadzenie szczegółowej analizy wrażliwości TRT oraz wyznaczonych z zastosowaniem modelu ILS parametrów gruntu na różne czynniki, na podstawie testów terenowych nie jest możliwe ze względu na: czas, koszty testu, trudny do określenia poziom wpływu warunków zewnętrznych, konieczność doprowadzenia gruntu do stanu ustalonego po każdym teście (co trwa zwykle od kilku do kilkunastu dni). Ponadto, badania dotyczące wrażliwości TRT na różne czynniki prowadzone w warunkach terenowych są problematyczne w interpretacji. Trudno o precyzyjną ocenę, który z czynników i w jakim stopniu miał wpływ na uzyskane rezultaty analizy danych. Dodatkowo, problemem jest brak głównej danej wejściowej – rzeczywistego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Wszelkie analizy wrażliwości prowadzone na podstawie testów terenowych dają obraz błędów wyznaczonych względem przyjętego poziomu odniesienia (np. testu z daną mocą, przepływem i danym okresie analizy danych), a nie względem rzeczywistej przewodności cieplnej badanego ośrodka.
- Ze względu na powyższe problemy zdecydowano się na wykorzystanie szczegółowego modelowania numerycznego TRT, mającego na celu przeprowadzenie precyzyjnej analizy wrażliwości wyników estymacji współczynnika przewodzenia ciepła modelem ILS na wybrane czynniki. Zgromadzone w testach terenowych dane pomiarowe wykorzystano jako warunki brzegowe modelu numerycznego, a przebieg temperatur płynu w GWC do kalibracji i walidacji tego modelu. Przyjęto, że dalsze analizy będą prowadzone wyłącznie z wykorzystaniem danych mierzonych w studni rewizyjnej, ponieważ są one w mniejszym stopniu obciążone błędem wynikającym z wpływu warunków zewnętrznych.

3. Model numeryczny TRT

3.1. Cel i zakres prac

Analiza danych pozyskanych z testów odpowiedzi termicznej (TRT) jest od lat realizowana dzięki prostym modelom analitycznym, w tym bardzo często dzięki metodzie bazującej na modelu nieskończonego źródła liniowego (ILS). Niestety, jej stosowanie wymaga zachowania stabilnych parametrów testu, tj. mocy źródła ciepła oraz przepływu czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła. Ponadto, model ten może być stosowany w przypadku systemów, w których nie dochodzi do dynamicznych zaburzeń przepływu ciepła między górotworem a wymiennikiem. Zaburzenia takie mogą być spowodowane przykładowo przez przepływ wody gruntowej bądź adwekcję. Pomimo wielu przeprowadzonych dotychczas prac, cały czas istnieje potrzeba rozszerzenia badań dotyczących wrażliwości tej metody analizy danych z testów TRT na różne czynniki [145].

Dynamiczny rozwój oprogramowania służącego numerycznej mechanice płynów oraz zwiększenie mocy obliczeniowych ogólnodostępnych komputerów sprawiły, że coraz częściej wykorzystuje się ją do modelowania i badania wpływu różnych zjawisk na pracę gruntowych wymienników ciepła (GWC), w tym na wyniki TRT. Przeprowadzanie takich badań na podstawie testów in-situ wiąże się z poniesieniem istotnych kosztów związanych z transportem sprzętu pomiarowego, kontrolą pracy, zabezpieczeniem przed kradzieżą, opłatami eksploatacyjnymi za energię elektryczną oraz w przypadku braku instalacji testowej – podjęciem współpracy z firmą wykonawczą. Modelowanie numeryczne pozwala na skrócenie czasu trwania prac badawczo rozwojowych oraz uzyskanie i kontrolę parametrów testu nieosiągalną w warunkach terenowych (np. kontrolę prędkości filtracji wód podziemnych). Negatywnymi cechami modelowania numerycznego są natomiast wysoka cena oprogramowania, konsultacji, szkoleń oraz konieczność posiadania danych do walidacji modelu numerycznego.

W tym rozdziale pracy doktorskiej opisano proces konstruowania, kalibracji i walidacji modelu numerycznego testu odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) w środowisku ANSYS® 2020 R2 z solverem obliczeniowym Fluent. Prace rozpoczęto od przygotowania w module Ansys Design Modeler geometrii gruntowego wymiennika ciepła na podstawie danych o konstrukcji wymiennika zlokalizowanego w Świdnicy, na którym przeprowadzono opisane w rozdziale 2 testy terenowe. Następnie przeprowadzono proces dyskretyzacji modelu w preprocesorze Ansys Meshing. Kolejno, przyjęto parametry fizyczne domen obliczeniowych, warunki brzegowe i początkowe oraz wykonano wstępne symulacje. Przeprowadzono kalibrację modelu numerycznego obejmującą: zmianę modelu turbulencji, kroku czasowego, ilości iteracji, zmiany współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy bentonitowej, gruntu i u-rury. Oceniono odpowiedź temperaturową modelu numerycznego poprzez porównanie z modelem ILS, a następnie przeprowadzono kalibrację i walidację względem wyników testów terenowych (zarówno względem wyników TESTU 1, jak i TESTU 2).

3.2. Konstruowanie modelu numerycznego TRT

3.2.1. Wprowadzenie

Modelowanie rozkładu temperatury oraz przepływu ciepła w gruntowych wymiennikach ciepła jest trudnym obliczeniowo problemem. Jedną z metod stosowanych do symulowania przepływu ciepła w GWC jest modelowanie numeryczne. Najczęściej wykorzystywaną w takich obliczeniach jest Metoda Objętości Skończonych (inne metody to Metoda Elementów Skończonych oraz Metoda Różnic Skończonych). W ramach niniejszej pracy doktorskiej model numeryczny TRT został opracowany w środowisku ANSYS® 2020 R2 z solverem obliczeniowym Fluent. Przygotowanie modelu numerycznego TRT w tym narzędziu objęło kilka etapów:

- opracowanie geometrii modelu (określenie wymiarów oraz domen obliczeniowych),
- konstruowanie siatki obliczeniowej (dyskretyzacja modelu) i kontrolę jej jakości,
- przygotowanie, na podstawie przeprowadzonych pomiarów terenowych, bazy danych wejściowych obejmujących m.in.: niezakłóconą temperaturę gruntu, prędkość płynu na wlocie do odwiertu, moc dostarczaną do odwiertu, itd.,
- scharakteryzowanie domen obliczeniowych (podanie właściwości fizycznych materiałów modelowanego ośrodka oraz warunków początkowych i brzegowych modelu),
- zaprogramowanie niestandardowych funkcji modelu i zaimplementowanie ich do solvera obliczeniowego programu,
- wykonanie obliczeń numerycznych dla gruntu niezakłóconego w warunkach ustalonych, (będących punktem początkowym dla inicjalizacji obliczeń w stanie nieustalonym),
- ustalenie kroku czasowego, wymaganej ilości iteracji i wykonanie właściwych obliczeń numerycznych w stanie nieustalonym,
- analizę wyników symulacji numerycznych, walidację i kalibrację modelu względem przeprowadzonych pomiarów terenowych.

3.2.2. Wyjaśnienie fizyki zjawiska

Transport ciepła w ośrodku gruntowym wokół GWC opisywany jest za pomocą współrzędnych przestrzennych oraz czasu i obejmuje przenoszenie ciepła drogą konwekcji z płynu krążącego w wymienniku do u-rury oraz przewodzenie do materiału wypełniającego odwiert i górotworu [139]. Częstym założeniem jest pomijanie konwekcyjnego przepływu ciepła w górotworze. Na występowanie tej konwekcji największy wpływ ma przepływ wody gruntowej, założenie to jest więc możliwe w przypadku modelowania wymiany ciepła w wymiennikach gruntowych zlokalizowanych w złożach o niskiej przepuszczalności. W takich przypadkach transport ciepła w gruncie można opisać równaniem różniczkowym nieustalonego przewodzenia ciepła, tzn. równaniem Fouriera – Kirchhoffa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = C_g \rho_g \frac{\partial T}{\partial t} \quad (24)$$

gdzie:

$T = T(x, y, z, t)$ – temperatura [K],

C_g – ciepło właściwe gruntu [J/kgK],

ρ_g – gęstość gruntu [kg/m³],

$\lambda_{x,y,z} = \lambda_g$ – przewodność cieplna gruntu [W/mK].

Pole prędkości płynu, temperatury i ciśnienia może być opisane równaniami matematycznymi np. w układzie współrzędnych x, y, z oraz t . Pięć nieznanymi zmiennymi w tych równaniach to:

- trzy komponenty prędkości: $w_x(x, y, z, t), w_y(x, y, z, t), w_z(x, y, z, t)$,
- temperatura: $T(x, y, z, t)$,
- ciśnienie: $p(x, y, z, t)$.

Opisując przepływ płynu i ciepła w GWC niezbędnych jest pięć równań składających się z:

- równania ruchu płynu, znanego jako Naviera-Stokesa,
- równania ciągłości płynu,
- równania wymiany ciepła dla strumienia płynu.

Przyjmując następujące uproszczenia:

- wymiana ciepła odbywa się promieniowo,
- właściwości termiczne otworu wiertniczego i otaczającego gruntu są jednorodne, izotropowe i niezależne od temperatury,
- temperatura niezakłóconego gruntu jest jednorodna,
- migracja temperatury spowodowana migracją wilgoci jest pomijalna,
- wymiana ciepła pomiędzy odwiertem a gruntem przy idealnym kontakcie odbywa się na zasadzie czystego przewodzenia ciepła i nie ma oporu kontaktu,
- brak wymiany ciepła w kierunku pionowym pomiędzy warstwami gruntu,
- płyn nieściśliwy, wówczas: $\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$,
- płyn Newtonowski i jego właściwości termofizyczne (przewodność, ciepło właściwe, gęstość) są stałe i nie mają miejsca żadne reakcje chemiczne oraz fizyczne transformacje.

otrzymuje się:

- równanie Naviera-Stokesa:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left(\frac{\partial w_x}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial w_y}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial w_z}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (25)$$

- równanie ciągłości płynu:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_z) = 0 \quad (26)$$

- równanie wymiany ciepła:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda_f}{\rho_f \cdot c_f} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (27)$$

gdzie:

w_x, w_y, w_z – wektory prędkości przepływu [m/s],

$T = T(x, y, z, t)$ – temperatura [K],

ρ_f – gęstość płynu [kg/m^3],

$\mu_f = \mu(T)$ – lepkość dynamiczna płynu [$Pa \cdot s$],

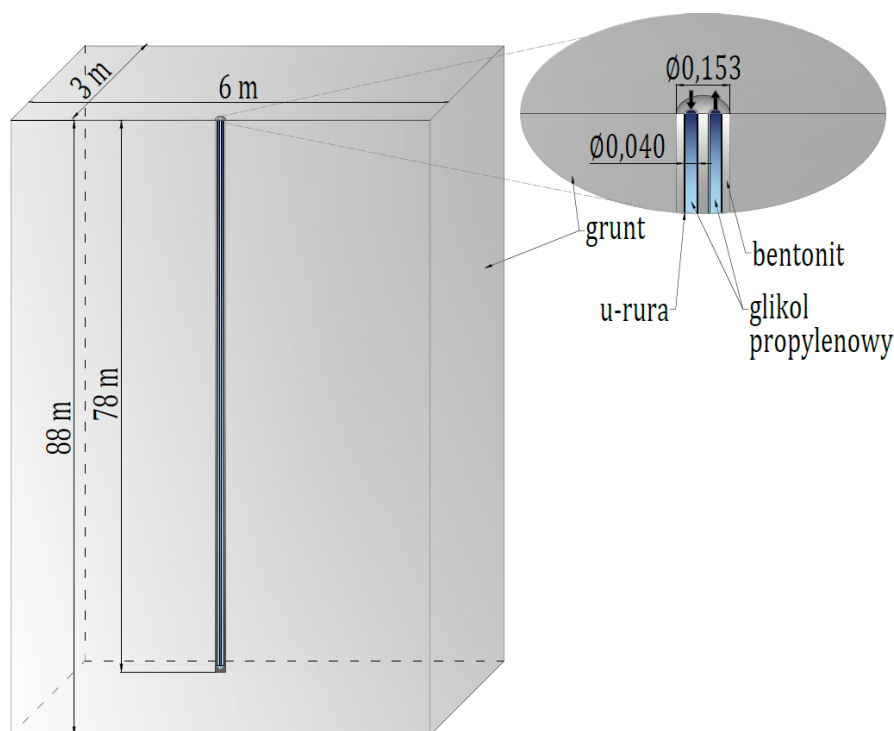
C_f – ciepło właściwe płynu [J/kgK],

$g_{x,y,z}$ – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],

λ_f – przewodność cieplna płynu, [W/mK].

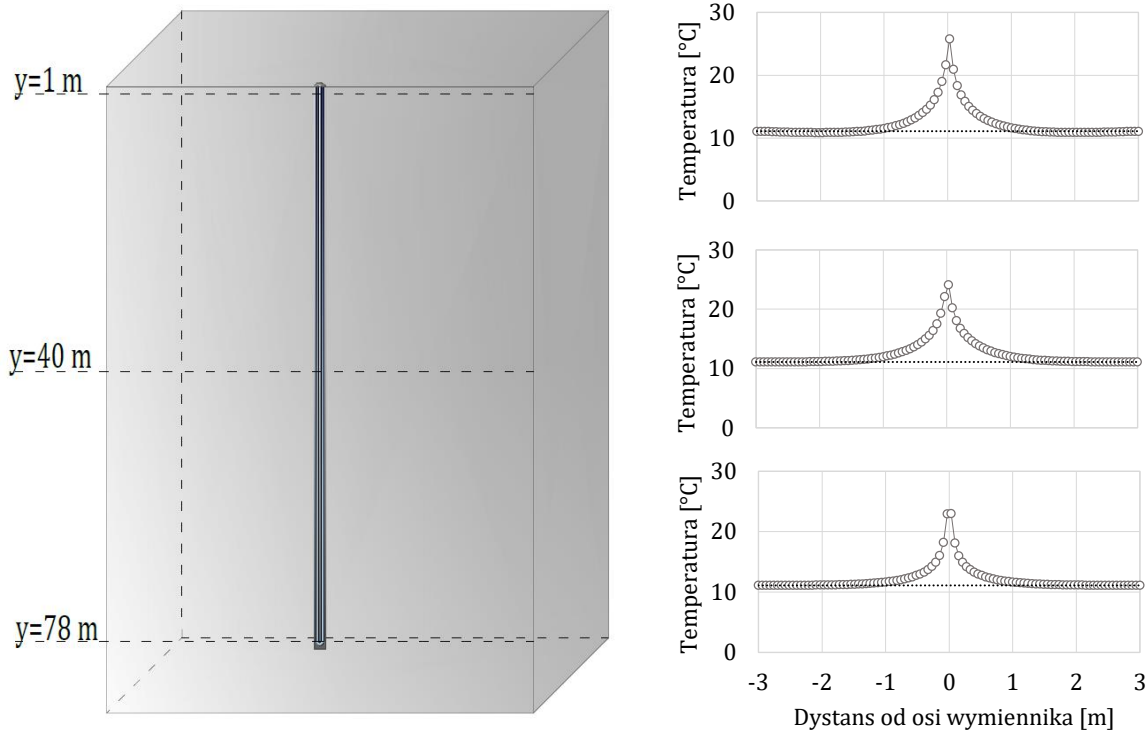
3.2.3. Założenia ogólne i wielkość modelu

Konstrukcję modelu numerycznego rozpoczęto od opracowania jego geometrii. W tym celu wykorzystano moduł Ansys Design Modeler. Opracowana geometria reprezentuje rzeczywistą wielkość i konstrukcję gruntowego wymiennika ciepła, na którym przeprowadzono opisane w rozdziale 2 badania terenowe (rysunek 24). Gruntowy wymiennik ciepła zaprojektowany został jako sonda u-kształtna o długości 78 m, zamontowana w odwiercie o średnicy 153 mm wypełnionym zaprawą bentonitową.



Rysunek 24 Geometria modelu numerycznego gruntowego wymiennika ciepła

Modelowanie rozkładu temperatury w gruntowych wymiennikach ciepła wymaga długiego czasu obliczeniowego. W celu jego racjonalizacji konieczny jest dobór odpowiedniej wielkości domeny obliczeniowej. Z jednej strony należy dążyć do zmniejszenia ilości elementów modelu, a tym samym skrócenia czasu obliczeń, z drugiej zaś, do zachowania odpowiedniej dokładności symulacji. Zbyt mały model skutkować może silnym wpływem temperatury krążącego w wymienniku płynu na ściany boczne modelu, i odwrotnie – warunki brzegowe na bocznych ścianach modelu mogą zniekształcać rzeczywisty rozkład temperatur w górotworze. Doboru wielkości modelu opracowanego w ramach niniejszej pracy dokonano na podstawie analizy rozkładu temperatury gruntu w modelach numerycznych opisanych w literaturze [139] oraz na podstawie własnych, wstępnych analiz. Analizy te wykazały, że dla czasu trwania testu wynoszącego 120 h, temperatura płynu krążącego w wymienniku nie oddziałuje na ściany modelu (dla odległości ściany modelu od osi wymiennika wynoszącej 3 m). Oddziaływanie to stwierdzono w promieniu do około 1 m od osi odwiertu (rysunek 25). Tak więc, przyjęto wielkość bryły reprezentującej grunt wynoszącą 6 x 6 x 88 m. Ze względu na symetryczną geometrię modelu zdecydowano się na wykorzystanie możliwości programu obliczeniowego i prowadzenie symulacji tylko dla połowy bryły.



Rysunek 25 Rozkład temperatury gruntu po 120 godzinach trwania TRT na głębokościach 1m, 40 m i 78 m

3.2.4. Dyskretyzacja

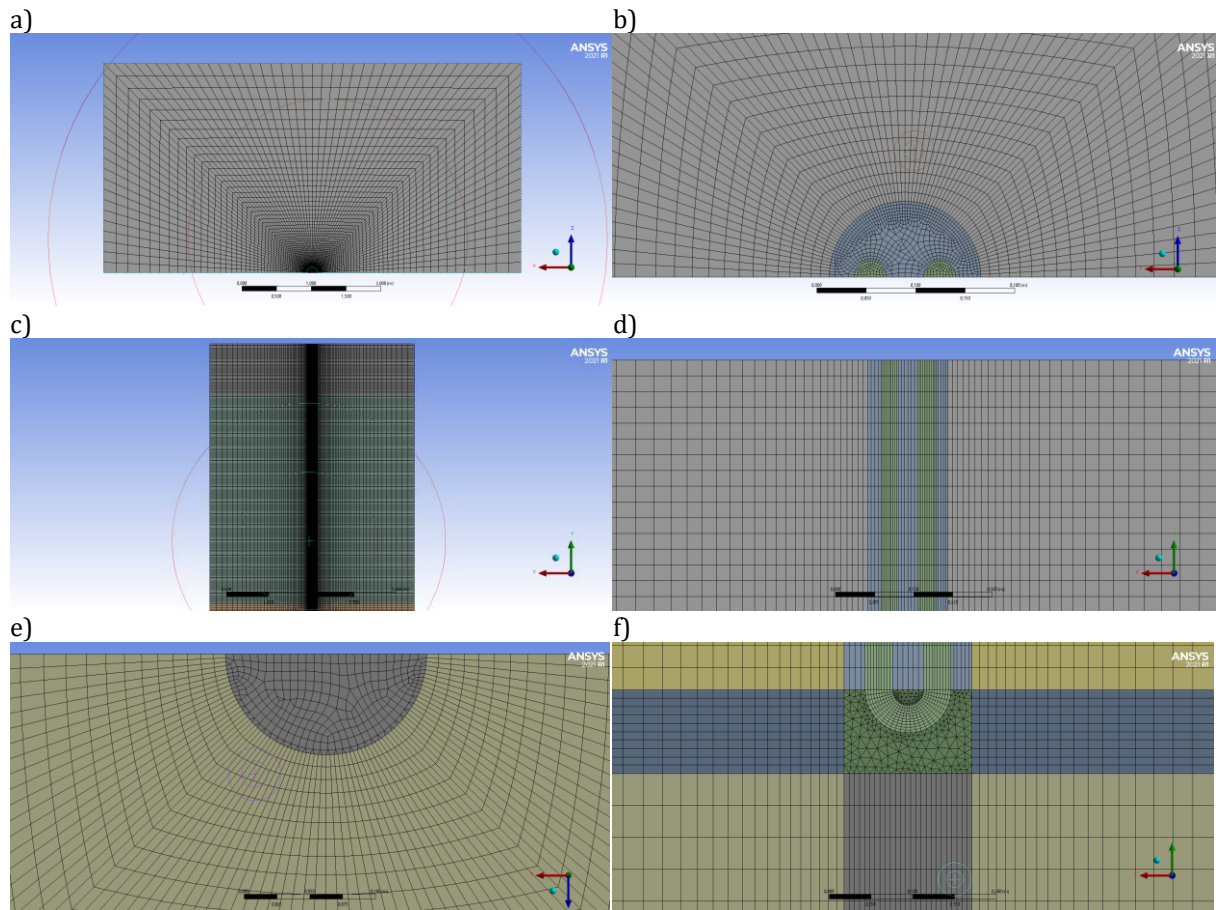
Wymienione we wstępie metody rozwiązywania równań różniczkowych w modelach numerycznych łączy konieczność dyskretyzacji modelu na elementy obliczeniowe [140]. Można wyróżnić dwa kierunki wykorzystywane w obliczeniach: tworzenie niestrukturalnych siatek, złożonych z elementów o dowolnym kształcie i ułożeniu komórek oraz siatek strukturalnych, o wyraźnie zdefiniowanym kształcie, wierszach, kolumnach i warstwach komórek. Ograniczeniem Metody Różnic Skończonych jest konieczność zastosowania siatki hexahedralnej. Metody Elementów i Objętości Skończonych pozwalają na większą swobodę i dopuszczają zastosowanie elementów trójkątnych, co nie jest jednak zalecane, gdyż ich obecność może zwiększyć błąd obliczeniowy.

Opracowanie dobrej jakościowo siatki obliczeniowej jest podstawowym zadaniem warunkującym docelową jakość przeprowadzanych obliczeń. Program Ansys Fluent umożliwia automatyczne opracowanie siatki obliczeniowej, jednak zwykle jest ona bardzo niskiej jakości. Możliwe jest również samodzielne dopracowywanie takiej siatki, co zrobiono w opisywanym tutaj modelu. Siatki obliczeniowe składają się z komórek przyjmujących różne kształty w zależności od wybranego rodzaju. Najbardziej popularne to:

- siatka tetrahedralna – czworościenna (ostrosłup o podstawie trójkąta),
- siatka hexahedralna – sześciościenna (grianiastosłup o podstawie czworoboku),
- siatka piramidowa – pięciościenna (ostrosłup o podstawie czworoboku),
- siatka pryzmatyczna – pryzmat (grianiastosłup o podstawie trójkąta).

W opracowanym modelu gruntowego wymiennika ciepła zastosowano siatkę obliczeniową składającą się w przeważającej większości z elementów hexahedralnych oraz, w obrębie bentonitu przy dnie odwiertu, z siatki tetrahedralnej. Finalna postać siatki numerycznej składa się z 9 924 212 węzłów oraz 9 734 163 komórek obliczeniowych. W trakcie jej przygotowania

wykorzystano zaawansowane metod budowy siatki dla odpowiedniego jej zagęszczenia w obrębie bentonitu oraz u-rury oraz stopniowego zwiększania wielkości elementów wraz ze zwiększaniem odległości od osi odwiertu. Charakterystyczne miejsca siatki numerycznej opracowanego w ramach niniejszej rozprawy modelu numerycznego GWC przedstawiono na rysunku 26.



Rysunek 26 Siatka numeryczna opracowanego modelu numerycznego gruntowego wymiennika ciepła: a) górna powierzchnia wymiennika, b) górna powierzchnia bentonitu z ramionami u-rury, c) symetria modelu d) symetria modelu – zbliżenie, e) dolna powierzchnia wymiennika, f) symetria dna odwiertu

Najważniejsze aspekty dotyczące konstruowania siatki numerycznej zestawiono poniżej.

- Ważnym etapem wstępnym prac związanych z dyskretyzacją było tworzenie samej geometrii modelu obliczeniowego – dodano krawędzie, podzielono płaszczyzny oraz domeny obliczeniowe w taki sposób, aby w późniejszym etapie można było wykorzystać możliwie prostą konstrukcję siatki obliczeniowej.
- Dla podzielonych w ten sposób domen obliczeniowych wykorzystano głównie funkcję wymiarowania krawędzi (ang. *Edge Sizing*), dzięki której możliwe było ustawienie wymaganej ilości rzędów komórek (ang. *Divisions*) oraz ich zagęszczenie w kierunku osi wymiennika.
- Domenę obliczeniową reprezentującą bentonit podzielono na dwie – wzdłuż całego wymiennika oraz w obrębie jego dna, gdzie rura zawija w kształt litery „u”. Takie założenie pozwoliło na zastosowanie siatki tetrahedralnej wyłącznie w tym niewielkim obszarze modelu.

- Wykorzystano funkcję „omiatania” (ang. *Sweep Method*), dzięki której siatka ma uporządkowaną budowę w obrębie gruntu (bez chaotycznych elementów rozchodzących się promieniowo), co zwykle powodowane jest przez prostokątny przekrój modelu.
- Do modelowania transportu ciepła przez ścianę u-rury wymiennika wykorzystano funkcję przewodzenia płaszczynowego *Shell Conduction*. Z uwagi na niewielką grubość ściany u-rury w stosunku do wielkości całego modelu utworzenie jej siatki w preprocesorze jest bowiem trudne lub niemożliwe z zachowaniem dobrej jakości. W takich przypadkach właśnie zalecane jest wykorzystanie wymienionej powyżej funkcji *Shell Conduction*. W wyniku jej zastosowania, solver obliczeniowy programu automatycznie stworzył warstwę komórek obliczeniowych dla ściany u-rury o strukturze zależnej od użytej siatki czółowej.
- Dodano nazwy charakterystycznych powierzchni modelu (ang. *Named Selections*), dzięki którym program Ansys Fluent automatycznie przypisał charakterystyczne dla nich typy warunków brzegowych.

W ocenie jakości siatki obliczeniowej posłużono się dwoma parametrami: skośność (ang. *Skewness*) oraz jakość ortogonalna (ang. *Orthogonal Quality*). Skośność jest jedną z podstawowych miar jakości siatki, określa ona jak bliska ideału (równomierna lub równokątna) jest komórka obliczeniowa. Zgodnie z definicją wartość skośności równa 0 oznacza komórkę równoboczną, a 1 komórkę całkowicie zdegenerowaną. Jakość ortogonalna odnosi się do tego, czy kąty pomiędzy sąsiednimi bokami elementu są optymalne (w zależności od topologii). Miara ortogonalności zawiera się w przedziale od 0 do 1, gdzie 1 oznacza element idealny. Tabela 16 przedstawia zakresy wartości parametrów i odpowiadają im jakość siatki obliczeniowej [141].

Tabela 16 Zakresy wartości parametrów siatki numerycznej i odpowiadająca im jakość siatki

Jakość siatki	Doskonała	Bardzo dobra	Dobra	Akceptowalna	Zła	Bardzo zła
Parametr						
<i>Skewness</i>	0-0,25	0,25-0,50	0,50-0,80	0,80-0,94	0,95-0,97	0,98-1,00
<i>Orthogonal Quality</i>	0,95-1,00	0,70-0,95	0,20-0,69	0,15-0,20	0,001-0,14	0-0,001

Opracowana dla modelu GWC siatka numeryczna obejmuje 11 domen obliczeniowych, dla których charakterystyczne wartości parametrów siatki obliczeniowej zestawiono w tabeli 17. Jak można zauważyć jakość siatki w prawie wszystkich domenach obliczeniowych jest doskonała bądź bardzo dobra, jedynie domena, jaką jest część bentonitu przy dnie odwiertu (Bentonit II), charakteryzuje się niewielką liczbą elementów tetrahedralnych o gorszej jakości. Elementy te nie spowodowały jednak błędów solwera obliczeniowego.

Tabela 17 Wartość parametrów opisujących jakości siatki numerycznej opracowanego modelu GWC

	Warstwa gruntu								Bentonit		Płyn
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	
<i>Skewness</i>											
Min.	1,70E-02	1,71E-02	1,69E-02	1,78E-02	1,70E-02	2,12E-02	2,10E-02	8,10E-03	5,68E-03	4,28E-03	1,64E-02
Max.	0,500	0,501	0,501	0,500	0,500	0,500	0,500	0,504	0,575	0,935	0,381
Średni	0,133	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,163	0,133	0,338	0,170
<i>Orthogonal Quality</i>											
Min.	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,716	0,716	0,601	0,548	0,065	0,872
Max.	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,981	0,999
Średni	0,905	0,905	0,904	0,904	0,904	0,905	0,905	0,952	0,974	0,658	0,979

3.2.5. Dane wejściowe, warunki brzegowe i początkowe

Program Ansys Fluent wymaga wprowadzenia podstawowych informacji o właściwościach fizycznych materiałów występujących w modelowanym ośrodku, w tym przypadku o właściwościach termofizycznych płynu, komponentów wymiennika oraz górotworu. Parametry tych domen obliczeniowych zestawiono w poniższej tabeli 18.

Tabela 18 Parametry domen obliczeniowych

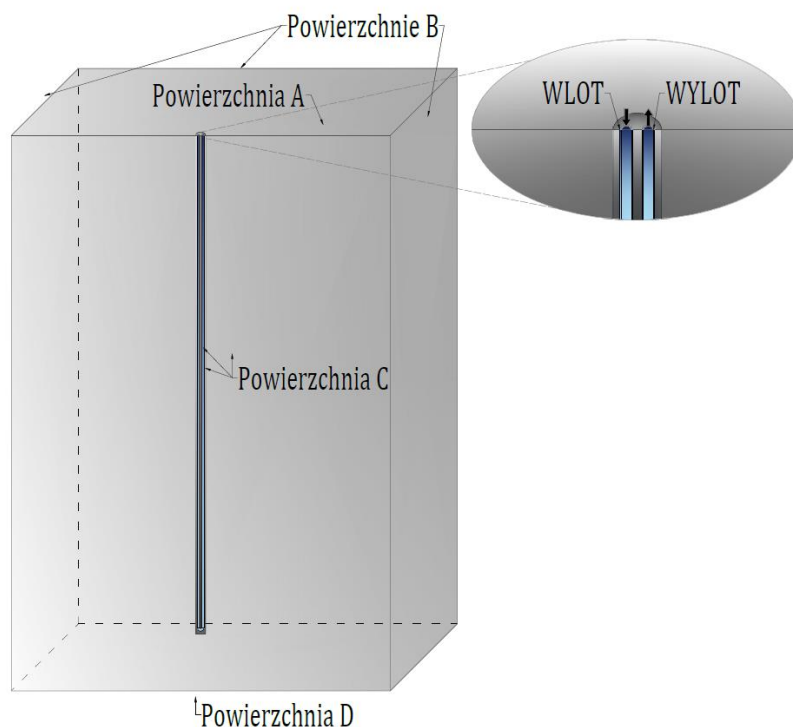
Parametr	Oznaczenie	Jednostka	Wartość przyjęta do obliczeń
Płyn			
Przewodność cieplna	λ_f	$W / (mK)$	0,42
Ciepło właściwe	C_f	$J / (kg \cdot K)$	3617
Gęstość	ρ_f	kg / m^3	1031
Lepkość dynamiczna	μ_f	$Pa \cdot s$	$3,971 \cdot 10^{-3}$
U-rura			
Przewodność cieplna	λ_r	$W / (mK)$	0,50*
Ciepło właściwe	C_r	$J / (kg \cdot K)$	1800
Gęstość	ρ_r	kg / m^3	980
Wypełnienie odwiertu			
Przewodność cieplna	λ_b	$W / (mK)$	2,0*
Ciepło właściwe	C_b	$J / (kg \cdot K)$	2000
Gęstość	ρ_b	kg / m^3	1130
Grunt			
Przewodność cieplna	λ_g	$W / (mK)$	2,33*
Ciepło właściwe	C_g	$J / (kg \cdot K)$	2370
Gęstość	ρ_g	kg / m^3	1899

* Parametry zmienne w poszczególnych symulacjach

Komentarza wymagają przyjęte właściwości ośrodka gruntowego. Geometrię modelu GWC można bowiem opracować dla różnych założeń. Pierwszą możliwością jest uśrednienie parametrów gruntu na całej głębokości modelu (pominięcie obecności warstw o różnych właściwościach termofizycznych), drugą jest podzielenie gruntu na warstwy odpowiadające tym właściwościom, a trzecią opcją jest podział gruntu na warstwy o zmiennym profilu temperatury. Naukowcy wykazali, iż pomijanie warstw gruntu ma niewielki wpływ na wyniki modelowania, a modele jednowarstwowych GWC mogą zaoszczędzić znaczną ilość czasu obliczeniowego, szczególnie podczas symulacji dużego pola wiertniczego [142]. Podział na warstwy o różnym profilu temperatury ma zaś znaczenie dla odwiertów o dużych głębokościach, gdzie obserwuje się duży wpływ geotermalnego strumienia ciepła. Dla poszczególnych odcinków profilu temperatury wykreśla się wówczas wykresy oraz wyznacza równania linii trendu, na podstawie których określone są warunki brzegowe na ścianie modelu [139]. W opracowywanym modelu pominięto obecność warstw o różnych właściwościach termofizycznych czy różnym profilu temperatury.

Rozwiązanie równań różniczkowych wymiany ciepła w gruncie poprzez modelowanie numeryczne wymaga przyjęcia warunków początkowych i brzegowych. Przyjęcie prawidłowych warunków brzegowych ma bezpośredni wpływ na jakość i poprawność modelu numerycznego. Dla charakterystycznych powierzchni modelu przyjmuje się warunek brzegowy Dirichleta, znany także jako warunek pierwszego rodzaju w teorii równań różniczkowych. Zakłada on, że funkcja

będąca rozwiązaniem problemu przyjmuje określone z góry wartości na brzegu dziedziny. Warunki te przyjmuje się na powierzchni modelu odpowiadającej powierzchni gruntu mającej kontakt z powietrzem zewnętrznym oraz ścianach bocznych, ograniczających objętość modelu, a definiuje się je na podstawie założeń lub danych pomiarowych. Na rysunku 27 przedstawiono lokalizację powierzchni domen obliczeniowych, dla których zdefiniowano warunki brzegowe modelu. Poniżej zaś opisano w jaki sposób zdefiniowano wartości tych warunków brzegowych.



Rysunek 27 Schemat powierzchni modelu numerycznego, na których zdefiniowano warunki brzegowe modelu

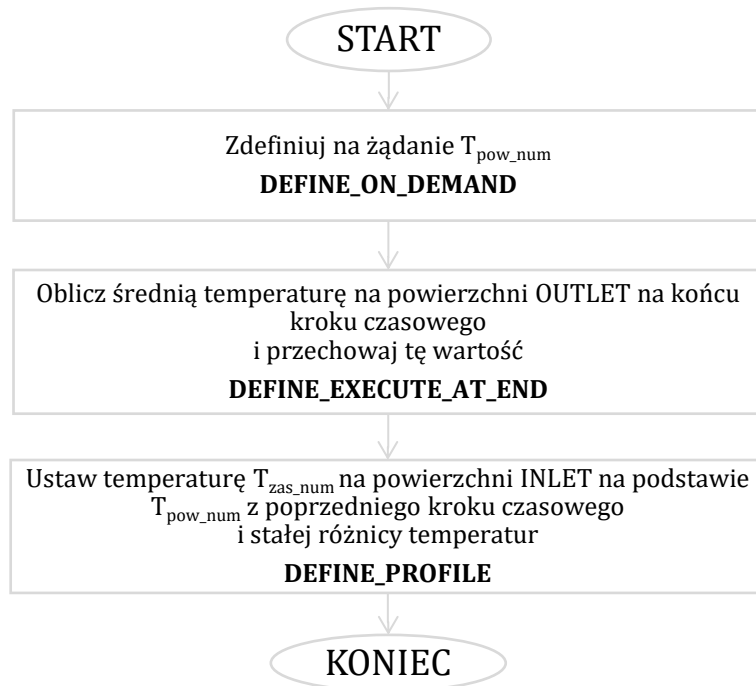
- Wlot (*Inlet*) i wylot (*Outlet*) – warunek brzegowy wlotu płynu do wymiennika wymaga podania prędkości wlotowej oraz temperatury płynu, które jeżeli nie są traktowane jako stałe należy zaimplementować do programu w postaci bazy danych (UDF) lub równania. Dla wylotu płynu z wymiennika zwykle przyjmuje się stałą wartość ciśnienia statycznego i zerowe gradienty wszystkich zmiennych zależnych w kierunku prostopadłym do granicy, zgodnie z wytycznymi dotyczącymi adaptacji warunków brzegowych dla użytkowników kodów Fluent. Dla powierzchni wlotowej przyjęto stałą prędkość (przyjętą na podstawie wyników pomiarów) oraz temperaturę zgodną z zaimplementowanym kodem UDF (co opisano szczegółowo poniżej). Dla powierzchni wylotowej ustawiono funkcję „*pressure outlet*”.
- Powierzchnia A – powierzchnia gruntu – warunkiem brzegowym jest średnia temperatura powietrza zewnętrznego. Ze względu na wielkość modelu, wpływ warunków atmosferycznych jest zwykle pomijalny. Na tej powierzchni ustawiono temperaturę równą średniej temperaturze powietrza zewnętrznego w trakcie badań wynoszącą 10,46°C.
- Powierzchnie B – ściany boczne – grunt, temperatura zależna od głębokości, wyznaczana jako średnia temperatura gruntu niezakłóconego lub implementowana jako równanie $T(y)$, w zależności od wyznaczonej zmienności w trakcie przeprowadzania I etapu testu. W analizowanym modelu przyjęto stałą na całej głębokości temperaturę gruntu

niezakłóconego wyznaczoną na podstawie pierwszej części testu polegającej na powolnym pompowaniu czynnika przez wymiennik bez dostarczania energii grzewczej. Średnia temperatura płynu dla gruntu niezakłóconego wynosiła 10,8°C (TEST 1) oraz 10,9°C (TEST 2).

- Powierzchnia C – symetria – wprowadzona dla ograniczenia wielkości modelu, który ze względu na swoją geometrię może być rozpatrywany w ten sposób. Powierzchnie te charakteryzują się zerowym momentem, masą i energią przenoszoną w kierunku ortogonalnym.
- Powierzchnia D – powierzchnia gruntu, dla której przyjmuje się stały strumień ciepła geotermalnego, założono 0,06 W/m².

Dodatkowego komentarza wymaga warunek brzegowy na powierzchni wlot (*Inlet*), czyli temperatura płynu na powierzchni wlotowej do wymiennika. Ponieważ standardowa procedura przeprowadzania testu TRT oparta jest na utrzymaniu stałej mocy grzewczej, temperatura na wlocie do wymiennika wzrasta w czasie. Warunek brzegowy związany ze zmienną temperaturą czynnika wpływającego do wymiennika wprowadzany jest za pomocą funkcji użytkownika tzw. UDF (*User Defined Functions*). Funkcje zdefiniowane przez użytkownika, to funkcje które użytkownik programuje, i które mogą być dynamicznie ładowane do solvera Ansys Fluent w celu rozszerzenia standardowych funkcji programu [147]. Funkcje te mogą służyć do zdefiniowania własnych warunków brzegowych, ale również właściwości fizycznych materiałów lub warunków inicjalizacji modelu. Prosty rozwiązaniem problemu zmiennej temperatury na wlocie do wymiennika jest przygotowanie bazy danych wejściowych w oparciu o przeprowadzone w trakcie badań pomiary tej temperatury [139] [148]. Taka baza danych może być sporządzona w edytorze tekstu i zaimplementowana do programu poprzez wywołanie odpowiednich funkcji w interfejsie użytkownika. Innym, zdecydowanie lepszym podejściem jest założenie stałej różnicy temperatur pomiędzy zasilaniem i powrotem, wynikającej ze stałej mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu [142][143][144][145][146]. Podejście to jest jednak dużo bardziej wymagającym procesem, ponieważ wymaga napisania kodu w języku programowania adekwatnym dla przyjętego solvera (w przypadku Ansys Fluent jest to C++). Kod zawierać powinien funkcję zapisywania temperatury powrotu w danym kroku obliczeniowym, dodawania do niej stałej różnicy temperatur i przypisywania tej wartości do temperatury zasilania w kolejnym kroku czasowym.

W niniejszej pracy funkcję UDF wykorzystano właśnie w ten sposób, czyli do zdefiniowania zmiennej temperatury na wlocie do wymiennika. W tym celu zdefiniowano funkcję, za pomocą której program obliczał średnią temperaturę płynu na powierzchni wylotowej (T_{num_pow}), przechowywał ją w pamięci oraz definiował na jej podstawie temperaturę na powierzchni wlotowej (T_{num_zas}) poprzez dodanie stałej różnicy temperatur wynikającej z przyjętej, stałej mocy dostarczanej do odwiertu ($Q_{num} = const$) w kolejnym kroku obliczeniowym. Konstrukcję pliku UDF przedstawiono na rysunku 28.

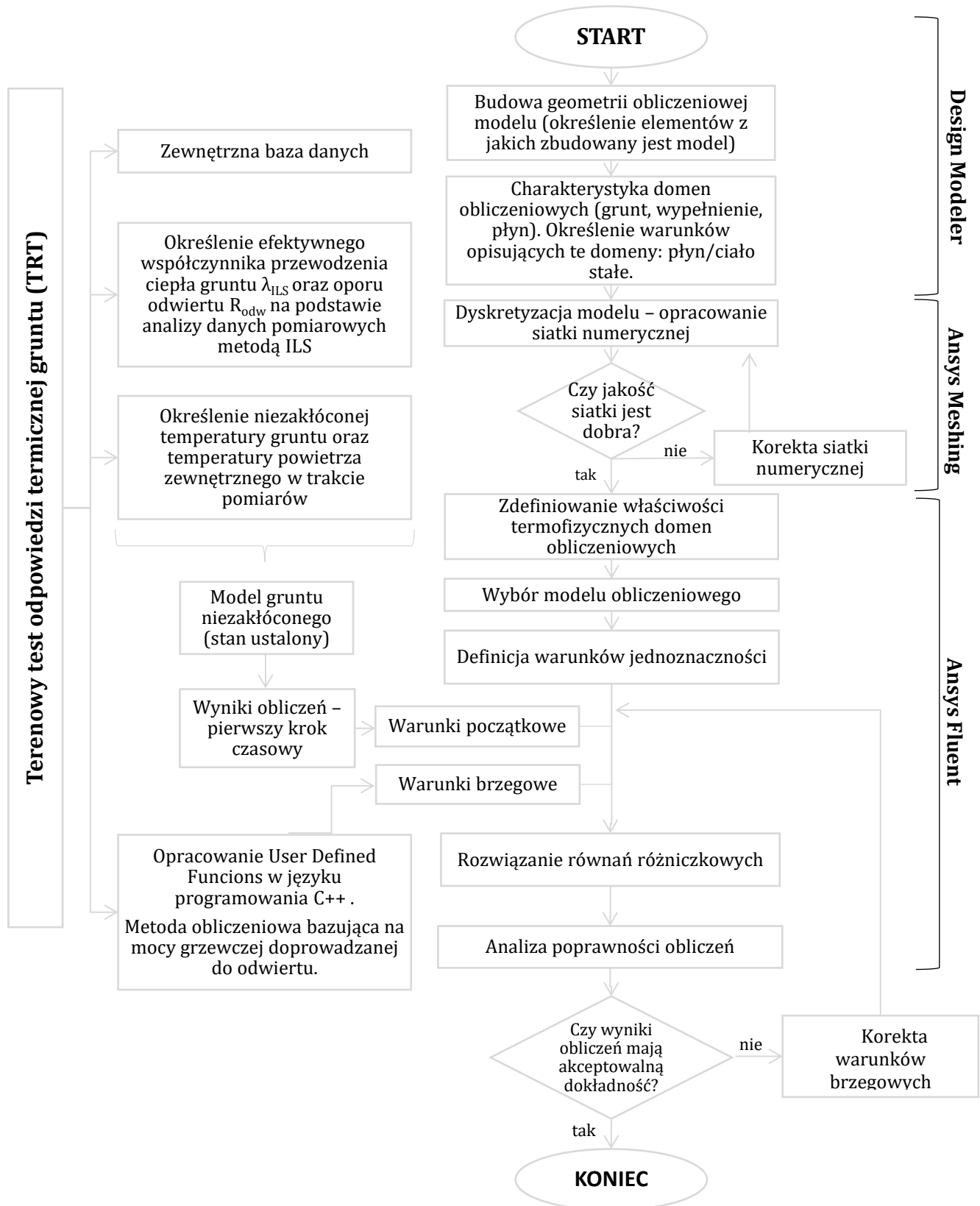


Rysunek 28 Proces tworzenia zdefiniowanej funkcji użytkownika

Ważnym etapem obliczeń numerycznych prowadzonych w oprogramowaniu Ansys Fluent jest inicjalizacja przepływu w domenie obliczeniowej. Ponieważ początkowy stan układu ma wpływ na rozkład temperatury w gruncie zdecydowano się na wprowadzenie obliczeń stanu ustalonego (pierwszego kroku czasowego), poprzedzających obliczenia dynamiczne. Celem takiego procesu inicjalizacji było rozpoczęcie obliczeń dla rozkładu temperatury w całej domenie obliczeniowej równej niezakłóconej temperaturze gruntu. Hybrydowa inicjalizacja procesu obliczeniowego na całej głębokości wymiennika pozwala na wyznaczenie podobnych wartości temperatury, natomiast nie uwzględnia wpływu temperatury powierzchni gruntu i spadku temperatury wraz z głębokością. Wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu w obu wariantach mogą być zbliżone, natomiast zastosowane podejście, polegające na obliczeniach stanu ustalonego poprzedzających inicjalizację hybrydową, pozwalają na zachowanie dużo większej dokładności. Ponadto, jest to szczególnie zalecane w przypadku badań związanych z rozkładem temperatury w gruncie, wzajemnym oddziaływaniem wymienników itp.

3.2.6. Procedura solvera obliczeniowego

Procedurę obliczeń opracowanego w ramach pracy doktorskiej modelu numerycznego TRT przedstawiono na rysunku 29.



Rysunek 29 Schemat blokowy zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej symulacji numerycznych TRT

3.3. Walidacja i kalibracja modelu numerycznego

3.3.1. Wprowadzenie

Opisany w powyższych punktach tego rozdziału model numeryczny został wykorzystany do symulacji testu odpowiedzi termicznej gruntu (TRT). Dzięki zastosowaniu metody wyznaczania temperatury płynu na wlocie do wymiennika na podstawie dostarczanej do układu mocy grzewczej, opracowany model numeryczny jest uniwersalny w zastosowaniu i analizie dowolnych testów odpowiedzi termicznej. Obliczenia wykonano za pomocą narzędzia RANS (ang. *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*). Numeryczne testy odpowiedzi termicznej na potrzeby oceny jakości modelu przeprowadzono zakładając parametry fizyko-termiczne materiałów oraz warunki brzegowe na podstawie przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej pomiarów terenowych (wszystkie dane wejściowe i parametry brzegowe zostały szczegółowo opisane we wcześniejszej części pracy). W programie Ansys Fluent zdefiniowano raport zawierający wyniki symulacji, którymi były wartości temperatur zasilania (T_{zas_num}) i powrotu (T_{pow_num}) czynnika roboczego w GWC. Na ich podstawie obliczono średnią temperaturę płynu w trakcie numerycznego testu odpowiedzi termicznej gruntu (T_{sr_num}), co umożliwiło przeprowadzenie dalszych analiz z wykorzystaniem modelu ILS (ang. *Infinite Line Source*).

Ocenę jakości opracowanego w ramach rozprawy doktorskiej modelu numerycznego TRT przeprowadzono etapami. W pierwszym etapie, jako poziom odniesienia dla wyników symulacji numerycznych wykorzystano model ILS, tj. porównano wartości średniej temperatury płynu w GWC będące wynikiem analizy danych z obliczeń numerycznych z wartościami uzyskanymi na podstawie modelu ILS. Dokonano oceny błędów wyników modelowania numerycznego względem wyników pozyskanych z modelu ILS. Następnie, poddano analizie wpływ zastosowanego w obliczeniach numerycznych modelu burzliwości, kroku czasowego i ilości iteracji w danym kroku czasowym na wyniki symulacji. Celem tych analiz było dobranie odpowiednich założeń dla modelowania numerycznego oraz ocena możliwości skrócenia czasu symulacji numerycznych. W drugim etapie oceny jakości opracowanego modelu numerycznego TRT przeprowadzono jego walidację względem wyników pomiarów. Dokonano porównania wyników symulacji z wynikami pozyskanymi w trakcie badań terenowych (TEST 1 i 2, wariant 1) opisanych w rozdziale 2. Wyznaczono błędy wyników modelowania numerycznego względem wyników pomiarów. Następnie, poddano analizie wpływ założeń dotyczących parametrów gruntu, wypełnienia odwiertu i u-rury na wyniki symulacji, w szczególności na poziom zgodności wyników symulacji z pomiarami.

W ocenie jakości modelu numerycznego wykorzystano następujące kryteria: błąd względny, średni błąd względny, błąd bezwzględny oraz średni i maksymalny błąd bezwzględny wyników symulacji względem wyników pomiarów. Wartości błędów obliczane były na podstawie opisanych poniżej zależności (28 – 32), przedstawionych na przykładzie temperatur.

Błąd względny (ang. *Absolute percentage error* - APE):

$$APE = \left| \frac{T_{num} - T_{pom}}{T_{pom}} \right| \quad (28)$$

Średni błąd względny (ang. *Mean absolute percentage error* – MAPE):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{num} - T_{pom}}{T_{pom}} \right| \quad (29)$$

Błąd bezwzględny (ang. *Absolute error* – AE):

$$AE = |T_{num} - T_{pom}| \quad (30)$$

Średni błąd bezwzględny (ang. *Mean absolute error* – MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{num} - T_{pom}|}{n} \quad (31)$$

Maksymalny błąd bezwzględny (ang. *Maximum absolute error* – ME):

$$ME = \max(|T_{num} - T_{pom}|) \quad (32)$$

3.3.2. Walidacja i kalibracja modelu numerycznego TRT względem modelu ILS

3.3.2.1. Porównanie wyników modeli

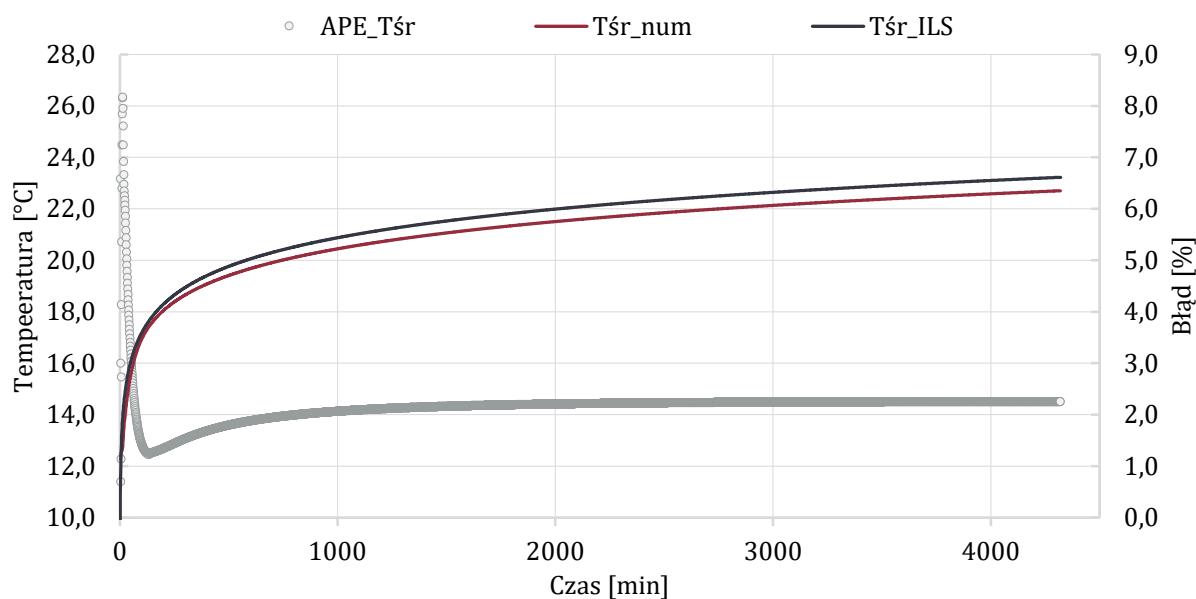
Przeprowadzono symulację numeryczną TRT w oparciu o dane wejściowe zaczerpnięte z testu terenowego opisanego w Rozdziale 2 (TEST 1 – wariant 1). Prędkość czynnika pośredniczącego oraz moc cieplna dostarczana do odwiertu zostały przyjęte na podstawie średniej wartości tych parametrów w trakcie tego testu terenowego. Wprowadzone do modelu założenia dokładnie odwzorowały stan wymiennika w trakcie pomiarów terenowych. Najważniejsze dane wejściowe do symulacji numerycznej zestawiono w tabeli 19. Wstępne obliczenia przeprowadzono dla kroku czasowego wynoszącego 1 minutę ($\Delta t = 60$ s). Obliczenia wykonano dla 4 320 kroków obliczeniowych, odpowiadających 72 h trwania testu. W obliczenia wykorzystano model turbulencji SST k- ω .

Tabela 19 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej odpowiadające warunkom TESTU 1 (wariant 1)

Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna u-rury	λ_r	W/(mK)	0,50
Przewodność cieplna bentonitu	λ_b	W/(mK)	2,0
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	W/(mK)	2,33
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	3,77
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,33

Na tym etapie oceny jakości modelu numerycznego jako poziom odniesienia zastosowany został model ILS. Wykorzystując wyniki pomiarów (TEST 1 – wariant 1) przybliżono średnią temperaturę krążącego w wymienniku płynu zgodnie z zależnością (20), opisaną w punkcie 2.5.4. w 2 rozdziale pracy. Na rysunku 30 przedstawiono wartości średniej temperatury płynu krążącego w GWC obliczone na podstawie modelu ILS (T_{sr_ILS}) oraz wartości tej temperatury uzyskane na podstawie wyników symulacji numerycznej (T_{sr_num}). Dodatkowo, na rysunku 30 naniesiono chwilowe wartości błędu modelu numerycznego względem modelu ILS (APE). Błąd

ten jest dość wysoki jedynie w początkowych minutach testu. Już po około 50 minutach osiąga wartość 2% i utrzymuje się maksymalnie na tym poziomie do końca trwania procedury TRT.



Rysunek 30 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie modelu ILS (T_{sr_ILS}) oraz modelu numerycznego (T_{sr_num})

Podsumowanie tego porównania przedstawiono w tabeli 20. Zestawiono w niej średnie błędy wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie wyników modelowania numerycznego względem wyznaczonych za pomocą modelu ILS. Błędy te są niskie, średni błąd względny wynosi 2,16%, średni błąd bezwzględny wynosi 0,47°C, a maksymalny błąd bezwzględny wynosi 2,49°C. Pomimo tej dobrej oceny jakości modelu numerycznego, podjęto działania, opisane w dalszych punktach pracy, polegające na korekcie wybranych założeń w celu uzyskania lepszej zbieżności wyników obu modeli oraz skrócenia czasu trwania symulacji.

Tabela 20 Zestawienie średnich błędów wartości średniej temperatury płynu w GWC wyznaczonej za pomocą modelu numerycznego względem wyznaczonej za pomocą modelu ILS

Typ błędu	Średni błąd względny (Mean absolute percentage error)	Średni błąd bezwzględny (Mean absolute error)	Maksymalny błąd bezwzględny (Maximum absolute error)
Oznaczenie	MAPE	MAE	ME
Parametr	T_{sr}	T_{sr}	T_{sr}
Jednostka	[%]	[°C]	[°C]
Wartość błędu	2,16	0,47	2,49

3.3.2.2. Modele turbulencji

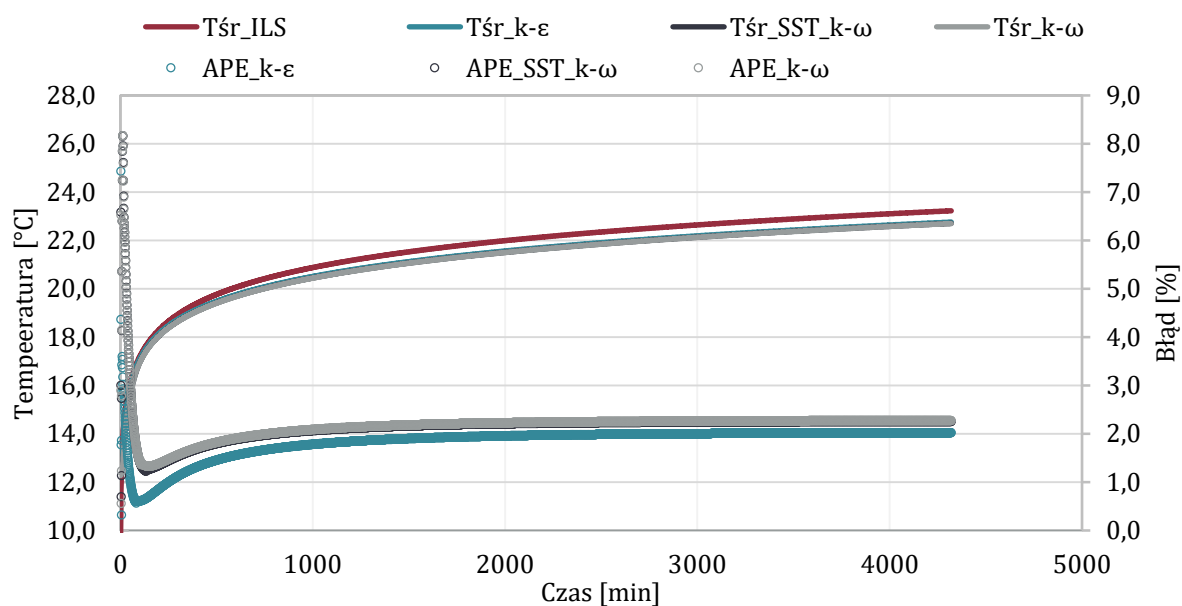
Oprogramowanie Ansys Fluent oferuje szereg możliwości rozwiązywania problemów związanych z przepływem – najpopularniejsze modele turbulencji to k-ε, k-ω, SST.

Model k-ε to model dwóch zmiennych: energii kinetycznej turbulencji (k) oraz ε szybkości rozpraszania energii kinetycznej turbulencji (ε). W modelu tym stosowane są funkcje ścienna, więc przepływ w obszarze buforowym nie jest symulowany. Model jest bardzo popularny głównie z uwagi na dobrą zbieżność i niskie wymagania sprzętowe. Najlepiej sprawdza się dla problemów z przepływem zewnętrznym, wokół rozbudowanych geometrii.

Model k- ω jest modelem o niskiej liczbie Reynoldsa. Nazwa ta nie odnosi się do przepływu w skali globalnej, ale do regionu blisko ściany, gdzie dominują efekty lepkościowe. Modele o niskiej liczbie Reynoldsa to modele, które dobrze odwzorowują zachowania graniczne dla różnych wielkości przepływu. Wymagają jednak stosowania wysokiej rozdzielczości siatki obliczeniowej. Model jest przydatny w wielu przypadkach, w których model k- ϵ jest mniej dokładny, takich jak przepływy wewnętrzne, przepływy wykazujące silną krzywiznę, rozdzielone itd. Dobrym przykładem przepływu wewnętrznego jest kolano rury, a w przypadku gruntowych wymienników ciepła, koniec u-rury.

Model SST jest kombinacją modelu k- ϵ w swobodnym strumieniu oraz k- ω w pobliżu ścian wymiennika. Skrót SST oznacza transport naprężeń ścinających (ang. *Shear Stress Transport*). Jest to model o niskiej liczbie Reynoldsa. Ma on podobne wymagania dotyczące rozdzielczości siatki obliczeniowej jak modele k- ω i k- ϵ , jednak jego konstrukcja eliminuje pewne wady obu z nich.

Rozwiązanie numeryczne problemów z przepływem zarówno laminarnym, jak i turbulentnym jest procesem wymagającym obliczeniowo. Ze względu na znaczącą wielkość modeli gruntowych wymienników ciepła, proces obliczeń numerycznych może trwać nawet kilka dni, dlatego dąży się do korzystania z jak najprostszej siatki, przy zachowaniu dobrej dokładności obliczeń. Celem poniższych analiz było zbadanie wpływu zastosowanego modelu turbulencji na wyniki obliczeń. Przeprowadzono obliczenia numeryczne z wykorzystaniem trzech modeli turbulencji: k- ϵ , k- ω i SST k- ω . Uzyskane dane wskazują na niewielki wpływ zastosowanego modelu turbulencji na wyniki obliczeń (rysunek 31).



Rysunek 31 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie modelu ILS (T_{sr_ILS}) oraz modelu numerycznego z założeniem różnych modeli turbulencji

W tabeli 21 zestawiono średnie błędy wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie wyników symulacji numerycznych (dla różnych modeli turbulencji) względem wyznaczonych za pomocą modelu ILS. Najniższą wartością średniego błędu względnego charakteryzują się wyniki modelowania przeprowadzonego z założeniem modelu turbulencji k- ϵ . Biorąc jednak pod uwagę, że wyniki symulacji dla wszystkich modeli turbulencji wykazały podobną dokładność postanowiono pozostać przy relatywnie uniwersalnym – modelu SST k- ω . Wynika to z faktu, że część symulacji omówionych w kolejnych punktach pracy

przewodzona była dla znacznie mniejszej wartości przepływu ($\dot{V} = 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$), a model ten ma zastosowanie w szerszym zakresie wartości liczby Reynoldsa.

Tabela 21 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego (dla różnych modeli turbulencji) względem wyznaczonych za pomocą modelu ILS

Typ błędu	Średni błąd względny (Mean absolute percentage error)	Średni błąd bezwzględny (Mean absolute error)	Maksymalny błąd bezwzględny (Maximum absolute error)
Oznaczenie	MAPE	MAE	ME
Parametr	T_{sr_num}	T_{sr_num}	T_{sr_num}
Jednostka	[%]	[°C]	[°C]
Wartość błędu model k- ϵ	1,84	0,40	2,59
Wartość błędu model k- ω	2,16	0,47	2,49
Wartość błędu model SST k- ω	2,18	0,47	2,49

3.3.2.3. Krok czasowy

Kolejnym etapem prac było sprawdzenie, czy możliwe jest przeprowadzenie dokładnych obliczeń numerycznych w kroku godzinowym. Zmiana kroku czasowego z 1 minuty na 1 godzinę pozwoliłaby na wykonywanie obliczeń w znacznie krótszym czasie. W tabeli 22 i 23 zestawiono podstawowe dane wejściowe i warianty przeprowadzonych w tej części pracy analiz.

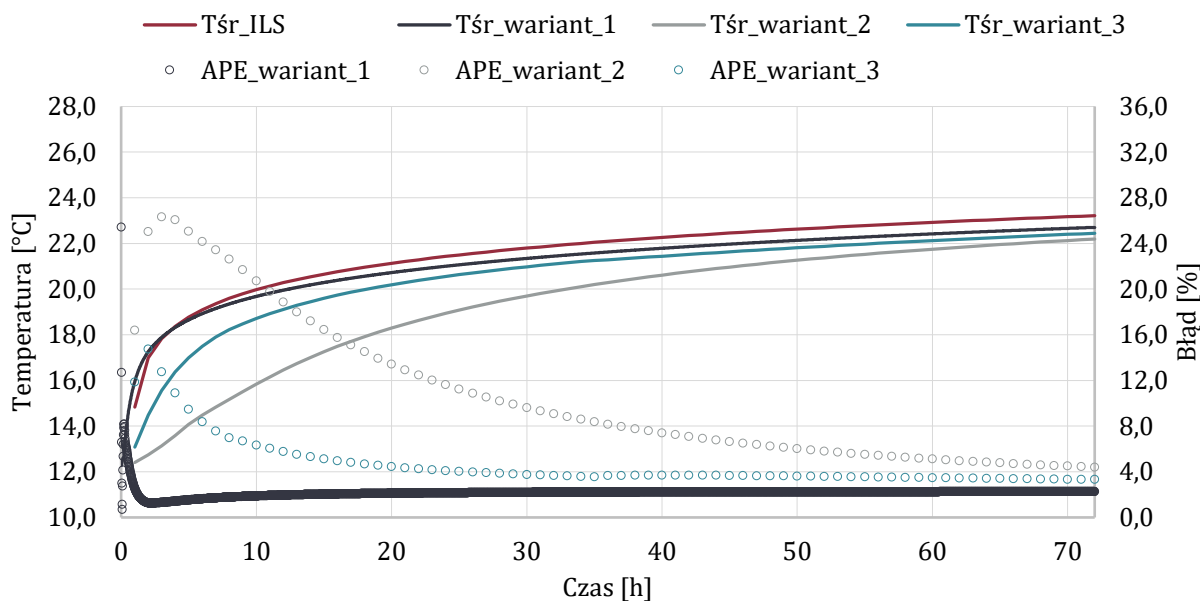
Tabela 22 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznych z założeniem różnych kroków czasowych odpowiadające warunkom TESTU 1 (wariant 1)

Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna u-rury	λ_r	W/(mK)	0,50
Przewodność cieplna bentonitu	λ_b	W/(mK)	2,0
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	W/(mK)	2,33
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	3,77
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,33

Tabela 23 Zestawienie wariantów analizy: krok czasowy i ilości iteracji

Opis	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Krok czasowy	1 min	1 h	1 h
Liczba iteracji	20	20	400

Wyniki analiz przedstawiono na poniższym rysunku 32. Wynika z nich, że niezależnie od ilości iteracji w kroku godzinowym nie ma możliwości osiągnięcia zbieżności wyników obu modeli w pierwszych godzinach testu. W przypadku 20 iteracji, zbieżność osiągnięta jest dopiero w około 60 godzinie, natomiast dla 400 iteracji zbieżność osiąga się w około 30 godzinie trwania testu. Podsumowując, niniejsza analiza wykazała, że zwiększenie ilości iteracji w kroku godzinowym zwiększa dokładność uzyskiwanych wyników, jednak nie pozwala na uzyskanie dobrej odpowiedzi temperaturowej w pierwszych, najbardziej dynamicznych godzinach testu. Dalsze zwiększanie ilości iteracji nie wpływało znacząco na poprawę wyników oraz wiązało się ze znacznym zwiększeniem czasu obliczeń.



Rysunek 32 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie modelu ILS (T_{sr_ILS}) oraz modelu numerycznego z założeniem różnych kroków czasowych i ilości iteracji

W tabeli 24 zestawiono średnie błędy wyników modelowania numerycznego (z założeniem różnych kroków czasowych oraz ilości iteracji) względem modelu ILS. Najniższą wartością błędów charakteryzują się wyniki modelowania przeprowadzone dla wariantu 1: krok czasowy 1 minuta, liczba iteracji 20.

Tabela 24 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego (dla różnych kroków czasowych i liczby iteracji) względem wyznaczonych za pomocą modelu ILS

Typ błędu	Średni błąd względny (Mean absolute percentage error)	Średni błąd bezwzględny (Mean absolute error)	Maksymalny błąd bezwzględny (Maximum absolute error)
Oznaczenie	MAPE	MAE	ME
Parametr	T_{sr}	T_{sr}	T_{sr}
Jednostka	[%]	[°C]	[°C]
Wartość błędu Wariant 1	2,16	0,47	2,49
Wartość błędu Wariant 2	10,64	2,21	4,79
Wartość błędu Wariant 3	4,67	0,98	2,50

3.3.3. Walidacja i kalibracja modelu numerycznego TRT względem testów terenowych

3.3.3.1. Walidacja modelu numerycznego TRT względem TESTU 1

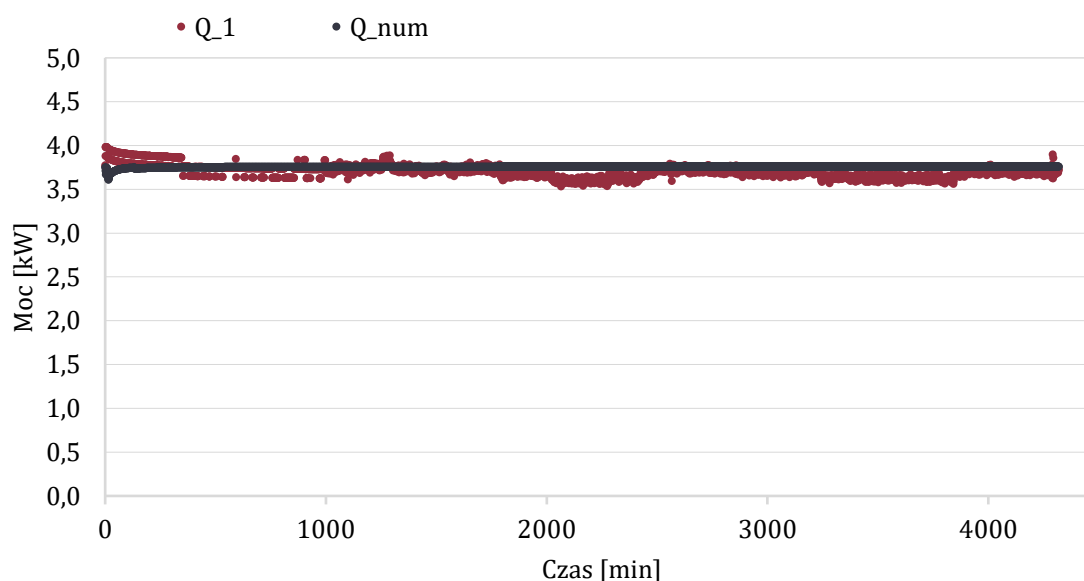
Na tym etapie oceny jakości modelu numerycznego wykorzystano dane pomiarowe z terenowego testu odpowiedzi termicznej (TEST 1, wariant 1) opisanego w rozdziale 2. Przeprowadzono symulację numeryczną TRT w oparciu o dane wejściowe zaczerpnięte z tych pomiarów. Prędkość czynnika pośredniczącego oraz moc cieplna dostarczana do odwiertu przyjęte zostały na podstawie średniej wartości tych parametrów w trakcie testu terenowego.

Wprowadzone do modelu założenia dokładnie odzwierciedlały stan wymiennika w trakcie testów terenowych. W tabeli 25 zestawiono najważniejsze dane wejściowe do symulacji numerycznej. Obliczenia przeprowadzono dla kroku czasowego wynoszącego 1 minutę ($\Delta t = 60 \text{ s}$). W każdym kroku czasowym założono 20 iteracji. Obliczenia wykonano dla 4 320 kroków obliczeniowych, odpowiadających 72 h trwania testu. Taka liczba kroków obliczeniowych została przyjęta ze względu na konieczność racjonalizacji czasu obliczeń numerycznych. Obliczenia wykonano z zastosowaniem modelu turbulencji SST k- ω .

Tabela 25 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej odpowiadające warunkom TESTU 1 (wariant 1)

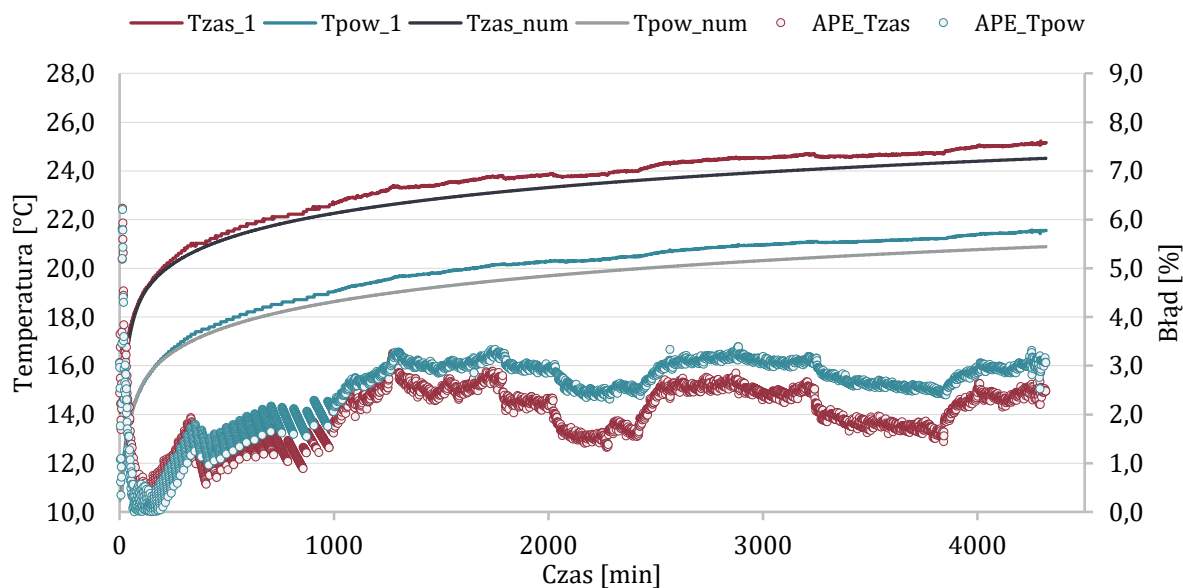
Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna u-rury	λ_r	W/(mK)	0,50
Przewodność cieplna bentonitu	λ_b	W/(mK)	2,0
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	W/(mK)	2,33
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	3,77
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,33

Na rysunku 33 przedstawiono wartości mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu. W modelu numerycznym moc ta była stała i wynosiła 3,77 kW. Obserwowane wahania mocy grzewczej w trakcie testu terenowego były wynikiem wpływu warunków atmosferycznych i/lub zmian napięcia w sieci elektroenergetycznej.



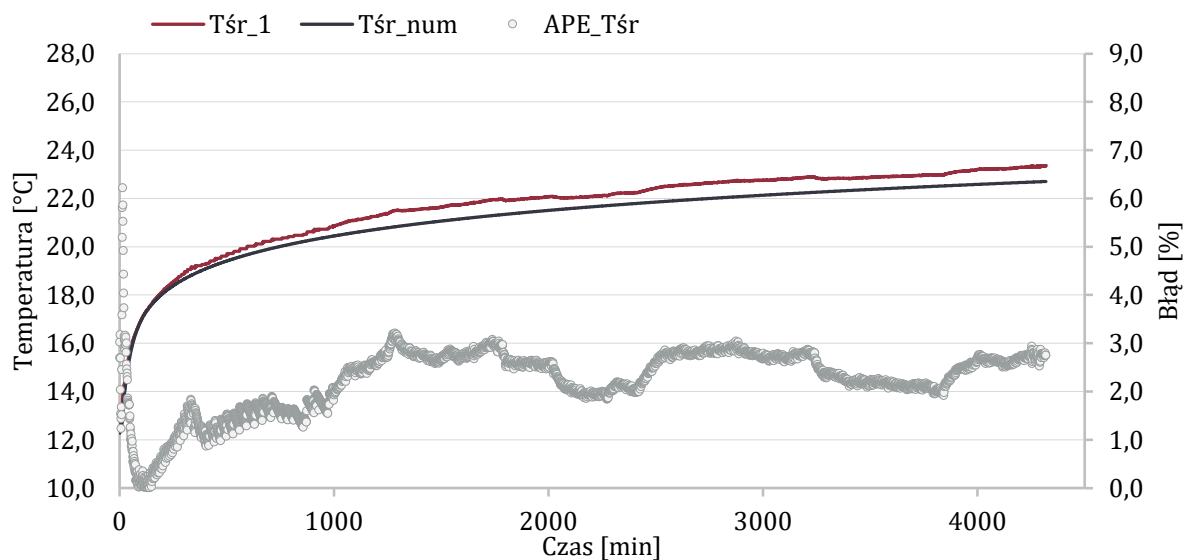
Rysunek 33 Porównanie mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu w trakcie TESTU 1 (warunki 1): wyniki pomiarów (Q_1) oraz symulacji numerycznej (Q_{num})

Porównanie wyników symulacji wartości temperatur płynu na zasilaniu i powrocie wymiennika (T_{zas_num}, T_{pow_num}) z pomiarami (T_{zas_1}, T_{pow_1}) zamieszono na rysunku 34. Ponadto, przedstawiono na nim chwilowe wartości błędów modelu numerycznego względem pomiarów (APE). Uzyskano dobrą zbieżność modelu z pomiarami, za wyjątkiem początkowych minut testu błędy symulacji temperatury na powrocie z wymiennika nie przekraczają 3,5%, a błędy symulacji temperatury na zasilaniu wymiennika nie przekraczają 3%.



Rysunek 34 Porównanie wartości temperatur zasilania i powrotu czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (warunki 1): wyniki pomiarów (T_1) oraz symulacji numerycznej (T_{num})

Na rysunku 35 przedstawiono wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczone na podstawie danych pomiarowych (T_{sr_1}) oraz modelowania numerycznego (T_{sr_num}). Ponadto, przedstawiono na nim chwilowe wartości błędu modelu numerycznego względem pomiarów (APE). Uzyskano dobrą zbieżność modelu z pomiarami, błędy wartości średnich temperatur wyznaczonych na podstawie symulacji numerycznej nie przekraczają 3% (poza początkowymi minutami testu).



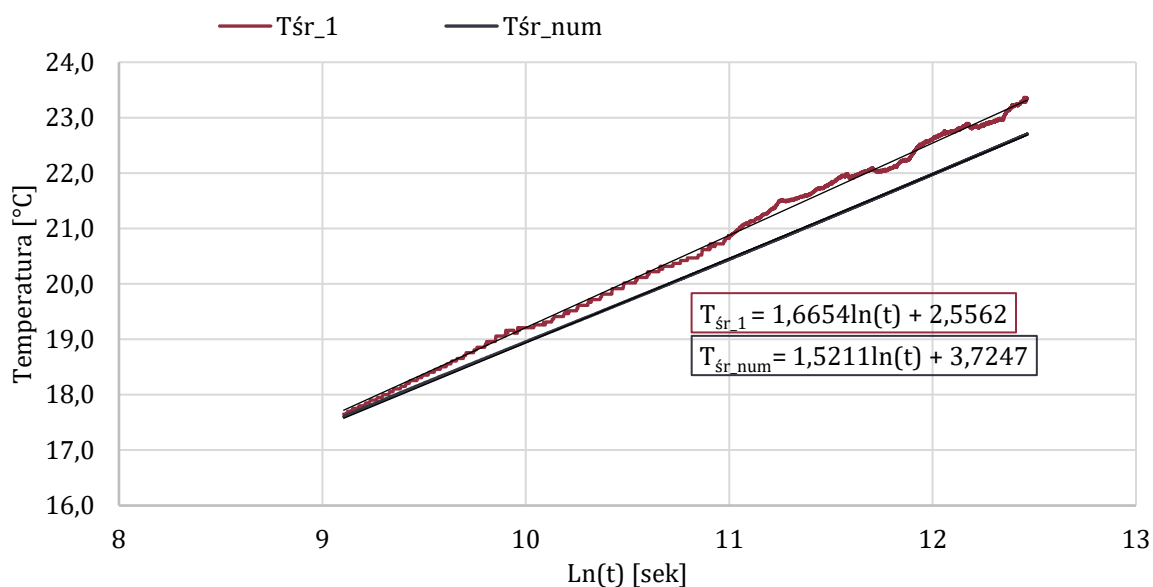
Rysunek 35 Porównanie wartości średnich temperatur czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (warian 1): wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej (T_{sr_num})

Podsumowanie średnich wartości poszczególnych typów błędów zestawiono w tabeli 26. Jak można zauważyć model numeryczny wykazuje dość dobrą zgodność z wynikami pomiarów. Średni błąd względny średniej temperatury płynu wynosi 1,86%. W literaturze błąd taki uznawany jest za akceptowalny [131][139].

Tabela 26 Zestawienie średnich błędów wartości temperatur zasilania, powrotu oraz średnich wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego względem danych pomiarowych (TEST 1, wariant 1)

Typ błędu	Średni błąd względny (mean absolute percentage error)			Średni błąd bezwzględny (mean absolute error)			Maksymalny błąd bezwzględny (maximum absolute error)		
Oznaczenie	MAPE			MAE			ME		
Parametr	T_{zas}	T_{pow}	T_{sr}	T_{zas}	T_{pow}	T_{sr}	T_{zas}	T_{pow}	T_{sr}
Jednostka	[%]			[°C]			[°C]		
Wartość błędu	1,57	2,20	1,86	0,38	0,46	0,42	0,94	0,70	0,82

Bazując na danych zamieszczonych na rysunku 36 wyznaczono wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu z zastosowaniem modelu ILS. Wyniki tych obliczeń, dla okresu od 2,5 do 72 h przedstawiono w tabeli 27. Wartość przewodności cieplnej gruntu wyznaczona na podstawie wyników symulacji numerycznej (2,52 W/(mK) jest o 11% większa od wyznaczonej na podstawie pomiarów, wynoszącej 2,27 W/(mK). Dlatego, w kolejnym etapie pracy przeprowadzono kalibrację modelu numerycznego poprzez zmianę wprowadzanych do modelu numerycznego wartości współczynników przewodzenia ciepła gruntu, wypełnienia odwiertu i u-rury. Badano wpływ tych danych wejściowych do modelu numerycznego na poziom zbieżności wyników symulacji z pomiarami.



Rysunek 36 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 72 h: wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej (T_{sr_num})

Tabela 27 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1)

Opis	TEST 1 (wariant 1)	Model num.	Jednostka
λ_{ILS} – efektywna przewodność cieplna gruntu	2,27	2,52	W/(mK)
R_{odw} – opór cieplny odwiertu	0,0855	0,0830	mK/W

3.3.3.2. Kalibracja modelu numerycznego TRT względem TESTU 1

W celu uzyskania lepszej zbieżności modelu numerycznego z pomiarami, zbadano jaki wpływ na wyniki symulacji ma zmiana właściwości termofizycznych domen obliczeniowych: współczynnika przewodzenia ciepła materiału wypełnienia, u-rury i gruntu.

Kalibrację rozpoczęto od zmiany wartości współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy bentonitowej (λ_b). Warto zaznaczyć, że wartość tego współczynnika nie była dokładnie znana, wobec czego do wstępnych obliczeń przyjęto ją jako standardową, adekwatną do materiałów wypełniających dobrej jakości. Analizę wpływu zmiany przewodności cieplnej zaprawy bentonitowej na temperatury płynu w GWC (a tym samym na estymowane na ich podstawie na parametry gruntu) przeprowadzono dla okresu 2,5 - 72 h. W tabeli 28 i 29 zestawiono dane wejściowe i zaplanowane warianty analizy. Wszystkie analizy i symulacje przedstawione we wcześniejszej części pracy były przeprowadzone dla wartości zgodnych z wariantem 3.

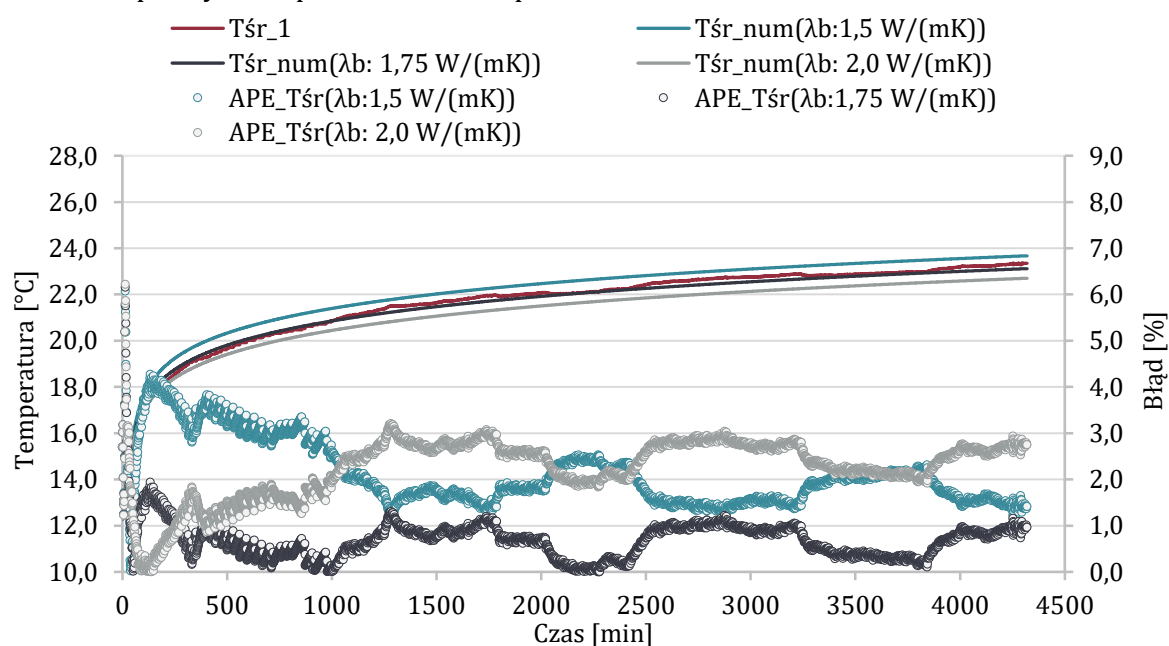
Tabela 28 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznych z założeniem różnych wartości przewodności cieplnej bentonitu (TEST 1, wariant 1)

Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna u-rury	λ_r	W/(mK)	0,50
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	W/(mK)	2,33
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	3,77
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,33

Tabela 29 Zestawienie wariantów analizy: wartości przewodności cieplnej bentonitu

Opis	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Przewodność cieplna bentonitu λ_b [W/(mK)]	1,5	1,75	2,0

Na rysunku 37 przedstawiono wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczone na podstawie danych pomiarowych oraz analizy wyników symulacji numerycznych dla różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu.



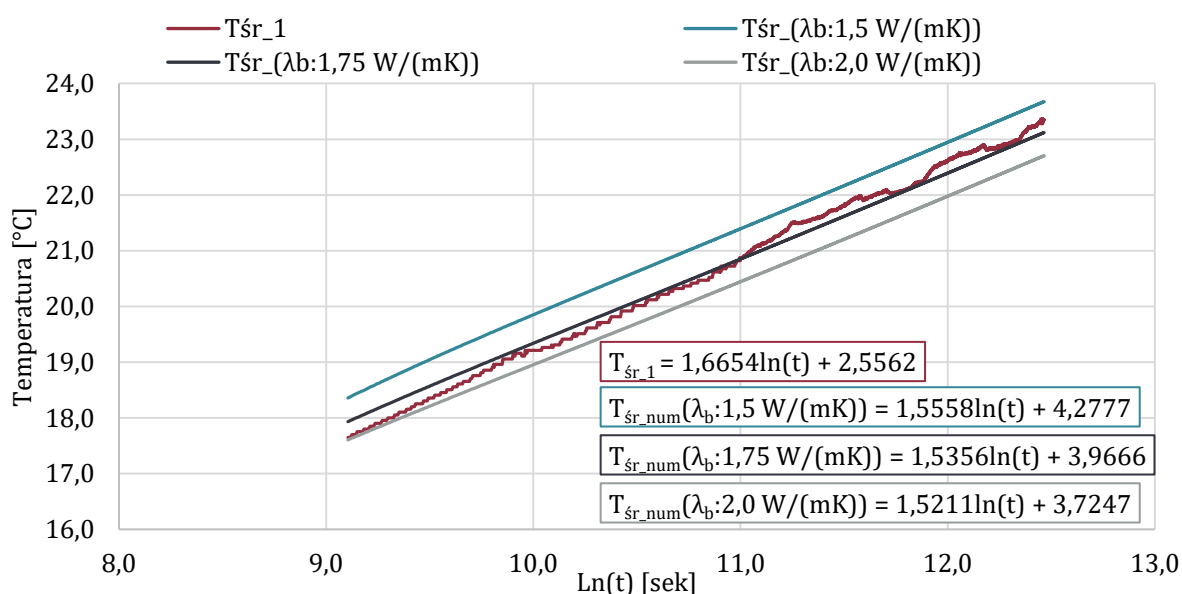
Rysunek 37 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości przewodności cieplnej bentonitu (T_{sr_num})

W zależności od przyjętej wartości współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy bentonitowej uzyskano różny poziom zbieżności wyników symulacji z pomiarami. W przypadku zmniejszenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu (λ_b) do $1,5 \text{ W}/(\text{mK})$ zauważono istotny wzrost temperatury w pierwszych godzinach testu, spowodowany wzrostem oporu cieplnego odwiertu. W tabeli 30 zestawiono średnie błędy wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie symulacji numerycznych względem wyników pomiarów. Najmniejszy średni błąd względny uzyskano dla wartości $\lambda_b = 1,75 \text{ W}/(\text{mK})$. Jednak, jak można zauważyć na rysunku 37, największą zgodność modelu z pomiarami w pierwszych godzinach testu (kiedy wpływ bentonitu jest największy) uzyskano dla wartości przewodności cieplnej wypełnienia wynoszącej $\lambda_b = 2,0 \text{ W}/(\text{mK})$.

Tabela 30 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego z założeniem różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu względem danych pomiarowych

Typ błędu	Średni błąd względny (Mean absolute percentage error)	Średni błąd bezwzględny (Mean absolute error)	Maksymalny błąd bezwzględny (Maximum absolute error)
Oznaczenie	MAPE	MAE	ME
Parametr	T_{sr}	T_{sr}	T_{sr}
Jednostka	[%]	[°C]	[°C]
Wartość błędu $\lambda_b = 1,5 \text{ W}/(\text{mK})$	2,12	0,45	0,84
Wartość błędu $\lambda_b = 1,75 \text{ W}/(\text{mK})$	0,58	0,13	0,85
Wartość błędu $\lambda_b = 2,0 \text{ W}/(\text{mK})$	2,24	0,49	0,86

Bazując na danych zamieszczonych na rysunku 38 wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu z zastosowaniem modelu ILS. Wyniki tych obliczeń, dla okresu czasu od 2,5 do 72 h przedstawiono w tabeli 31.



Rysunek 38 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 72 h: wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu (T_{sr_num})

Tabela 31 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznych z uwzględnieniem różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1)

Opis	TEST 1 (wariant 1)	λ_b : 1,5 W/(mK)	λ_b : 1,75 W/(mK)	λ_b : 2,0 W/(mK)
λ_{ILS} – efektywna przewodność cieplna gruntu, W/(mK)	2,27	2,46	2,50	2,52
R_{odw} – opór cieplny odwiertu, mK/W	0,0855	0,1004	0,0905	0,0830

Jak można zauważyć, na podstawie danych zawartych w tabeli 31, wyznaczone z zastosowaniem modelu ILS wartości przewodności cieplnej gruntu dla danych z poszczególnych symulacji numerycznych nadal nie są bliskie wartości wyznaczonej na podstawie danych pomiarowych. Natomiast, wartość oporu cieplnego odwiertu, jest najbliższa wartości wyznaczonej na podstawie danych pomiarowych dla współczynnika przewodzenia ciepła zaprawy bentonitowej wynoszącego $\lambda_b = 2,0 \text{ W/(mK)}$. W związku z powyższym przyjęto, że zmiana współczynnika przewodzenia bentonitu nie jest właściwym kierunkiem kalibracji modelu numerycznego.

Kolejnym etapem kalibracji była zmiana parametrów termofizycznych materiału, z którego wykonana jest u-rura. Analizę wpływu zmiany tych parametrów na temperatury płynu w GWC (a tym samym na estymowane na ich podstawie na parametry gruntu) przeprowadzono dla okresu 2,5 – 72 h. W tabeli 32 i 33 zestawiono dane wejściowe i zaplanowane warianty analizy. Analizy i symulacje przedstawione we wcześniejszych punktach pracy były przeprowadzone dla wartości zgodnych z wariantem 1.

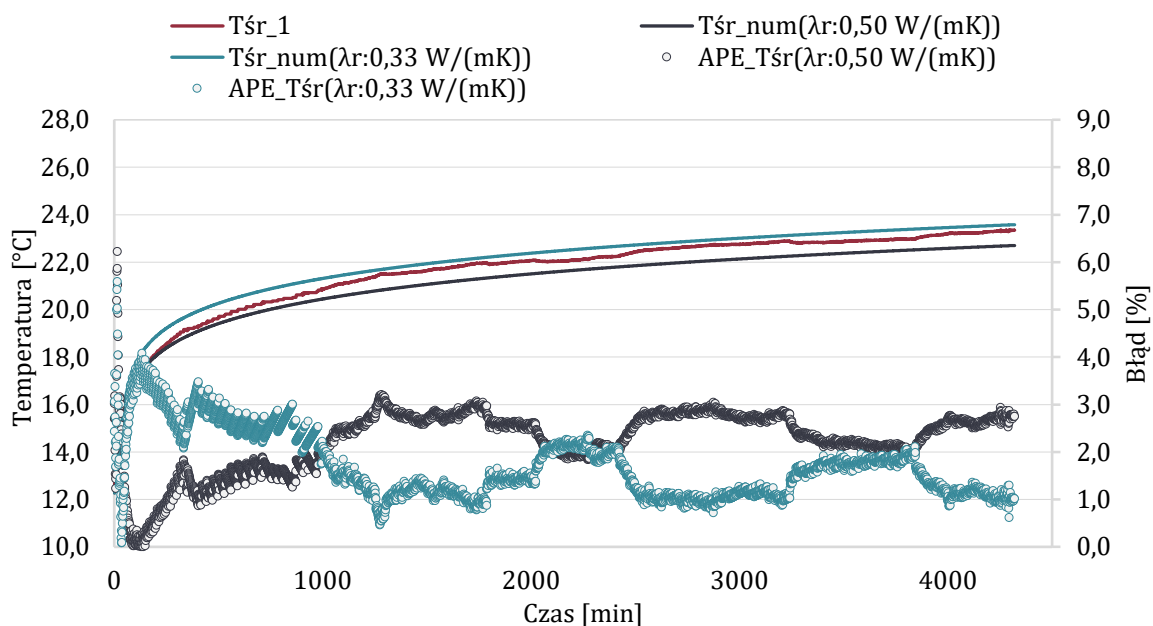
Tabela 32 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznych z założeniem różnych wartości przewodności cieplnej u-rury (TEST 1, wariant 1)

Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna bentonitu	λ_b	W/(mK)	2,00
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	W/(mK)	2,33
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	3,77
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,33

Tabela 33 Zestawienie wariantów analizy: wartości przewodności cieplnej u-rury

Opis	Wariant 1	Wariant 2
Przewodność cieplna λ_r [W/(mK)]	0,50	0,33
Ciepło właściwe C_r [J/(kgK)]	1800	2200
Gęstość ρ_r [kg/m ³]	980	920

Na rysunku 39 przedstawiono wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczone na podstawie danych pomiarowych oraz analizy wyników symulacji numerycznych dla różnych parametrów u-rury. Wpływ parametrów u-rury jest zdecydowanie największy w pierwszych minutach testu. Zmniejszenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła u-rury spowodowało istotny wzrost temperatury płynu w pierwszej fazie testu.



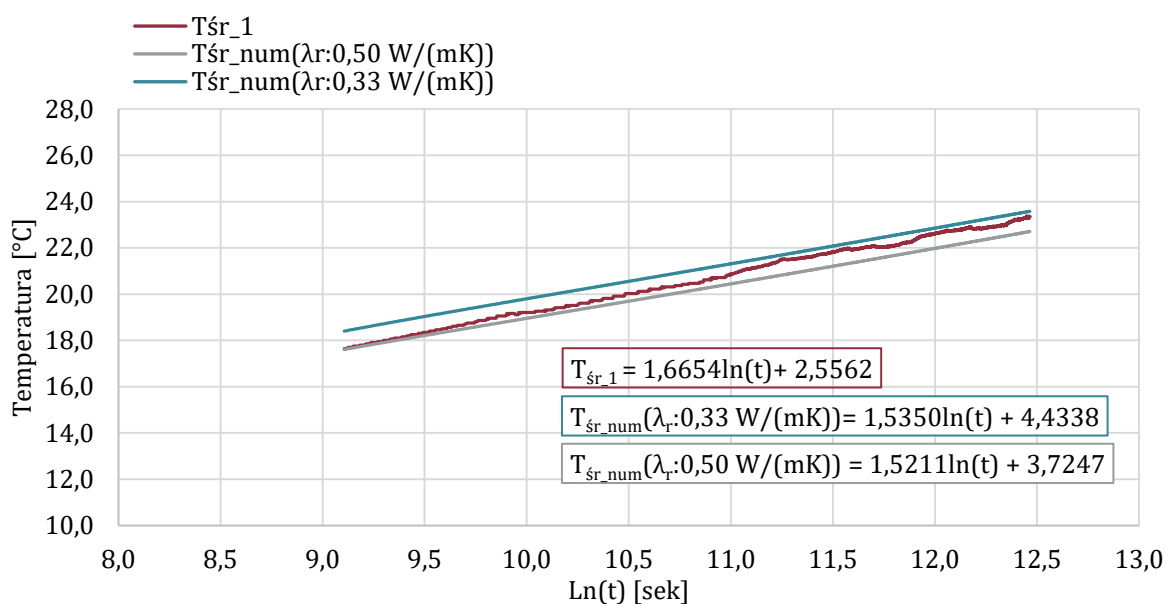
Rysunek 39 Porównanie wartości średnich temperatury płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości parametrów u-rury (T_{sr_num})

W tabeli 34 zestawiono średnie błędy wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie symulacji numerycznych względem wyników pomiarów. Średni błąd względny dla skorygowanej wartości przewodności cieplnej u-rury, $\lambda_r = 0,33 W/(mK)$, wynosi 1,69 % i jest mniejszy niż dla wartości $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$, dla której wynosi 2,24 %. Jednak, jak można zauważyć na rysunku 39, większą zgodność modelu z pomiarami w pierwszych godzinach testu (kiedy wpływ materiału u-rury jest największy) uzyskano dla wartości przewodności cieplnej u-rury wynoszącej $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$.

Tabela 34 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego z założeniem różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła u-rury względem danych pomiarowych

Typ błędu	Średni błąd względny (Mean absolute percentage error)	Średni błąd bezwzględny (Mean absolute error)	Maksymalny błąd bezwzględny (Maximum absolute error)
Oznaczenie	MAPE	MAE	ME
Parametr	T_{sr}	T_{sr}	T_{sr}
Jednostka	[%]	[°C]	[°C]
Wartość błędu $\lambda_r = 0,5 W/(m \cdot K)$	2,24	0,49	0,86
Wartość błędu $\lambda_r = 0,33 W/(m \cdot K)$	1,69	0,37	0,81

Bazując na danych zamieszczonych na rysunku 40 wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu z zastosowaniem modelu ILS. Wyniki tych obliczeń, dla okresu czasu od 2,5 do 72 h przedstawiono w tabeli 34.



Rysunek 40 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 72 h: wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości parametrów u-rury (T_{sr_num})

Wyznaczona metodą ILS (dla okresu 2,5 – 72 h) wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu dla symulacji, w której przyjęto przewodność cieplną u-rury równą $0,33 \text{ W}/(\text{mK})$ wynosi $2,50 \text{ W}/(\text{mK})$, natomiast opór cieplny odwiertu wynosi $0,1001 \text{ mK}/\text{W}$ (tabela 35). Pogorszenie parametrów u-rury spowodowało, że wartość efektywnej przewodności cieplnej gruntu jest wyższa o ponad 10 %, a wartość oporu cieplnego gruntu o ponad 17 % względem wyznaczonych dla tego samego okresu czasu na podstawie danych pomiarowych.

Tabela 35 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznych dla różnych parametrów u-rury dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1)

Opis	TEST 1 (wariant 1)	λ_r : 0,5 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	λ_r : 0,33 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_{ILS} – efektywna przewodność cieplna gruntu, $\text{W}/(\text{mK})$	2,27	2,52	2,50
R_{odw} – opór cieplny odwiertu, mK/W	0,0855	0,0830	0,1001

Podsumowanie przeprowadzonych analiz zamieszczono w tabeli 36. Zmiana wprowadzanych do solvera obliczeniowego wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu lub parametrów u-rury wpłynęła przede wszystkim na wartość oporu cieplnego odwiertu. Na wyznaczaną z zastosowaniem modelu ILS wartość współczynnika przewodzenia ciepła zmiana ta miała zaś wpływ relatywnie niewielki. Ponadto, przeprowadzone analizy pokazały, że zmiana parametrów u-rury lub bentonitu nie wpłynęła istotnie na poprawę dopasowania wyników średniej temperatury płynu w GWC wyznaczonej na podstawie symulacji numerycznych do wyników pomiarów. Pomimo tego, że wyniki tych symulacji wykazywały niski średni błąd względny, to wartości temperatur płynu charakteryzowały się znaczącym niedopasowaniem wyników modelowania do pomiarów w pierwszej części testu. Wykonane analizy wskazują, że przyjęte do symulacji numerycznych pierwotne założenia, czyli $\lambda_b = 2,0 \text{ W}/(\text{mK})$ oraz

$\lambda_r = 0,5 \text{ W/(mK)}$ odpowiadają prawdopodobnie wartościom rzeczywistym, a istotnej poprawy jakości wyników symulacji należy upatrywać w modyfikacji właściwości gruntu.

Tabela 36 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznych dla różnych danych wejściowych dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1) - podsumowanie

Opis	TEST 1 (wariant 1) 2,5 – 72 h	$\lambda_b: 1,5$	$\lambda_b: 1,75$	$\lambda_b: 2,0$	$\lambda_b: 2,0$
		$\lambda_r: 0,5$	$\lambda_r: 0,5$	$\lambda_r: 0,5$	$\lambda_r: 0,33$
		$\lambda_g: 2,33$	$\lambda_g: 2,33$	$\lambda_g: 2,33$	$\lambda_g: 2,33$
λ_{ILS} – efektywna przewodność cieplna gruntu, $W/(mK)$	2,27	2,46	2,50	2,52	2,50
R_{odw} – opór cieplny odwiertu, mK/W	0,0855	0,1004	0,0905	0,0830	0,1001
APE - Błąd względny współczynnika λ_{ILS} , %	-	8,37	10,13	11,01	10,13
APE - Błąd względny oporu cieplnego odwiertu R_{odw} , %	-	17,43	5,85	2,92	17,08

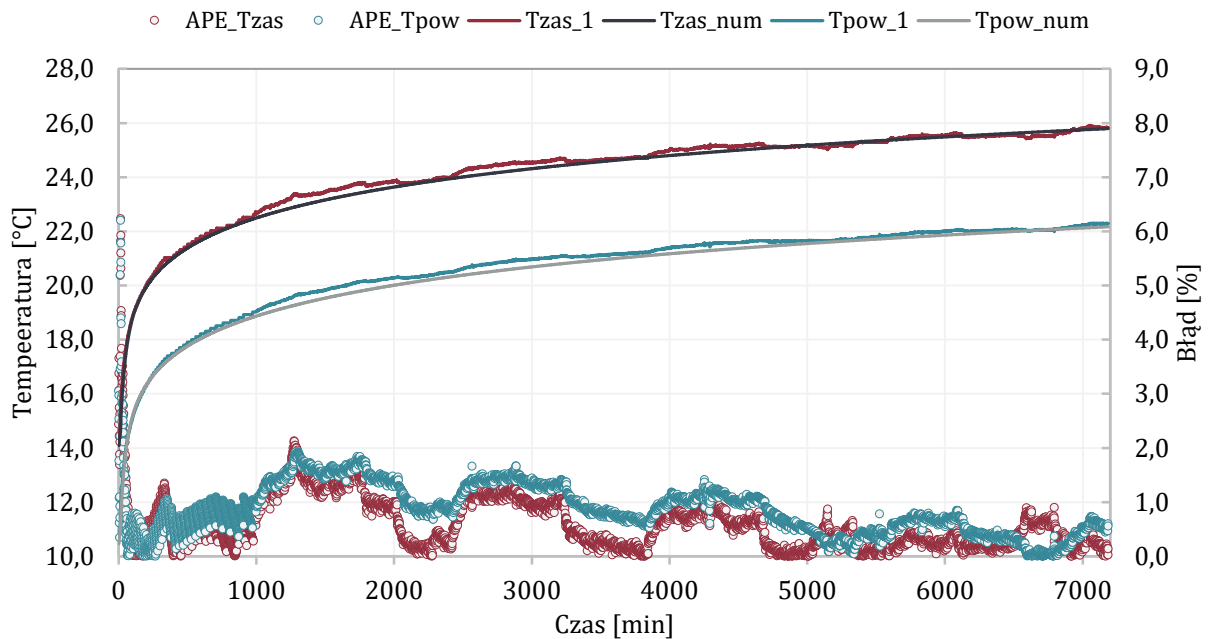
W podsumowaniu walidacji modelu numerycznego względem pomiarów terenowych dla warunków TESTU 1 (wariant 1) stwierdzono, że wprowadzenie do solvera obliczeniowego wartości przewodności cieplnej gruntu wynoszącej $2,33 \text{ W/(mK)}$), zgodnej z wyznaczoną na podstawie danych pomiarowych dla okresu 2,5 – 119 h, skutkuje wynikami, które analizując metodą ILS dla czasu 2,5 – 72 h wskazują na wartość przewodności cieplnej równą $2,52 \text{ W/(mK)}$. Jest to wartość wyższa w stosunku do wartości $2,27 \text{ W/(mK)}$ uzyskanej dla analizy danych pomiarowych z okresu 2,5 – 72 h o 11 %. Założono, że część tego błędu może być związana z niewielkimi zakłóceniami jakie pojawiły w trakcie testu terenowego i dlatego zdecydowano się na obniżenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wprowadzanej do solvera obliczeniowego do poziomu $2,15 \text{ W/(mK)}$. Dane wejściowe przyjęte do tej końcowej analizy prowadzonej w ramach kalibracji modelu numerycznego zestawiono w tabeli 37. Symulacje i analizy w poniższej części pracy przeprowadzono dla całego okresu pomiarowego TESTU 1 (wariant 1), wynoszącego 119 h.

Tabela 37 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej z uwzględnieniem skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (TEST 1, wariant 1)

Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna u-rury	λ_r	$W/(mK)$	0,50
Przewodność cieplna bentonitu	λ_b	$W/(mK)$	2,00
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	$W/(mK)$	2,15
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	3,77
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,33

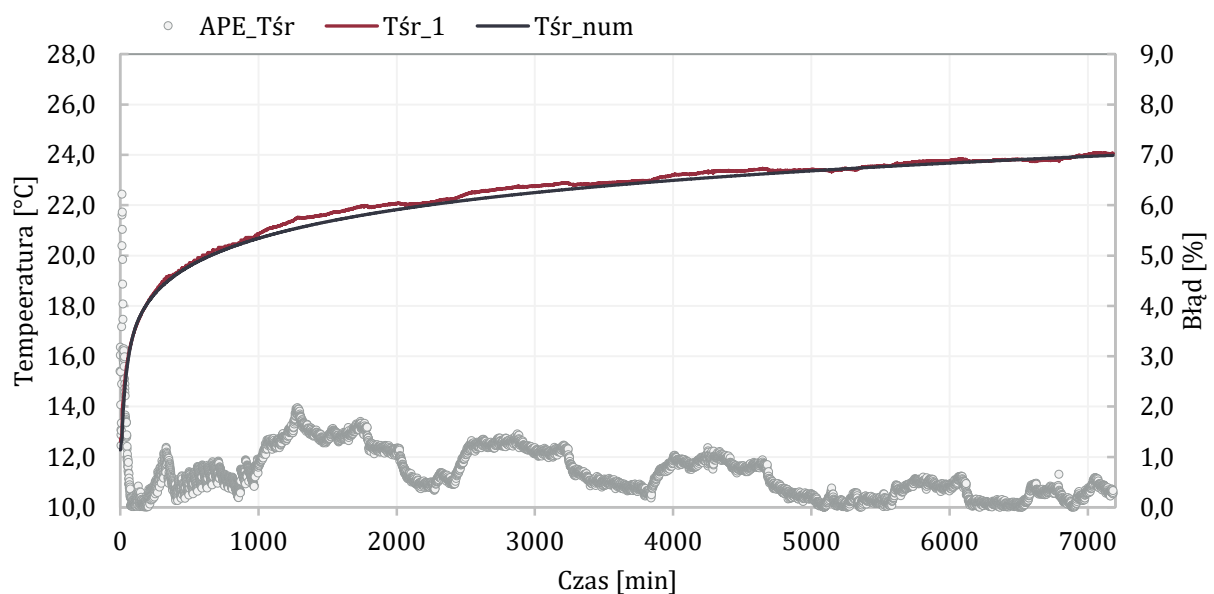
Na rysunku 41 przedstawiono porównanie temperatur czynnika na wlocie i wylocie z wymiennika w trakcie pomiarów (T_{zas_1}, T_{pow_1}) oraz wynikających z obliczeń numerycznych (T_{zas_num}, T_{pow_num}). Ponadto, przedstawiono na nim chwilowe wartości błędu modelu numerycznego względem pomiarów (APE). Dzięki skorygowaniu wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wprowadzanego do solvera obliczeniowego, z wartości wynoszącej $2,33 \text{ W/(mK)}$ na $2,15 \text{ W/(mK)}$, uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników modelowania

z pomiarami. Błędy symulacji temperatury czynnika na wylocie i wylocie z wymiennika po 2,5 h testu utrzymują się poniżej 2,0%.



Rysunek 41 Porównanie wartości temperatur zasilania i powrotu czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (warunki 1): wyniki pomiarów (T_1) oraz symulacji numerycznej (T_{num}) dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu

Wartości średniej temperatury krążącego w GWC płynu wyznaczone na podstawie danych pomiarowych (T_{sr_1}) oraz modelowania numerycznego (T_{sr_num}) przedstawiono na rysunku 42. Uzyskano dobrą zbieżność modelu z pomiarami, chwilowe błędy względne (APE) wartości średniej temperatury płynu w GWC wyznaczonej na podstawie symulacji numerycznej nie przekraczają 2% (poza początkowymi minutami testu).



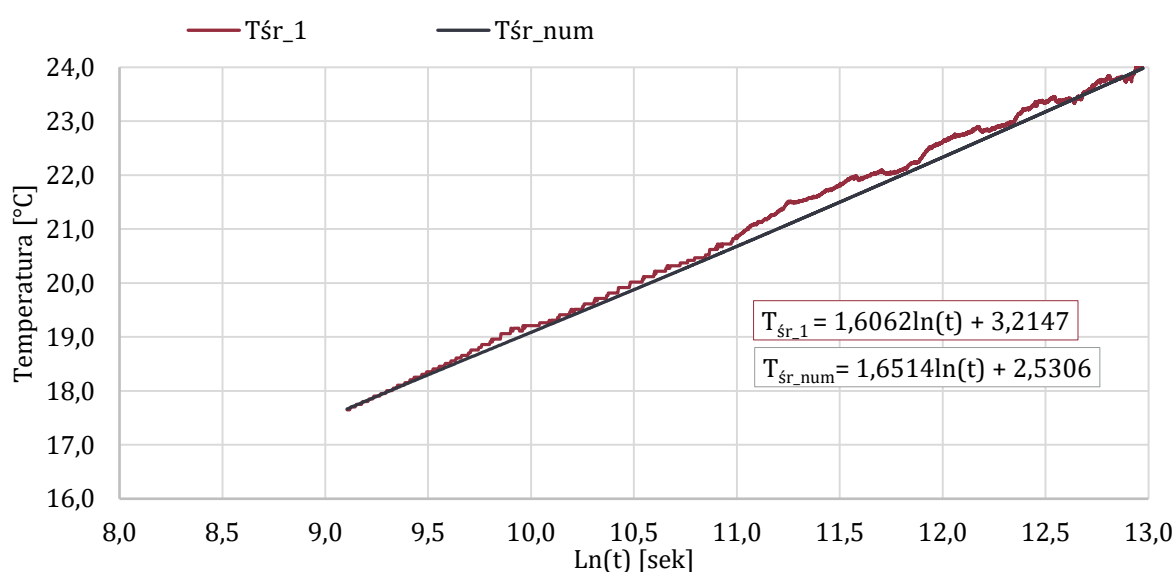
Rysunek 42 Porównanie wartości średnich temperatur czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu

Reasumując, uzyskano bardzo dobrą dokładność modelowanej wartości średniej temperatury cieczy krążącej w wymienniku z pomiarami. Warto zaznaczyć, że opracowany model nie uwzględnia wpływu zakłóceń, takich jak wahania temperatury powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, gradient geotermalny czy konwekcyjny przepływ ciepła w gruncie, stąd widoczne na rysunkach 42 i 43 niewielkie rozbieżności pomiędzy wartościami zmierzonymi i symulowanymi. Na podstawie porównania danych uzyskanych z obliczeń numerycznych z danymi pomiarowymi zarejestrowanymi na stanowisku badawczym można je uznać za zbieżne. Średni błąd względny modelowanej średniej temperatury płynu wynosi 0,67%, co w porównaniu z innymi modelami [124] można uznać za bardzo dobry wynik. Szczegółowe zestawienie średnich błędów symulacji temperatury na wlocie i wylocie z wymiennika oraz średniej przedstawiono w poniższej tabeli 38.

Tabela 38 Zestawienie średnich błędów wartości temperatur zasilania, powrotu oraz średnich wyznaczonych za pomocą symulacji numerycznej dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu względem danych pomiarowych (TEST 1, wariant 1)

Typ błędu	Średni błąd względny (mean absolute percentage error)			Średni błąd bezwzględny (mean absolute error)			Maksymalny błąd bezwzględny (maximum absolute error)		
Oznaczenie	MAPE			MAE			ME		
Parametr	T_{zas}	T_{pow}	$T_{śr}$	T_{zas}	T_{pow}	$T_{śr}$	T_{zas}	T_{pow}	$T_{śr}$
Jednostka	[%]			[°C]			[°C]		
Wartość błędu	0,58	0,85	0,67	0,14	0,17	0,15	0,98	0,75	0,86

Bazując na danych zamieszczonych na rysunku 43 wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu z zastosowaniem modelu ILS. Wyniki tych obliczeń, dla okresu od 2,5 do 119 h przedstawiono w tabeli 39. Wartość przewodności cieplnej gruntu wyznaczona na podstawie wyników symulacji numerycznej wynosi $2,32 \text{ W}/(\text{mK})$ i jest o 0,4% mniejsza od wyznaczonej na podstawie pomiarów, wynoszącej $2,33 \text{ W}/(\text{mK})$. Wyznaczony na podstawie symulacji numerycznej opór cieplny odwiertu wynosi $0,0807 \text{ (mK)}/\text{W}$ i jest mniejszy o 9,9% od uzyskanego na podstawie pomiarów.



Rysunek 43 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 119 h: wyniki pomiarów ($T_{śr_1}$) oraz symulacji numerycznej dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu ($T_{śr_num}$)

Tabela 39 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej dla czasu testu 2,5 – 119 h (TEST 1, wariant 1)

Opis	TEST 1 (wariant 1)	Model numeryczny
λ_{eff} – efektywna przewodność cieplna gruntu, $W/(mK)$	2,33	2,32
R_{odw} – opór cieplny odwiertu, mK/W	0,0896	0,0807

Reasumując, wprowadzenie do solvera obliczeniowego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu pozwoliło na uzyskanie bardzo dobrej zgodności wyników symulacji z pomiarami. Ponadto, efektywna przewodność cieplna gruntu wyznaczona za pomocą modelu nieskończonego źródła liniowego (ILS) na podstawie numerycznego testu TRT przyjęła niemal tą samą wartość, jak w przypadku analizy wykonanej na podstawie danych pomiarowych. Uzyskane, różne wartości oporu cieplnego odwiertu mogą być efektem niewielkiego niedopasowania danych wejściowych dotyczących wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu i u-rury do rzeczywistych.

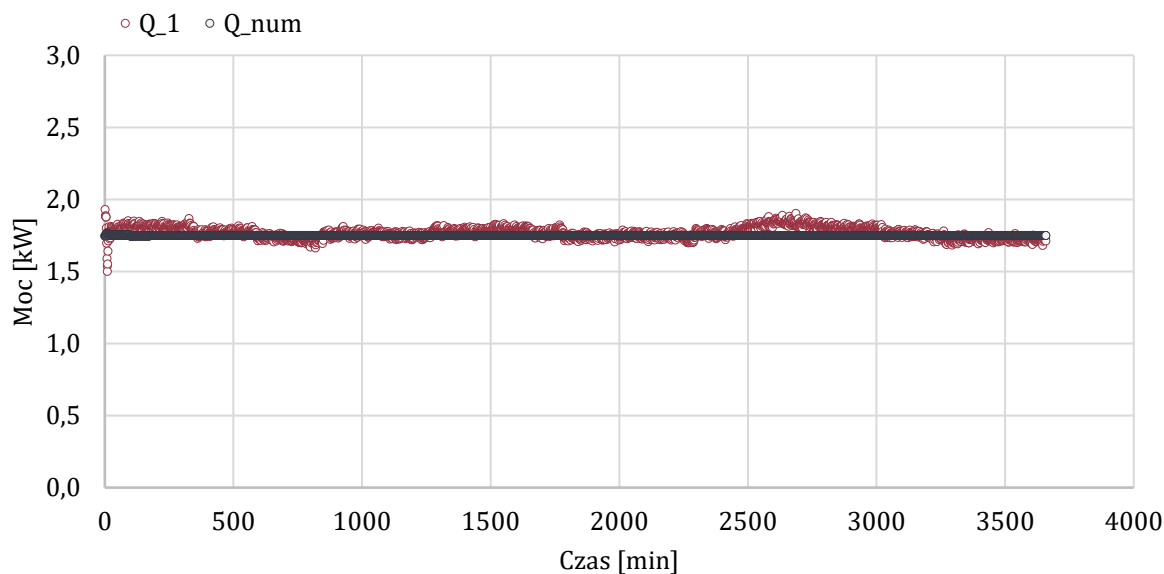
3.3.3.3. Walidacja modelu numerycznego TRT względem TESTU 2

Na tym etapie oceny jakości modelu numerycznego wykorzystano dane pomiarowe z terenowego testu odpowiedzi termicznej gruntu (TEST 2, wariant 1) opisanego w rozdziale 2. Przeprowadzono symulację numeryczną TRT w oparciu o dane wejściowe zaczerpnięte z tych pomiarów. TEST 2 (wariant 1) przeprowadzony był ze zmniejszonymi wartościami przepływu czynnika oraz mocy grzewczej o połowę. Wymagało to modyfikacji pliku UDF oraz wprowadzenia nowych warunków brzegowych na wlocie do wymiennika. Prędkość czynnika pośredniczącego oraz moc cieplna dostarczana do odwiertu przyjęte zostały na podstawie średniej wartości tych parametrów w trakcie testu terenowego. Wprowadzone do modelu założenia dokładnie odwzorowały stan wymiennika w trakcie testów terenowych. W tabeli 40 zestawiono najważniejsze dane wejściowe do symulacji numerycznej. Obliczenia przeprowadzono dla kroku czasowego wynoszącego 1 minutę ($\Delta t = 60 s$). W każdym kroku czasowym założono 20 iteracji. Obliczenia wykonano dla 3 660 kroków obliczeniowych, odpowiadających 61 h trwania testu (zgodnego z czasem trwania TESTU 2). Obliczenia wykonano z zastosowaniem modelu turbulencji SST k- ω .

Tabela 40 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej odpowiadające warunkom TESTU 2 (wariant 1)

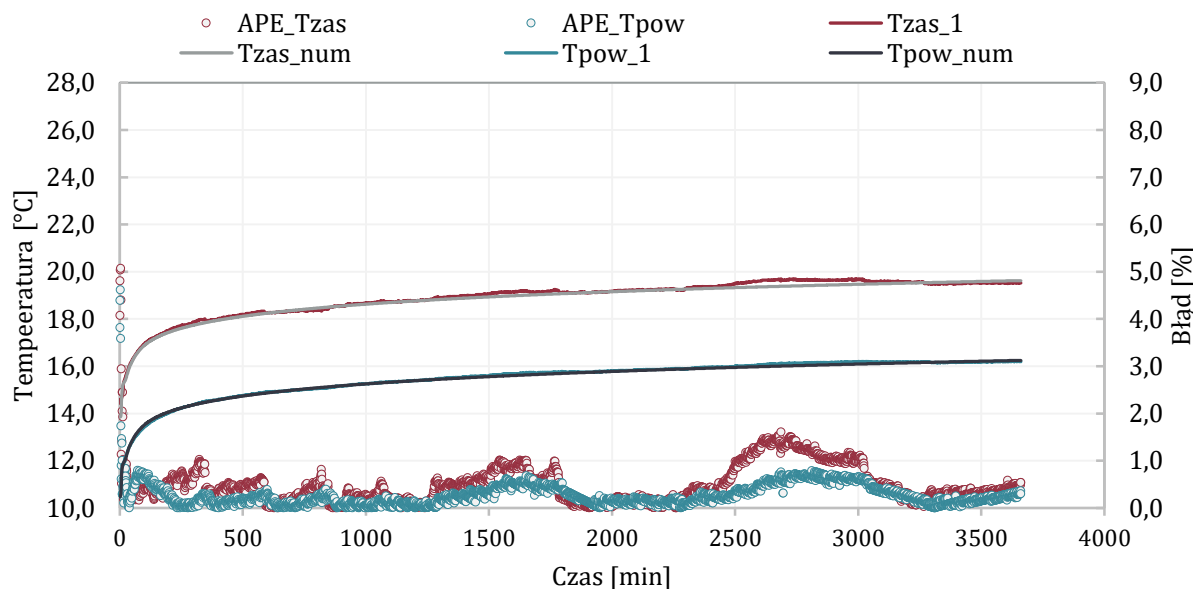
Opis	Parametr	Jednostka	Wartość
Przewodność cieplna u-rury	λ_r	$W/(mK)$	0,50
Przewodność cieplna bentonitu	λ_b	$W/(mK)$	2,0
Przewodność cieplna gruntu	λ_g	$W/(mK)$	2,15
Moc cieplna dostarczana do odwiertu	Q_1	kW	1,75
Prędkość przepływu czynnika	w	m/s	0,17

Na rysunku 44 przedstawiono wartości mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu. W modelu numerycznym moc ta była stała i wynosiła 1,75 kW. Obserwowane wahania mocy grzewczej w trakcie testu terenowego były wynikiem wpływu warunków atmosferycznych i/lub zmian napięcia w sieci elektroenergetycznej.



Rysunek 44 Porównanie mocy grzewczej dostarczonej do odwiertu w trakcie TESTU 2 (warunki 1): wyniki pomiarów (Q_1) oraz symulacji numerycznej (Q_{num})

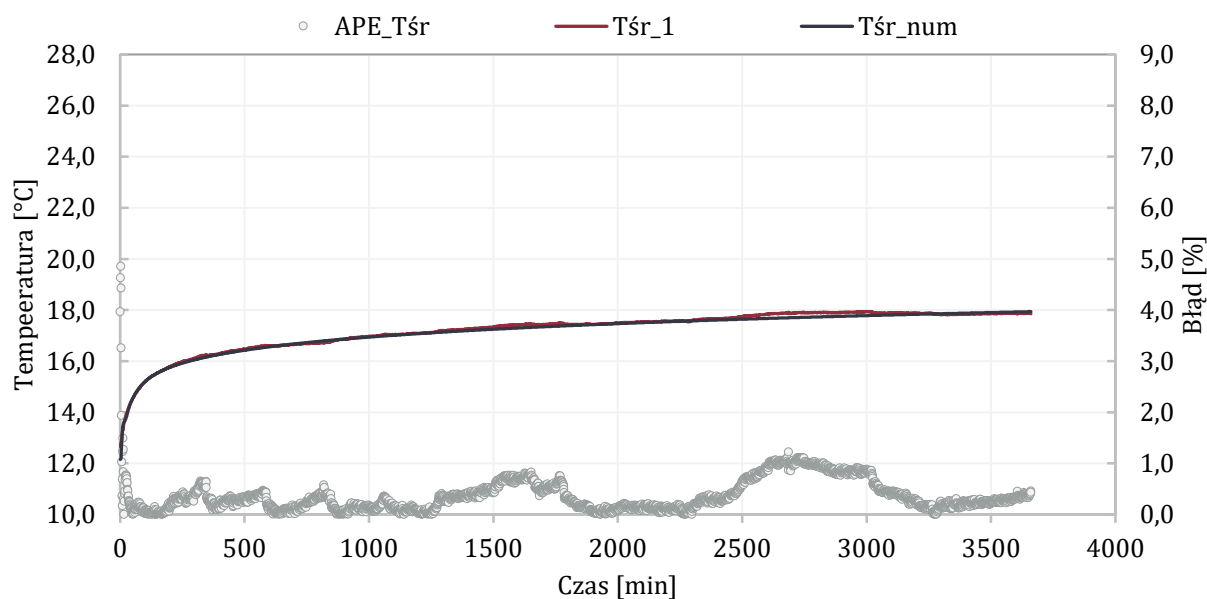
Porównanie wyników symulacji wartości temperatur płynu na zasilaniu i powrocie wymiennika (T_{zas_num} , T_{pow_num}) z pomiarami (T_{zas_1} , T_{pow_1}) zamieszczono na rysunku 45. Ponadto przedstawiono na nim chwilowe wartości błędu modelu numerycznego względem pomiarów (APE). Uzyskano dobrą zbieżność modelu z pomiarami, za wyjątkiem początkowych minut testu błędy symulacji temperatury na powrocie z wymiennika nie przekraczają 1,5 %, a błędy symulacji temperatury na zasilaniu wymiennika nie przekraczają 1 %.



Rysunek 45 Porównanie wartości temperatur zasilania i powrotu czynnika roboczego w trakcie TESTU 2 (warunki 1): wyniki pomiarów (T_1) oraz symulacji numerycznej (T_{num})

Na rysunku 46 przedstawiono wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych (T_{sr_1}) oraz przeprowadzonych obliczeń numerycznych (T_{sr_num}), a także błędy tych obliczeń względem pomiarów (APE). Uzyskano dobrą zbieżność modelu z pomiarami, błędy wartości średnich temperatur wyznaczonych na podstawie symulacji

numerycznej nie przekraczają 1 % (poza pierwszymi minutami i krótkim okresem w drugiej połowie testu).



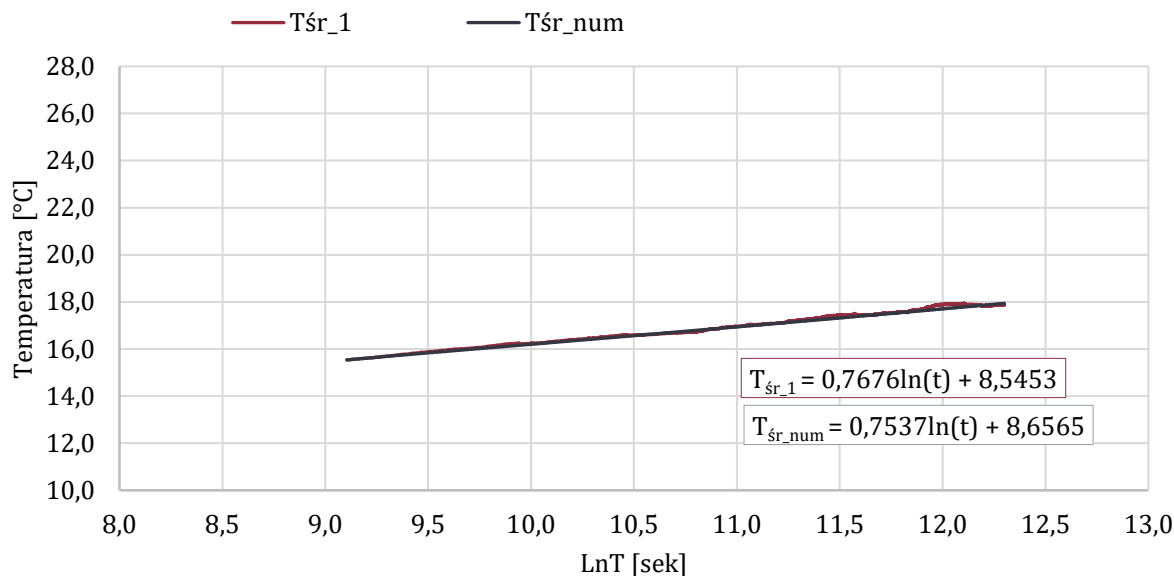
Rysunek 46 Porównanie wartości średnich temperatur czynnika roboczego w trakcie TESTU 2 (wariant 1): wyniki pomiarów ($T_{śr_1}$) oraz symulacji numerycznej ($T_{śr_num}$)

Podsumowanie średnich wartości poszczególnych typów błędów zestawiono w tabeli 41. Średni błąd względny średniej temperatury płynu w wymienniku wynosi 0,34 %. W przypadku TESTU 2 uzyskano jeszcze lepszą zbieżność wyników modelu numerycznego z pomiarami niż w przypadku TESTU 1.

Tabela 41 Zestawienie średnich błędów wartości temperatur zasilania, powrotu oraz średnich wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego względem danych pomiarowych (TEST 2, wariant 1)

Typ błędu	Średni błąd względny (Mean absolute percentage error)			Średni błąd bezwzględny (Mean absolute error)			Maksymalny błąd bezwzględny (Maximum absolute error)		
	MAPE			MAE			ME		
Oznaczenie	T_{zas}	T_{pow}	$T_{śr}$	T_{zas}	T_{pow}	$T_{śr}$	T_{zas}	T_{pow}	$T_{śr}$
Parametr									
Jednostka	[%]			[°C]			[°C]		
Wartość błędu	0,44	0,26	0,34	0,08	0,04	0,06	0,74	0,51	0,62

Bazując na danych zamieszczonych na rysunku 47 wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz oporu cieplnego odwiertu z zastosowaniem modelu ILS. Wyniki tych obliczeń, dla okresu od 2,5 do 61 h przedstawiono w tabeli 42. Wartość przewodności cieplnej gruntu wyznaczona na podstawie wyników symulacji numerycznej wynosi $2,37 \text{ W}/(\text{mK})$ i jest o 0,9 % większa od wyznaczonej na podstawie pomiarów, wynoszącej $2,35 \text{ W}/(\text{mK})$. Wyznaczony na podstawie symulacji numerycznej opór cieplny odwiertu wynosi $0,0977 (\text{mK})/\text{W}$ i jest większy o 1,0 % od uzyskanego na podstawie pomiarów.



Rysunek 47 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 2 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 61 h: wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej (T_{sr_num})

Tabela 42 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej dla czasu testu 2,5 – 61 h (TEST 2, wariant 1)

Parametr	TEST 2	MODEL
λ_{eff} – efektywna przewodność cieplna gruntu, $W/(mK)$	2,35	2,37
R_{odw} – opór cieplny odwiertu, mK/W	0,0967	0,0977

Podsumowując, wprowadzenie do solwera obliczeniowego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu pozwoliło na uzyskanie bardzo dobrej zgodności wyników symulacji z pomiarami dla warunków TESTU 2 (wariant 1). Ponadto, efektywna przewodność cieplna gruntu wyznaczona za pomocą modelu nieskończonego źródła liniowego (ILS) na podstawie numerycznego testu TRT przyjęła niemal tę samą wartość, jak w przypadku analizy wykonanej na podstawie danych pomiarowych. W tym przypadku uzyskano również bardzo dobrą zgodność w zakresie wyznaczonej wartości oporu cieplnego odwiertu.

3.4. Podsumowanie

W rozdziale 3 opisano prace dotyczące konstruowania, kalibracji i walidacji modelu numerycznego TRT. Opisano problemy pojawiające się w trakcie opracowywania modelu numerycznego TRT oraz analizy wyników takiego testu metodą ILS. Na podstawie uzyskanych wyników przedstawiono praktyczne sugestie dotyczące modelowania numerycznego testów odpowiedzi termicznej gruntu. Wykazano, że model turbulencji nie wpływa znacząco na wyniki symulacji. Wykazano, że numeryczna symulacja TRT wymaga zastosowania krótkiego kroku czasowego (w przeprowadzonych symulacjach był to krok minutowy). Wykazano, że krok godzinowy, nawet przy dużej liczbie iteracji, nie pozwala na uzyskanie dobrej jakości danych, a zwiększanie ilości iteracji powoduje, że czas obliczeń jest zbliżony do czasu symulacji w kroku minutowym. Stąd, wszystkie symulacje w dalszej części pracy przeprowadzono z założeniem

minutowego kroku czasowego oraz relatywnie uniwersalnego modelu turbulencji SST k- ω . Porównanie wyników estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS na podstawie danych pomiarowych oraz na podstawie wstępnych wyników symulacji pozwoliło stwierdzić znaczące rozbieżności między nimi. W wyniku przeprowadzenia procesu kalibracji modelu numerycznego poprzez zmianę danych wejściowych – wartości współczynników przewodzenia wypełnienia odwiertu, u-rury i gruntu – wykluczono pierwsze dwa parametry jako główne przyczyny powstania tych niedokładności. Stwierdzono, że wartości przewodności cieplnej u-rury oraz wypełnienia odwiertu mają silny wpływ na wartości temperatury płynu w GWC w pierwszej fazie testu i są odpowiedzialne głównie za wartość oporu cieplnego odwiertu. Natomiast, przyczyną rozbieżności w estymowanych wartościach przewodności cieplnej gruntu była wprowadzona do modelu numerycznego wartość tego współczynnika. Stwierdzono, że wyznaczana z zastosowaniem metody ILS przewodność cieplna gruntu jest znacząco zawyżona względem wartości rzeczywistej. Jednocześnie, biorąc pod uwagę średnie błędy względne wartości temperatur średnich płynu w GWC jakimi charakteryzują się wyniki symulacji (po zakończonej kalibracji danych wejściowych), wynoszące dla TESTU 1: 0,67%, a dla TESTU 2: 0,34% stwierdzono, że opracowany model numeryczny z bardzo dobrą dokładnością odzwierciedlił rzeczywiste testy odpowiedzi termicznej gruntu. Dlatego, w dalszej części pracy model ten stał się podstawą do przeprowadzenia analizy wrażliwości TRT (a dokładnie wyników interpretacji danych z tych testów przeprowadzonej metodą ILS) na właściwości gruntowego wymiennika ciepła i parametry samego testu.

4. Numeryczna analiza wrażliwości TRT

4.1. Analiza 1 – przedział czasu <2,5 h – 72 h>

4.1.1. Zakres symulacji i analiz

Pomimo trwających od wielu lat intensywnych badań nad testami odpowiedzi termicznej gruntu (TRT), konieczne są dalsze prace dla poszerzenia zakresu ich stosowania i zwiększenia ich niezawodności. W najnowszych publikacjach naukowych [135] przedstawiony jest szeroki zakres badań, które są niezbędne dla rozwoju tej metody oceny parametrów gruntu. Wśród nich wymieniane są konieczność prac nad modelem, który będzie dokładniej opisywał wymianę ciepła w gruntowym wymienniku ciepła (GWC) i będzie łatwy do zastosowania, a także prac nad ogólną metodą oceny niepewności wyników identyfikacji parametrów gruntu. Jednym z głównych obszarów badań dotyczących dokładności estymacji współczynnika przewodzenia ciepła z wykorzystaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (ILS) jest przepływ wody gruntowej oraz adwekcja [149]. W tej pracy jednak skupiono się na innym obszarze, tj.: na analizach mających na celu wskazanie skali błędów jaką może powodować interpretacja wyników TRT metodą ILS występujących, jak wskazuje część publikacji [145], nawet przy braku przepływu wód gruntowych. Taka analiza wrażliwości wpływu właściwości GWC, jak i warunków prowadzenia TRT na jego wyniki jest niezbędna do opracowania lepszych, bardziej dokładnych procedur testowania oraz analizy danych i stanowi wkład w rozwój terenowych testów odpowiedzi termicznej gruntu, w tym oceny niepewności ich wyników.

W związku z powyższym, kolejnym etapem badań było przeprowadzenie symulacji numerycznych w celu pozyskania wysokiej jakości wyników TRT, przeprowadzonych przy zachowaniu całkowitej kontroli parametrów testowych. W ramach badań zaplanowano symulacje dla różnych wartości parametrów testu oraz cech badanego ośrodka; analizowane zmienne to: zadana moc TRT (Q), przepływ czynnika w wymienniku ciepła (\dot{V}), przewodność cieplna gruntu (λ_g), przewodność cieplna wypełnienia odwiertu (λ_b) oraz przewodność cieplna materiału u-rury (λ_r). Macierz zaplanowanych symulacji numerycznych zawiera tabela 43. Podano w niej również numer testu, w ramach którego przeprowadzono symulacje o wskazanych danych wejściowych. Pełen zakres zmian poszczególnych zmiennych scharakteryzowano poniżej.

- $Q = \{2,0; 6,0\}$ – moc grzałki elektrycznej zapewniająca niewielki jednostkowy strumień ciepła ($Q = 2 \text{ kW} \rightarrow q_j = 25,6 \text{ W/m}$) oraz rekomendowany, większy strumień jednostkowy ($Q = 6 \text{ kW} \rightarrow q_j = 76,9 \text{ W/m}$).
- $\dot{V} = \{0,5; 1,0\}$ – przepływ czynnika roboczego charakteryzujący się bardzo niską liczbą Reynoldsa ($0,5 \text{ m}^3/\text{h}$) oraz, z uwagi na parametry techniczne aparatury, przepływ najczęściej wykorzystywany w testach TRT ($1,0 \text{ m}^3/\text{h}$).
- $\lambda_g = \{1,5; 2,0; 3,5\}$ – wartość przewodności cieplnej gruntu charakteryzującego się niewielkim nasyceniem wodą ($1,5 \text{ W/(mK)}$) oraz gruntu nasyconego lub litej skały o wysokiej przewodności ($3,5 \text{ W/(mK)}$).

- $\lambda_b = \{1,0; 1,5; 2,0; 2,5\}$ - wartość przewodności cieplnej bentonitu spełniającego podstawowe wymagania ($1,0 \text{ W}/(\text{mK})$) oraz bentonitu ulepszanego, o wysokiej przewodności cieplnej ($2,5 \text{ W}/(\text{mK})$).
- $\lambda_r = \{0,33; 0,5\}$ - wartość przewodności cieplnej u-rury wykonanej z polietylenu niskiej gęstości ($0,33 \text{ W}/(\text{mK})$) oraz wysokiej gęstości ($0,5 \text{ W}/(\text{mK})$).

W pierwszej kolejności wykonano symulacje dla współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynoszącego $1,5 \text{ W}/(\text{mK})$ i $3,5 \text{ W}/(\text{mK})$ oraz dla współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu wynoszącego $1,5 \text{ W}/(\text{mK})$ i $2,5 \text{ W}/(\text{mK})$. Dla tych danych przeprowadzono pełne serie symulacji, uwzględniające zmianę zarówno mocy, jak i przepływu. Wyniki tych symulacji numerycznych poddano analizie metodą ILS, wyznaczając wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła (λ_{ILS}). Dokonano oceny wpływu poszczególnych zmiennych na dokładność estymacji λ_{ILS} . Następnie, macierz symulacji uzupełniono o testy mające na celu zbadanie szerszego zakresu zmian danych wejściowych. Przy doborze nowych warunków testów uwzględniono wnioski z pierwszej części analiz, eliminując konfiguracje zmiennych nie mające lub mające znikomy wpływ na wyniki TRT. W ostatnim etapie prac, macierz symulacji uzupełniono o dodatkowe testy, uwzględniające zmianę parametrów u-rury.

Tabela 43 Macierz symulacji numerycznych

Q [kW]	λ_g [W/(mK)]	1,5				2,0				3,5				
		λ_b [W/(mK)]	1,0	1,5	2,0	2,5	1,0	1,5	2,0	2,5	1,0	1,5	2,0	2,5
2	0,5		36	52	37			56				40		41
	1	60	44		45	62		58		64	48	54	49	
6	0,5		38	53	39			57				42		43
	1	61	46		47*	63		59		65*	50	55	51*	

* Przeprowadzono dodatkowe testy (69, 70 i 71) dla współczynnika przewodzenia ciepła u-rury $\lambda_r = 0,33 \text{ W}/(\text{mK})$.

W ocenie wrażliwości wyników estymacji efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS}) wykorzystano następujące kryteria: błąd procentowy, błąd względny i średni błąd względny, obliczane na podstawie opisanych poniżej zależności (34-36).

Błąd procentowy (ang. *Percentage error - PE*):

$$PE = \left(\frac{\lambda_{ILS} - \lambda_g}{\lambda_g} \right) \quad (33)$$

Błąd względny (ang. *Absolute percentage error - APE*):

$$APE = \left| \frac{\lambda_{ILS} - \lambda_g}{\lambda_g} \right| \quad (34)$$

Średni błąd względny (ang. *Mean absolute percentage error - MAPE*):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\lambda_{ILS} - \lambda_g}{\lambda_g} \right| \quad (35)$$

4.1.2. Wyniki symulacji analiz

Przeprowadzono 33 symulacje numeryczne (oznaczone jako TEST 36 - TEST 65 oraz TEST 69-TEST 71), dla różnych właściwości gruntowego wymiennika ciepła (przewodności cieplnej gruntu, bentonitu oraz u-rury) oraz warunków brzegowych na powierzchni wlotowej (prędkości czynnika oraz mocy grzewczej). Warunki brzegowe na powierzchniach A-D modelu (temperatura, symetria oraz geotermalny strumień ciepła na powierzchniach domen obliczeniowych) pozostały niezmienione w stosunku do symulacji opisanych w rozdziale 3. Obliczenia przeprowadzono dla kroku czasowego wynoszącego 1 minutę ($\Delta t = 60 s$) i 4320 kroków obliczeniowych, odpowiadających 72 h trwania każdego z testów. Wszystkie testy przeprowadzono z założeniem modelu turbulencji SST k- ω . Dla każdej z symulacji przeprowadzono pełną procedurę obliczeniową – modyfikowano kod UDF, skompilowano go oraz implementowano do solvera. Każdą z symulacji rozpoczynały obliczenia stanu ustalonego gruntu. Wyniki symulacji uzyskano w formie raportu z solvera obliczeniowego Ansys Fluent. Raportowaniu podlegały średnie temperatury płynu na powierzchni wlotowej i wylotowej z wymiennika w każdym kroku czasowym.

Następnie, wynik każdej z symulacji numerycznych poddano analizie metodą ILS, wyznaczono wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła (λ_{ILS}) oraz oporu odwiertu (R_{odw}) dla przedziału czasu wynoszącego od 2,5 h do 72 h. W ocenie wyników analiz posłużono się dwoma bezwymiarowymi wskaźnikami (λ_g/λ_b i λ_{ILS}/λ_g), które pozwoliły na usystematyzowanie wpływu właściwości GWC na niedokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS. Zestawienie danych dla poszczególnych symulacji numerycznych oraz wyników estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS (λ_{ILS}) i oporu odwiertu (R_{odw}) wraz z dodatkowymi wyliczeniami dla poszczególnych testów przedstawiono w tabeli 44.

Tabela 44 Główne dane wejściowe do symulacji i wyniki analizy danych z zastosowaniem modelu ILS

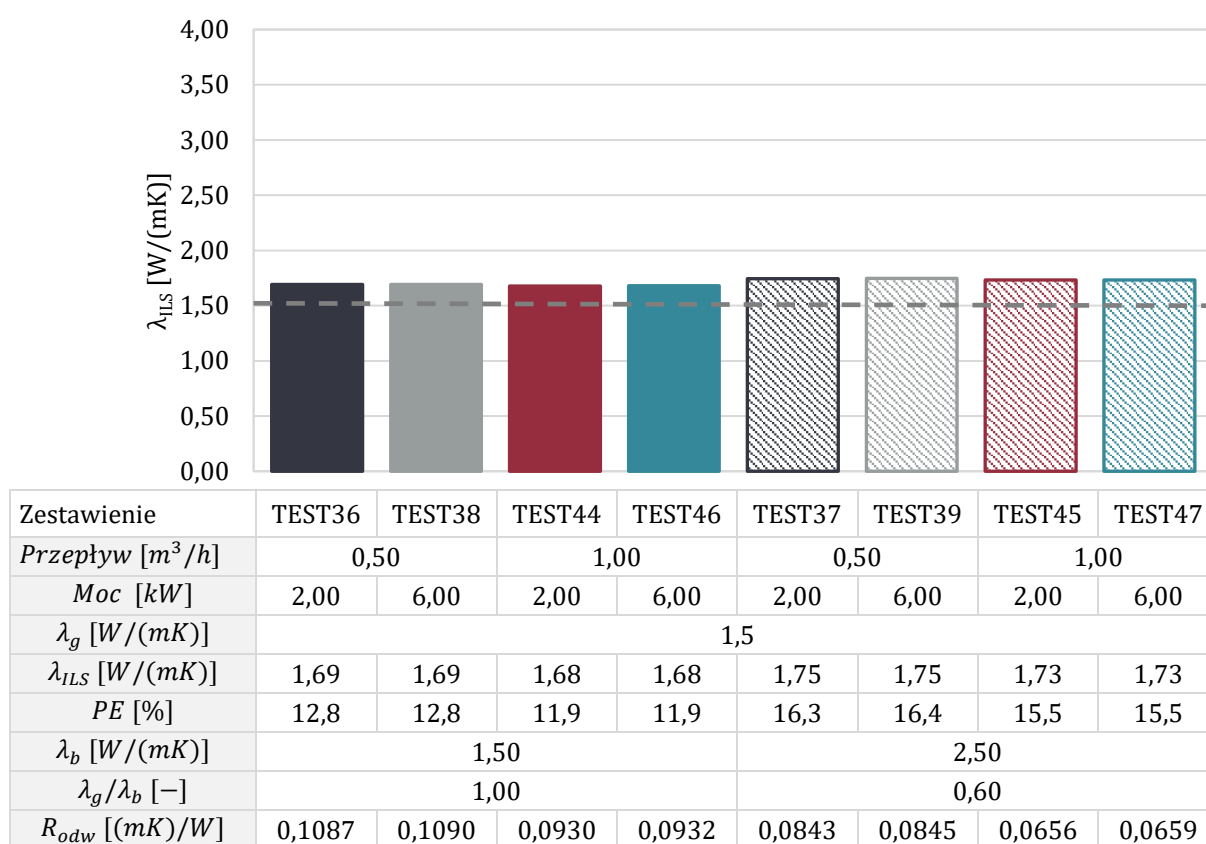
Lp.	\dot{V}	Q	λ_g	λ_{ILS}	λ_{ILS}/λ_g	λ_b	λ_g/λ_b	R_{odw}
	[m ³ /h]	[kW]	[W/(mK)]	[W/(mK)]	-	[W/(mK)]	-	[(mK)/W]
TEST36	0,50	2,00	1,50	1,69	1,13	1,50	1,00	0,109
TEST37	0,50	2,00	1,50	1,75	1,16	2,50	0,60	0,084
TEST38	0,50	6,00	1,50	1,69	1,13	1,50	1,00	0,109
TEST39	0,50	6,00	1,50	1,75	1,16	2,50	0,60	0,085
TEST40	0,50	2,00	3,50	3,57	1,02	1,50	2,33	0,123
TEST41	0,50	2,00	3,50	3,71	1,06	2,50	1,40	0,097
TEST42	0,50	6,00	3,50	3,57	1,02	1,50	2,33	0,123
TEST43	0,50	6,00	3,50	3,71	1,06	2,50	1,40	0,098
TEST44	1,00	2,00	1,50	1,68	1,12	1,50	1,00	0,093
TEST45	1,00	2,00	1,50	1,73	1,16	2,50	0,60	0,066
TEST46	1,00	6,00	1,50	1,68	1,12	1,50	1,00	0,093
TEST47	1,00	6,00	1,50	1,73	1,16	2,50	0,60	0,066
TEST48	1,00	2,00	3,50	3,55	1,01	1,50	2,33	0,107
TEST49	1,00	2,00	3,50	3,69	1,05	2,50	1,40	0,078
TEST50	1,00	6,00	3,50	3,55	1,01	1,50	2,33	0,107
TEST51	1,00	6,00	3,50	3,69	1,05	2,50	1,40	0,078
TEST52	0,50	2,00	1,50	1,73	1,15	2,00	0,75	0,093
TEST53	0,50	6,00	1,50	1,73	1,15	2,00	0,75	0,094
TEST54	1,00	2,00	3,50	3,64	1,04	2,00	1,75	0,089
TEST55	1,00	6,00	3,50	3,64	1,04	2,00	1,75	0,089
TEST56	0,50	2,00	2,00	2,22	1,11	2,00	1,00	0,098
TEST57	0,50	6,00	2,00	2,22	1,11	2,00	1,00	0,098
TEST58	1,00	2,00	2,00	2,20	1,10	2,00	1,00	0,080
TEST59	1,00	6,00	2,00	2,20	1,10	2,00	1,00	0,081
TEST60	1,00	2,00	1,50	1,61	1,07	1,00	1,50	0,126
TEST61	1,00	6,00	1,50	1,61	1,07	1,00	1,50	0,127
TEST62	1,00	2,00	2,00	2,05	1,03	1,00	2,00	0,131
TEST63	1,00	6,00	2,00	2,05	1,03	1,00	2,00	0,132
TEST64	1,00	2,00	3,50	3,35	0,96	1,00	3,50	0,141
TEST65	1,00	6,00	3,50	3,35	0,96	1,00	3,50	0,142
TEST69*	1,00	6,00	1,50	1,72	1,15	2,50	0,60	0,083
TEST70*	1,00	6,00	3,50	3,66	1,05	2,50	1,40	0,095
TEST71*	1,00	6,00	3,50	3,30	0,94	1,00	3,50	0,159

* Testy dla współczynnika przewodzenia ciepła u-rury wynoszącego $\lambda_r = 0,33 \text{ W}/(\text{mK})$.

4.1.3. Dyskusja wyników

W pierwszej części analizy wrażliwości TRT badano wpływ zadanej w trakcie testu mocy grzewczej oraz przepływu czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła na wartość efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS}). Prezentowane w tabelach 45-46 wyniki analizy danych z wybranych testów zestawiono dla dwóch wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu: $1,5 W/(mK)$ i $3,5 W/(mK)$. W każdej kategorii testów zmianie podlegały: przepływ czynnika ($0,5$ oraz $1,0 m^3/h$), moc grzałki elektrycznej ($2,0$ oraz $6,0 kW$) oraz współczynnik przewodzenia ciepła zaprawy bentonitowej ($1,5 W/(mK)$ oraz $2,5 W/(mK)$). Szarą, przerywaną linią na wykresach zaznaczono poziom wartości współczynnika przewodzenia ciepła (λ_g) wprowadzonego do modelu numerycznego jako właściwość termiczną gruntu.

Tabela 45 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów z zadaniem współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu równym $\lambda_g = 1,5 W/(mK)$



Wyniki analiz, prezentowane w tabeli 45, pokazują, że moc cieplna dostarczana do odwiertu w trakcie testu odpowiedzi termicznej gruntu nie ma wpływu na wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła. Rekomendowane w literaturze, relatywnie wysokie wartości jednostkowego strumienia ciepła mogą więc wynikać z potrzeby minimalizacji zakłóceń wpływających na parametry testu, takich jak: straty ciepła, wahania napięcia w sieci energetycznej czy warunki atmosferyczne. Należy mieć na uwadze, że niniejsze analizy uwzględniają tylko wartość mocy zadanej i nie obejmują wpływu zakłóceń i wahań tej mocy na wyniki obliczeń.

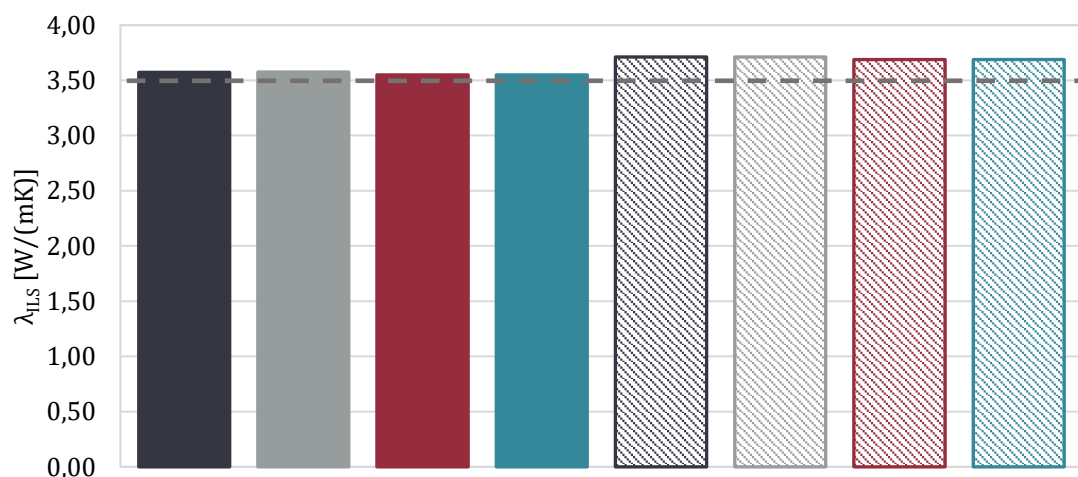
Różnice w wartości estymowanej przewodności cieplnej gruntu dla tożsamyh testów z różną wartością przepływu płynu są większe niż w przypadku zmiany mocy grzewczej, jednak nie są

znaczące. Zmiana przepływu czynnika dla tożsamyh testów spowodowała różnicę w błędzie estymacji wynoszącą około 0,9 p.p.

Największe różnice między estymowaną wartością współczynnika przewodzenia ciepła a zadaną do symulacji zaobserwowano w przypadku zmiany wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu. Wraz z rosnącą wartością λ_b wzrasta niedokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, z około 12,5% dla $\lambda_b = 1,5 W/(mK)$ do 16,4% dla $\lambda_b = 2,5 W/(mK)$.

W przypadku analiz, w których przyjęta wartość przewodności cieplnej gruntu była większa i wynosiła $3,5 W/(mK)$, zaobserwowano dużo większą dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS (tabela 46). Tak jak w przypadku wcześniejszym, analiza ta nie wykazała istotnego wpływu mocy dostarczanej do odwiertu oraz przepływu płynu na wyniki estymacji. W tym zestawie testów, zmiana mocy nie wpływa na wyniki, a zmiana przepływu czynnika powoduje różnicę w błędzie estymacji współczynnika przewodzenia ciepła wynoszącą około 0,6 p.p. Bardzo dobrą dokładność wyników estymacji tego współczynnika uzyskano się dla współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu wynoszącego $\lambda_b = 1,5 W/(mK)$. Błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS dla tych parametrów wymiennika wynosi 1,4 - 2,1%. Dla współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu wynoszącego $\lambda_b = 2,5 W/(mK)$ błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS wynosi 5,4 - 6,1 %.

Tabela 46 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów z zadanym współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu równym $\lambda_g = 3,5 W/(mK)$

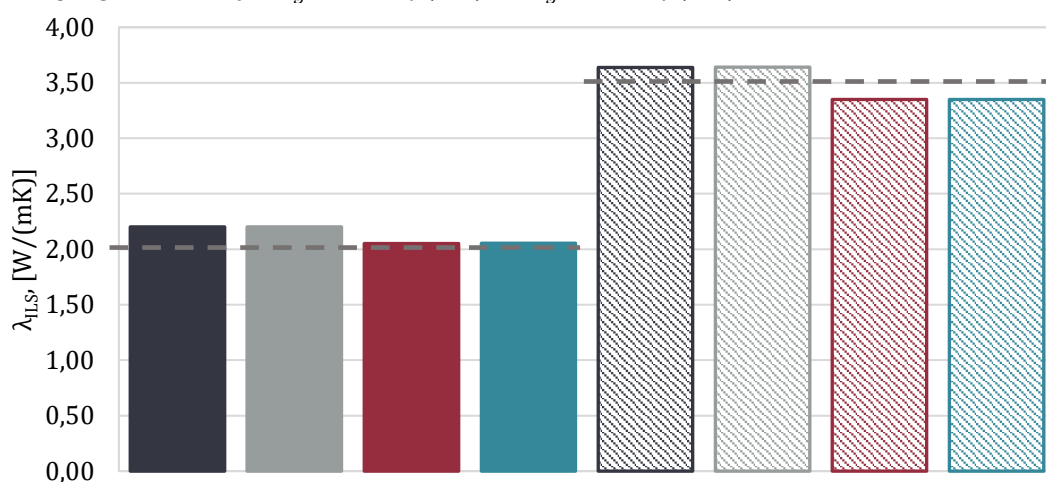


Zestawienie	TEST40	TEST42	TEST48	TEST50	TEST41	TEST43	TEST49	TEST51
Przepływ [m^3/h]	0,50		1,00		0,50		1,00	
Moc [kW]	2,00	6,00	2,00	6,00	2,00	6,00	2,00	6,00
λ_g [$W/(mK)$]	3,50							
λ_{ILS} [$W/(mK)$]	3,57	3,57	3,55	3,55	3,71	3,71	3,69	3,69
PE [%]	2,1	2,1	1,4	1,4	6,0	6,1	5,4	5,4
λ_b [$W/(mK)$]	1,50				2,50			
λ_g/λ_b [-]	2,33				1,40			
R_{odw} [$(mK)/W$]	0,1229	0,1231	0,1066	0,1069	0,0972	0,0978	0,0781	0,0783

Dodatkowo, zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji i analiz dla wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynoszącego $2,0 W/(mK)$ oraz dla gruntu o $\lambda_g = 3,5 W/(mK)$, lecz w tym przypadku dla innych niż poprzednio wartości współczynnika

przewodzenia ciepła materiału wypełnienia. Wyniki analizy danych z tych testów przedstawiono w tabeli 47. W przypadku analiz, dla których wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wynosiła $\lambda_g = 2,0 \text{ W/(mK)}$ dla bentonitu o $\lambda_b = 1,0 \text{ W/(mK)}$ uzyskano bardzo dobrą dokładność estymacji, jej błąd nie przekraczał 2,7%, natomiast dla bentonitu o wyższej wartości współczynnika przewodzenia ciepła ($\lambda_b = 2,0 \text{ W/(mK)}$), błąd ten przekraczał 10%. Dla gruntu o współczynniku przewodzenia ciepła równym $\lambda_g = 3,5 \text{ W/(mK)}$ zmiana wartości błędu estymacji wynosiła od 4,0 % do -4,3 %, w zależności od przewodności cieplnej materiału wypełnienia. Podobnie jak poprzednie, analizy te wykazały, że moc grzewcza nie wpływa na wyniki estymacji efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.

Tabela 47 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów uzupełniających z zadaniem współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu równym $\lambda_g = 2,0 \text{ W/(mK)}$ lub $\lambda_g = 3,5 \text{ W/(mK)}$

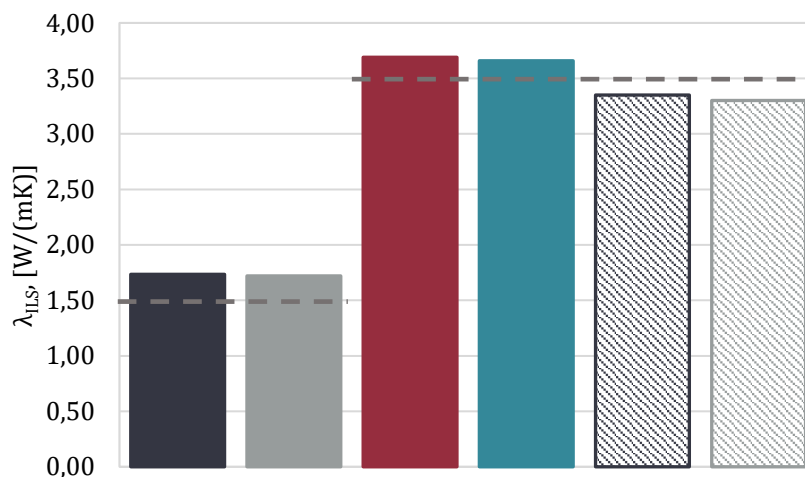


Zestawienie	TEST58	TEST59	TEST62	TEST63	TEST54	TEST55	TEST64	TEST65
Przepływ [m^3/h]	1,00							
Moc [kW]	2,00	6,00	2,00	6,00	2,00	6,00	2,00	6,00
λ_g [W/(mK)]	2,00				3,50			
λ_{ILS} [W/(mK)]	2,20	2,20	2,05	2,05	3,64	3,64	3,35	3,35
PE [%]	10,1	10,1	2,6	2,7	4,0	4,0	4,3	4,3
λ_b [W/(mK)]	2,0		1,0		2,0		1,0	
λ_g/λ_b [-]	1,00		2,00		1,75		3,50	
R_{odw} [$(\text{mK})/\text{W}$]	0,0804	0,0807	0,1315	0,1317	0,0889	0,0891	0,1414	0,1416

Dodatkowo, zdecydowano się na sprawdzenie, czy i w jaki sposób współczynnik przewodzenia ciepła u-rury wpływa na wyniki analiz testów TRT. Jako alternatywę dla dotychczasowej wartości (wynoszącej $\lambda_r = 0,5 \text{ W/(mK)}$) przyjęto wartości współczynnika przewodzenia ciepła jak dla polietylenu niskiej gęstości wg PN-EN ISO 12524:2003, PN-EN ISO 6946:1999 i PN-91/B-02020 równą $\lambda_r = 0,33 \text{ W/(mK)}$ [150][151][152]. Wyniki analizy danych dla odpowiadających sobie testów o różnych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła u-rury zestawiono w tabeli 48. Zmniejszenie współczynnika przewodzenia ciepła u-rury wpłynęło przede wszystkim na zwiększenie oporu cieplnego odwiertu. W zależności od wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu i bentonitu, zmiana parametrów u-rury spowodowała wzrost oporu o odpowiednio 20 %, 18 % i 11 %. Wzrost ten wyznaczono w odniesieniu do testów przeprowadzonych dla takich samych parametrów. Współczynnik przewodzenia ciepła u-rury nieznacznie wpływa na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Dla analiz, w których wartość

współczynnika ciepła bentonitu wynosiła $\lambda_b = 2,5 [W/(mK)]$, zmiana współczynnika przewodzenia ciepła u-rury z $0,50 W/(mK)$ na $0,33 W/(mK)$ spowodowała zmniejszenie błędu estymacji o 0,8 p.p. Dla analiz, w których wartość współczynnika ciepła bentonitu wynosiła $\lambda_b = 1,0 [W/(mK)]$, zmiana ta spowodowała zwiększenie błędu estymacji o 1,4 p.p.

Tabela 48 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów uzupełniających z zadaniem współczynnikiem przewodzenia ciepła u-rury równym $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$ lub $\lambda_g = 0,33 W/(mK)$



Zestawienie	TEST47	TEST69	TEST51	TEST70	TEST65	TEST71
Przepływ [m^3/h]	1,00					
Moc [kW]	6,00					
λ_g [W/(mK)]	1,50			3,50		
λ_{ILS} [W/(mK)]	1,73	1,72	3,69	3,66	3,35	3,30
PE [%]	15,5	14,7	5,4	4,6	-4,3	-5,7
λ_b [W/(mK)]	2,50			1,00		
λ_r [W/(mK)]	0,50	0,33	0,50	0,33	0,50	0,33
λ_g/λ_b [-]	0,60		0,60		3,50	
R_{odw} [(mK)/W]	0,0659	0,0826	0,0783	0,0954	0,1416	0,1592

4.1.1. Podsumowanie

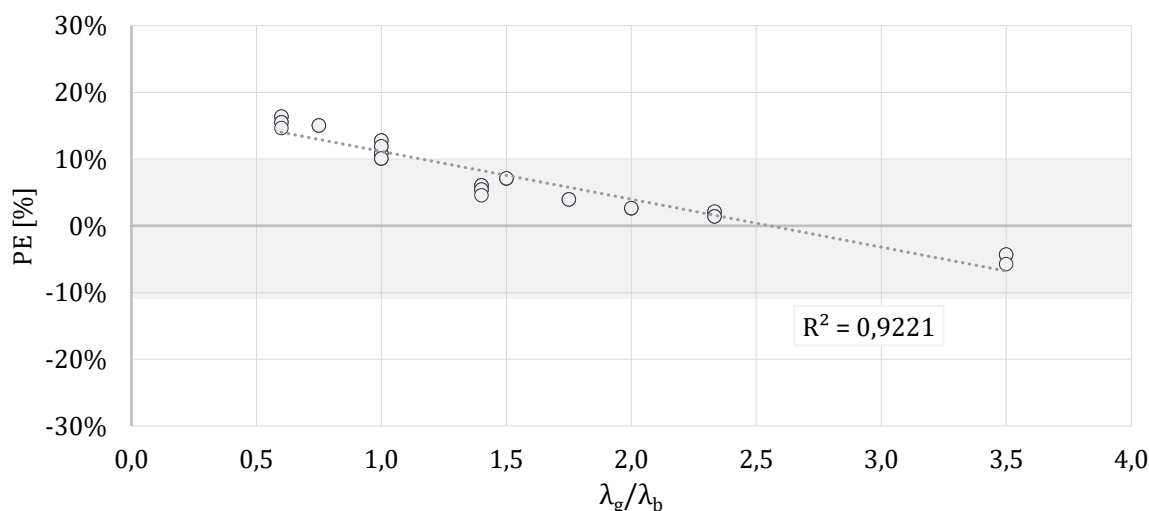
Podsumowując (tabela 48), można stwierdzić, że moc grzewcza w trakcie testu (Q) nie miała wpływu na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, średni błąd względny tej estymacji dla odpowiadających sobie testów o mocy 6 kW i 2 kW różni się zaledwie o 0,1 p.p. Zmiana przepływu czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła (\dot{V}) miała niewielki wpływ na wartość tego błędu, różnica w wartości średniego błędu względnego tej estymacji dla odpowiadających sobie testów z przepływem $0,5 m^3/h$ i $1,0 m^3/h$ nie przekracza 1,0 p.p. Wpływ materiału u-rury nie ma większego wpływu na wartość względnego błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, średni błąd względny dla $\lambda_r = 0,33 W/(mK)$ wynosi 8,3%, a średni błąd względny dla odpowiadających im testów z $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$ wynosi 8,4%. Istotne znaczenie dla wartości analizowanego błędu ma natomiast wartość współczynnika przewodzenia ciepła samego gruntu. Średni błąd względny estymacji wartości poszukiwanego parametru dla $\lambda_g = 3,5 W/(mK)$ wynosi 3,7%, a średni błąd względny odpowiadających im testów z $\lambda_g = 1,5 W/(mK)$ wynosi 14,1%. Analizy wykazały również znaczący wpływ wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiału wypełnienia na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu; w tabeli 48 wykazano błąd 7,1% dla $\lambda_b = 1,5 W/(mK)$ i 10,8% dla

odpowiadających im testów dla $\lambda_b = 10,8 W/(mK)$. Co bardzo ważne, zestawiając te dwa najistotniejsze parametry (λ_g/λ_b), można zaobserwować jak zmienia się dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu w zależności od stosunku tych dwóch wartości względem siebie, co również pokazano w tabeli 48.

Tabela 49 Zestawienie średnich błędów procentowych estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS odpowiadających sobie testów dla różnych wartości analizowanych zmiennych

Zmienna	Q		V̇		λ _r		λ _g		λ _b		λ _g / λ _b			
	[kW]		[m ³ /h]		[W/(mK)]		[W/(mK)]		[W/(mK)]		-			
	2,0	6,0	0,50	1,00	0,33	0,50	1,50	3,50	1,50	2,50	0,60	1,00	1,40	2,33
16,0%														
12,0%														
8,0%														
4,0%														
0,0%														
MAPE [%]	9,2%	9,3%	9,6%	8,9%	8,3%	8,4%	14,1%	3,7%	7,1%	10,8%	15,9%	12,4%	5,7%	1,8%
l. analiz	10	10	10	10	3	3	8	8	9	9	4	4	4	4

Stwierdzono, że dla analizowanego przedziału czasu, wynoszącego od 2,5 h do 72 h, istnieje linowa zależność między właściwościami wymiennika ciepła (stosunkiem λ_g/λ_b) i dokładnością identyfikacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu. Zależność wartości błędu procentowego (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem ILS względem stosunku dwóch głównych zmiennych niezależnych (λ_g/λ_b) przedstawiono na rysunku 48. Najmniejsze błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu uzyskuje się dla wartości λ_g/λ_b mieszczących się w zakresie $\lambda_g/\lambda_b \in < 2,0 \div 3,0 >$. Dla konfiguracji wymienników ciepła mieszczących się w tym przedziale, błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła nie przekracza 5%. W przypadku układów, w których λ_g/λ_b przyjmuje wartości mniejsze od 1,0; błąd ten może przekraczać 10%. Będzie miało to szczególne znaczenie dla gruntów suchych, skalistych lub zapiaszczonych.



Rysunek 48 Zestawienie procentowego błędu estymacji (PE) w zależności od stosunku λ_g/λ_b dla wszystkich 33 symulacji numerycznych

4.2. Analiza 2 – różne przedziały czasu

4.2.1. Zakres symulacji i analiz

Analiza 1 (zamieszczona w poprzednim punkcie tego rozdziału pracy) dotyczyła przedziału czasu, z którego pobrano dane pomiarowe do obliczenia współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, wynoszącego od 2,5 h do 72 h. Rekomendowany w literaturze czas trwania testu odpowiedzi termicznej gruntu wynosi od 36 do 72 h. Zakłada się, że czas ten ma pozwolić na doprowadzenie układu do stanu ustalonego, minimalizację wpływu zakłóceń na wyniki testu oraz uzyskanie odpowiedniej dokładności estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Czas trwania testu odpowiedzi termicznej jest jednak kluczowy dla kosztów jego wykonania, dlatego też badacze dążą do określenia minimalnego czasu trwania pomiarów, zapewniającego akceptowalną dokładność wyników estymacji współczynnika przewodzenia ciepła. W literaturze pojawiają się sugestie, że możliwe jest skrócenie testu do nawet 20 czy 12 godzin [19]. Ponadto, możliwe są sytuacje, że w trakcie TRT pojawią się zakłócenia powodujące konieczność eliminacji części danych pomiarowych z dalszych analiz. Analiza 2 miała na celu ocenę błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z zastosowaniem modelu ILS (λ_{ILS}) w zależności od czasu trwania testu, a dokładniej – od przedziału czasu testu, z którego dane poddawane są analizie. Analizę 2 wykonano na podstawie tych samych symulacji numerycznych TRT, które były podstawą analizy 1. Szczegółowe informacje o tych testach zawiera tabela 43 (punkt 4.1.1.). W ramach Analizy 2 wykonano trzy serie obliczeń (opisane poniżej). W każdej serii wyznaczono wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS dla wszystkich 33 testów opisanych w tabeli 44.

Pierwsza seria obliczeń w analizie 2 charakteryzowała się zawężaniem przedziału czasu, z którego pobierano dane do estymacji przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}), poprzez przesuwanie jego początku. Koniec przedziału czasu przyjmowany był jako stały i wynosił $t_k = 72 h$, natomiast zmianie ulegał jego początek w zakresie $t_p = \{2,5; 5; 10; 20; 30; 40; 50\} h$.

Druża seria obliczeń w analizie 2 charakteryzowała się zawężaniem przedziału czasu, z którego pobierano dane do estymacji przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}), poprzez przesuwanie jego końca. Początek przedziału czasu przyjmowanych był jako stały i wynosił $t_p = 2,5 h$, natomiast zmianie ulegał jego koniec w zakresie $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 72\} h$.

Trzecia seria obliczeń w analizie 2 charakteryzowała się zawężaniem przedziału czasu, z którego pobierano dane do estymacji przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}), poprzez przesuwanie jego końca. Początek przedziału czasu przyjmowany był jako stały i wynosił $t_p = 5 h$, natomiast zmianie ulegał jego koniec w zakresie $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 72\} h$.

4.2.2. Wyniki symulacji i analiz

Pierwsza seria obliczeń w analizie 2 przeprowadzona została na podstawie danych z 33 symulacji numerycznych opisanych w tabeli 43 (oznaczonych jako TEST 36 – TEST 71). Zestawienie głównych danych wejściowych dla kolejnych symulacji numerycznych oraz wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS (λ_{ILS}) dla poszczególnych analizowanych przedziałów czasu przedstawiono w tabeli 50.

Tabela 50 Wyniki pierwszej serii obliczeń – przedział czasu od $t_p = \{2,5;5;10;20;30;40;50\}$ h do $t_k = 72$ h

Przedział czasowy			Początek testu t_p [h]		2,5	5	10	20	30	40	50
			Koniec testu t_k [h]		72	72	72	72	72	72	72
nr testu	\dot{V}	Q	λ_b	λ_g	λ_{LS}						
	m^3/h	kW	$W/(mK)$	$W/(mK)$	$W/(mK)$						
TEST37	0,5	2,0	2,50	1,50	1,75	1,72	1,69	1,66	1,65	1,64	1,63
TEST52	0,5	2,0	2,00	1,50	1,73	1,7	1,68	1,65	1,64	1,63	1,62
TEST36	0,5	2,0	1,50	1,50	1,69	1,68	1,66	1,64	1,63	1,62	1,62
TEST56	0,5	2,0	2,00	2,00	2,22	2,2	2,18	2,16	2,15	2,14	2,13
TEST41	0,5	2,0	2,50	3,50	3,71	3,71	3,69	3,68	3,67	3,67	3,66
TEST40	0,5	2,0	1,50	3,50	3,57	3,61	3,63	3,63	3,64	3,64	3,63
TEST39	0,5	6,0	2,50	1,50	1,75	1,72	1,69	1,66	1,65	1,64	1,63
TEST53	0,5	6,0	2,00	1,50	1,73	1,7	1,68	1,65	1,64	1,63	1,62
TEST38	0,5	6,0	1,50	1,50	1,69	1,68	1,66	1,64	1,63	1,62	1,62
TEST57	0,5	6,0	2,00	2,00	2,22	2,2	2,18	2,16	2,15	2,14	2,13
TEST43	0,5	6,0	2,50	3,50	3,71	3,71	3,69	3,68	3,67	3,67	3,66
TEST42	0,5	6,0	1,50	3,50	3,57	3,61	3,63	3,63	3,64	3,63	3,63
TEST45	1,0	2,0	2,50	1,50	1,73	1,71	1,68	1,65	1,64	1,63	1,62
TEST44	1,0	2,0	1,50	1,50	1,68	1,67	1,65	1,63	1,62	1,61	1,61
TEST58	1,0	2,0	2,00	2,00	2,2	2,19	2,17	2,15	2,13	2,13	2,12
TEST49	1,0	2,0	2,50	3,50	3,69	3,69	3,68	3,66	3,66	3,65	3,65
TEST60	1,0	2,0	1,00	1,50	1,61	1,61	1,61	1,6	1,6	1,59	1,59
TEST54	1,0	2,0	2,00	3,50	3,64	3,65	3,65	3,65	3,64	3,64	3,63
TEST62	1,0	2,0	1,00	2,00	2,05	2,08	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
TEST48	1,0	2,0	1,50	3,50	3,55	3,59	3,61	3,62	3,62	3,62	3,62
TEST64	1,0	2,0	1,00	3,50	3,35	3,47	3,53	3,56	3,57	3,57	3,58
TEST47	1,0	6,0	2,50	1,50	1,73	1,71	1,68	1,65	1,64	1,63	1,62
TEST46	1,0	6,0	1,50	1,50	1,68	1,67	1,65	1,63	1,62	1,61	1,61
TEST59	1,0	6,0	2,00	2,00	2,2	2,19	2,17	2,15	2,13	2,13	2,12
TEST51	1,0	6,0	2,50	3,50	3,69	3,69	3,68	3,66	3,66	3,65	3,65
TEST61	1,0	6,0	1,00	1,50	1,61	1,62	1,61	1,6	1,6	1,59	1,59
TEST55	1,0	6,0	2,00	3,50	3,64	3,65	3,65	3,64	3,64	3,64	3,63
TEST63	1,0	6,0	1,00	2,00	2,05	2,08	2,09	2,1	2,09	2,09	2,09
TEST50	1,0	6,0	1,50	3,50	3,55	3,59	3,61	3,62	3,62	3,62	3,61
TEST65	1,0	6,0	1,00	3,50	3,35	3,47	3,53	3,56	3,57	3,57	3,58
TEST67	1,0	3,8	2,00	2,33	2,5	2,49	2,48	2,47	2,46	2,45	2,45
TEST69	1,0	6,0	2,50	1,50	1,72	1,7	1,67	1,65	1,63	1,62	1,62
TEST70	1,0	6,0	2,50	3,50	3,66	3,66	3,66	3,65	3,64	3,64	3,64
TEST71	1,0	6,0	1,00	3,50	3,3	3,44	3,51	3,54	3,56	3,56	3,57

Druga seria obliczeń w analizie 2 przeprowadzona została na podstawie danych z 33 symulacji numerycznych opisanych w tabeli 43 (oznaczonych jako TEST 36 – TEST 71). Zestawienie głównych danych wejściowych dla kolejnych symulacji numerycznych oraz wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS (λ_{ILS}) dla poszczególnych analizowanych przedziałów czasu przedstawiono w tabeli 51.

Tabela 51 Wyniki drugiej serii obliczeń – przedział czasu od $t_p = 2,5$ h do $t_k = \{10;20;30;40;50;60;72\}$ h

Przedział czasowy			Początek testu t_p [h]		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
			Koniec testu t_k [h]		10	20	30	40	50	60	72
nr testu	\dot{V}	Q	λ_b	λ_g	λ_{ILS}						
	m^3/h	kW	$W/(mK)$	$W/(mK)$	$W/(mK)$						
TEST37	0,5	2,0	2,50	1,50	1,96	1,87	1,83	1,8	1,78	1,76	1,75
TEST52	0,5	2,0	2,00	1,50	1,89	1,83	1,8	1,77	1,75	1,74	1,73
TEST36	0,5	2,0	1,50	1,50	1,77	1,76	1,74	1,72	1,71	1,7	1,69
TEST56	0,5	2,0	2,00	2,00	2,28	2,26	2,25	2,23	2,22	2,21	2,2
TEST41	0,5	2,0	2,50	3,50	3,77	3,74	3,74	3,73	3,72	3,72	3,71
TEST40	0,5	2,0	1,50	3,50	3,26	3,44	3,5	3,53	3,55	3,56	3,57
TEST39	0,5	6,0	2,50	1,50	1,96	1,88	1,83	1,8	1,78	1,76	1,75
TEST53	0,5	6,0	2,00	1,50	1,89	1,83	1,8	1,77	1,75	1,74	1,73
TEST38	0,5	6,0	1,50	1,50	1,78	1,76	1,74	1,72	1,71	1,7	1,69
TEST57	0,5	6,0	2,00	2,00	2,33	2,3	2,27	2,25	2,24	2,23	2,22
TEST43	0,5	6,0	2,50	3,50	3,73	3,74	3,74	3,73	3,72	3,72	3,71
TEST42	0,5	6,0	1,50	3,50	3,27	3,44	3,5	3,53	3,55	3,56	3,57
TEST45	1,0	2,0	2,50	1,50	1,93	1,86	1,81	1,79	1,76	1,75	1,73
TEST44	1,0	2,0	1,50	1,50	1,75	1,74	1,72	1,71	1,7	1,69	1,68
TEST58	1,0	2,0	2,00	2,00	2,29	2,27	2,25	2,23	2,22	2,21	2,2
TEST49	1,0	2,0	2,50	3,50	3,68	3,71	3,71	3,7	3,7	3,69	3,69
TEST60	1,0	2,0	1,00	1,50	1,52	1,58	1,6	1,6	1,61	1,61	1,61
TEST54	1,0	2,0	2,00	3,50	3,52	3,6	3,62	3,63	3,63	3,64	3,64
TEST62	1,0	2,0	1,00	2,00	1,82	1,94	1,99	2,02	2,03	2,04	2,05
TEST48	1,0	2,0	1,50	3,50	3,23	3,4	3,47	3,5	3,52	3,54	3,55
TEST64	1,0	2,0	1,00	3,50	2,63	2,98	3,13	3,22	3,27	3,31	3,35
TEST47	1,0	6,0	2,50	1,50	1,94	1,86	1,81	1,79	1,77	1,75	1,73
TEST46	1,0	6,0	1,50	1,50	1,76	1,74	1,72	1,71	1,7	1,69	1,68
TEST59	1,0	6,0	2,00	2,00	2,3	2,27	2,25	2,24	2,22	2,21	2,2
TEST51	1,0	6,0	2,50	3,50	3,69	3,71	3,71	3,7	3,7	3,69	3,69
TEST61	1,0	6,0	1,00	1,50	1,53	1,58	1,6	1,6	1,61	1,61	1,61
TEST55	1,0	6,0	2,00	3,50	3,52	3,6	3,62	3,63	3,64	3,64	3,64
TEST63	1,0	6,0	1,00	2,00	1,83	1,95	2,00	2,02	2,04	2,05	2,05
TEST50	1,0	6,0	1,50	3,50	3,23	3,41	3,47	3,5	3,52	3,54	3,55
TEST65	1,0	6,0	1,00	3,50	2,63	2,98	3,13	3,22	3,27	3,31	3,35
TEST67	1,0	3,8	2,00	2,33	2,5	2,52	2,52	2,51	2,51	2,5	2,5
TEST69	1,0	6,0	2,50	1,50	1,89	1,83	1,79	1,77	1,75	1,73	1,72
TEST70	1,0	6,0	2,50	3,50	3,58	3,64	3,65	3,66	3,66	3,66	3,66
TEST71	1,0	6,0	1,00	3,50	2,5	2,89	3,05	3,15	3,21	3,26	3,29

Trzecia seria obliczeń w analizie 2 przeprowadzona została na podstawie danych z 33 symulacji numerycznych opisanych w tabeli 43 (oznaczonych jako TEST 36 – TEST 71). Zestawienie głównych danych wejściowych dla kolejnych symulacji numerycznych oraz wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS (λ_{ILS}) dla poszczególnych analizowanych przedziałów czasu przedstawiono w tabeli 52.

Tabela 52 Wyniki trzeciej serii obliczeń – przedział czasu od $t_p = 5$ h do $t_k = \{10;20;30;40;50;60;72\}$ h

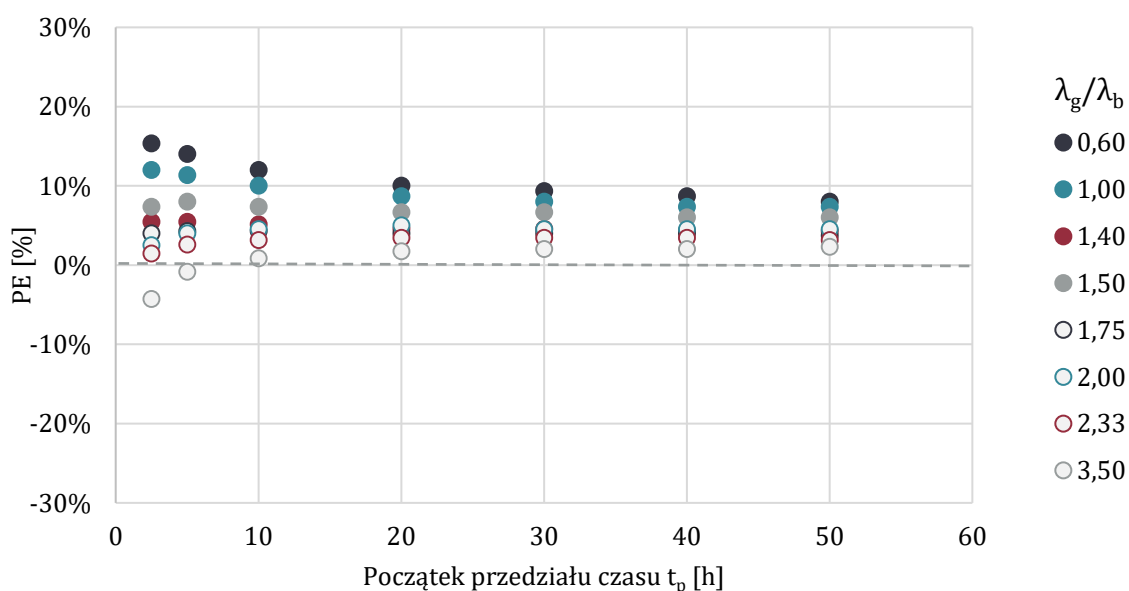
Skracanie od końca			Początek testu t_p [h]		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
			Koniec testu t_k [h]		10	20	30	40	50	60	72
nr testu	\dot{V}	Q	λ_b	λ_g	λ_{ILS}						
	m^3/h	kW	$W/(mK)$	$W/(mK)$	$W/(mK)$						
TEST37	0,5	2,0	2,50	1,50	1,90	1,83	1,79	1,76	1,74	1,73	1,72
TEST52	0,5	2,0	2,00	1,50	1,85	1,8	1,76	1,74	1,73	1,71	1,7
TEST36	0,5	2,0	1,50	1,50	1,78	1,75	1,72	1,71	1,7	1,69	1,68
TEST56	0,5	2,0	2,00	2,00	2,29	2,26	2,23	2,22	2,21	2,2	2,19
TEST41	0,5	2,0	2,50	3,50	3,77	3,75	3,74	3,73	3,72	3,71	3,71
TEST40	0,5	2,0	1,50	3,50	3,47	3,56	3,58	3,6	3,6	3,61	3,61
TEST39	0,5	6,0	2,50	1,50	1,9	1,83	1,79	1,76	1,75	1,73	1,72
TEST53	0,5	6,0	2,00	1,50	1,86	1,8	1,77	1,74	1,73	1,71	1,7
TEST38	0,5	6,0	1,50	1,50	1,78	1,75	1,72	1,71	1,7	1,69	1,68
TEST57	0,5	6,0	2,00	2,00	2,32	2,28	2,25	2,23	2,22	2,21	2,2
TEST43	0,5	6,0	2,50	3,50	3,77	3,75	3,74	3,73	3,72	3,71	3,71
TEST42	0,5	6,0	1,50	3,50	3,48	3,56	3,58	3,6	3,6	3,61	3,61
TEST45	1,0	2,0	2,50	1,50	1,88	1,81	1,77	1,75	1,73	1,72	1,71
TEST44	1,0	2,0	1,50	1,50	1,75	1,73	1,71	1,69	1,68	1,67	1,67
TEST58	1,0	2,0	2,00	2,00	2,29	2,26	2,23	2,22	2,21	2,2	2,19
TEST49	1,0	2,0	2,50	3,50	3,73	3,72	3,71	3,7	3,7	3,69	3,69
TEST60	1,0	2,0	1,00	1,50	1,59	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,61
TEST54	1,0	2,0	2,00	3,50	3,62	3,65	3,65	3,66	3,65	3,65	3,65
TEST62	1,0	2,0	1,00	2,00	1,96	2,03	2,06	2,07	2,08	2,08	2,08
TEST48	1,0	2,0	1,50	3,50	3,43	3,52	3,56	3,57	3,58	3,59	3,59
TEST64	1,0	2,0	1,00	3,50	3,02	3,25	3,34	3,39	3,42	3,45	3,47
TEST47	1,0	6,0	2,50	1,50	1,88	1,81	1,78	1,75	1,73	1,72	1,71
TEST46	1,0	6,0	1,50	1,50	1,76	1,73	1,71	1,69	1,68	1,68	1,67
TEST59	1,0	6,0	2,00	2,00	2,29	2,26	2,23	2,22	2,21	2,2	2,19
TEST51	1,0	6,0	2,50	3,50	3,73	3,72	3,71	3,71	3,7	3,69	3,69
TEST61	1,0	6,0	1,00	1,50	1,59	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
TEST55	1,0	6,0	2,00	3,50	3,62	3,65	3,66	3,66	3,66	3,65	3,65
TEST63	1,0	6,0	1,00	2,00	1,96	2,04	2,06	2,07	2,08	2,08	2,08
TEST50	1,0	6,0	1,50	3,50	3,43	3,53	3,56	3,57	3,58	3,59	3,59
TEST65	1,0	6,0	1,00	3,50	3,02	3,26	3,35	3,39	3,43	3,45	3,47
TEST67	1,0	3,8	2,00	2,33	2,54	2,53	2,52	2,51	2,51	2,5	2,49
TEST69	1,0	6,0	2,50	1,50	1,85	1,79	1,76	1,74	1,72	1,71	1,7
TEST70	1,0	6,0	2,50	3,50	3,66	3,68	3,68	3,67	3,67	3,67	3,66
TEST71	1,0	6,0	1,00	3,50	2,93	3,19	3,3	3,35	3,39	3,41	3,44

4.2.3. Dyskusja wyników

4.2.3.1. Przedział czasu od $t_p = \{2,5; 5; 10; 20; 30; 40; 50\} h$ do $t_k = 72 h$

Pierwsza seria obliczeń przeprowadzona została na danych pobieranych do analizy z przedziału czasu zawężanego poprzez zmianę jego początku przy zachowaniu stałego końca (wynoszącego $t_k = 72 h$). Dane prezentowane na rysunku 49 przedstawiają błąd procentowy (PE) wyznaczenia efektywnej przewodności cieplnej gruntu metodą ILS (λ_{ILS}) w zależności od początku przedziału czasu przyjętego w danej analizie (np. wartość 10 na osi x oznacza, że w analizie uwzględniono dane z okresu od 10 do 72 godziny testu). Wyniki te uporządkowano dodatkowo według poszczególnych stosunków rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i bentonitu λ_g/λ_b . Rysunek 49 zawiera wyniki analiz dla testów o mocy grzałki elektrycznej wynoszącej 6 kW, przepływie $1 m^3/h$ i współczynnika przewodzenia ciepła u-rury wynoszącym $0,5 W/(mK)$. Wykonano również analizy dla innych wartości tych danych wejściowych, nie ujęto ich jednak na rysunku 49 ze względu na relatywnie niewielki wpływ tych zmiennych na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Analizy te wykazały bowiem, że:

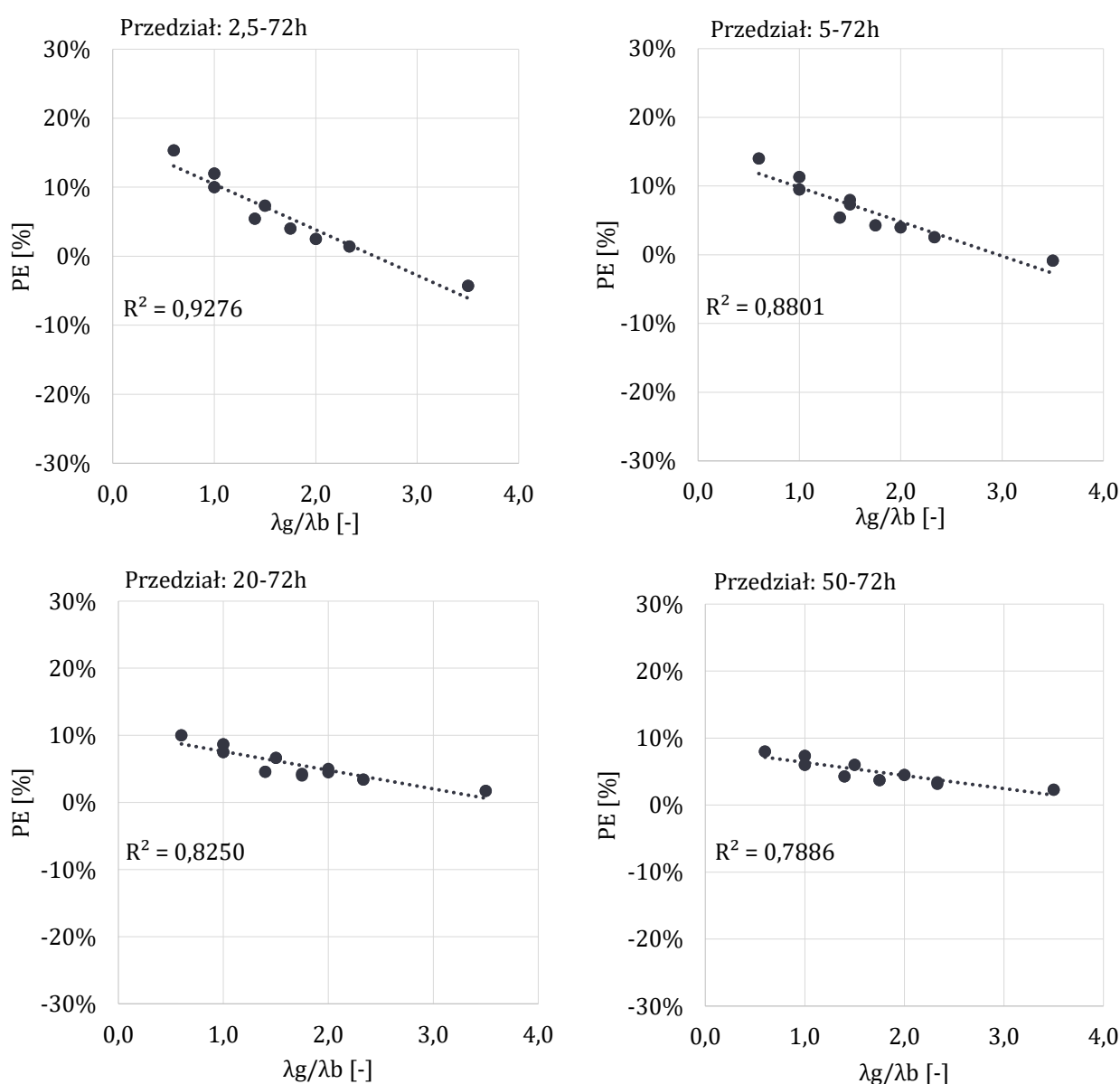
- dla tożsamyh testów z mocą grzewczą równą 2 kW lub 6 kW różnice w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu są nieznaczące, nie przekraczają 0,7 p.p.;
- dla tożsamyh testów, w których współczynnik przewodzenia ciepła u-rury wynosił $0,33 W/(mK)$ lub $0,5 W/(mK)$ różnica w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu wyniosła maksymalnie 3,3 p.p.
- dla tożsamyh testów, w których przepływ płynu w GWC wynosił $0,5 m^3/h$ lub $1,0 m^3/h$, różnica w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu wyniosła maksymalnie 1,3 p.p.



Rysunek 49 Procentowe błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła dla danych z przedziałów czasu o zmiennym początku (t_p) i stałym końcu $t_k = 72 h$; $Q = 6 kW$, $\dot{V} = 1 m^3/h$, $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$

W tej serii analiz zauważono znaczący wpływ czasu analizy i stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i bentonitu (λ_g/λ_b) na błąd procentowy (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS. Stwierdzono, że błąd procentowy wynoszący maksymalnie 10 % można uzyskać, niezależnie od właściwości GWC, dla przedziału

czasowego, którego początek to co najmniej 20 godzina testu. Natomiast, w przypadku wymienników, dla których $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,75; 2,33 >$, niezależnie od okresu testu przyjętego do analizy, błąd tej estymacji nie przekracza 5,0 %. Zasadniczo, mniejsze błędy uzyskiwane są dla większych rzeczywistych wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Największym błędem mogą charakteryzować się wyniki analiz przeprowadzonych dla przedziału czasu wynoszącego 2,5 - 72 h, w najbardziej niekorzystnych konfiguracjach GWC błąd ten może przekraczać 15 %. Wnioski z niniejszej analizy mogą być przydatne szczególnie w sytuacji, w której pierwsza część TRT przebiegała w niestabilnych warunkach. Wykazano, że dane z końcowego okresu pomiarów mogą pozwolić na dokładniejsze przybliżenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Warto zauważyć, że tak jak w przypadku analizy 1 uzyskiwana jest liniowa zależność błędu procentowego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu od stosunku λ_g/λ_b . Zależność ta jest różna dla różnych czasów analizy (rysunek 50).

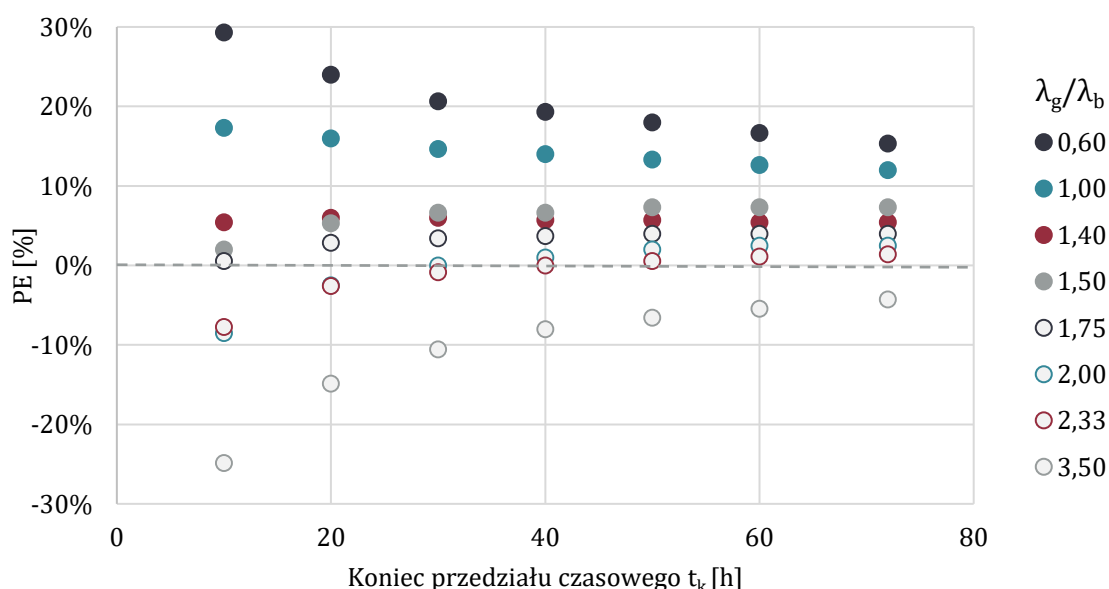


Rysunek 50 Zależność błędów procentowych (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS od stosunku λ_g/λ_b dla wybranych z serii 1 przedziałów czasowych; $Q = 6 \text{ kW}$, $\dot{V} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, $\lambda_r = 0,5 \text{ W}/(\text{mK})$

4.2.3.2. Przedział czasu od $t_p = 2,5 h$ do $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70\} h$

Druga seria obliczeń przeprowadzona została na danych pobieranych do analizy z przedziału czasu zawężanego od końca przy zachowaniu stałego początku (wynoszącego $t_p = 2,5 h$). Dane prezentowane na rysunku 51 przedstawiają błąd procentowy (PE) wyznaczenia efektywnej przewodności cieplnej gruntu metodą ILS (λ_{ILS}) w zależności od końca przedziału czasu przyjętego w danej analizie (np. wartość 10 na osi x oznacza, że w analizie uwzględniono dane z okresu od 2,5 do 10 godziny testu). Wyniki te uporządkowano dodatkowo według poszczególnych stosunków rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i bentonitu λ_g/λ_b . Rysunek 51 zawiera wyniki analiz dla testów o mocy grzałki elektrycznej wynoszącej 6 kW, przepływie $1 m^3/h$ i współczynnika przewodzenia ciepła u-rury wynoszącym $0,5 W/(mK)$. Wykonano również analizy dla innych wartości tych danych wejściowych, nie ujęto ich jednak na rysunku ze względu na relatywnie niewielki wpływ tych zmiennych na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Analizy te wykazały bowiem, że:

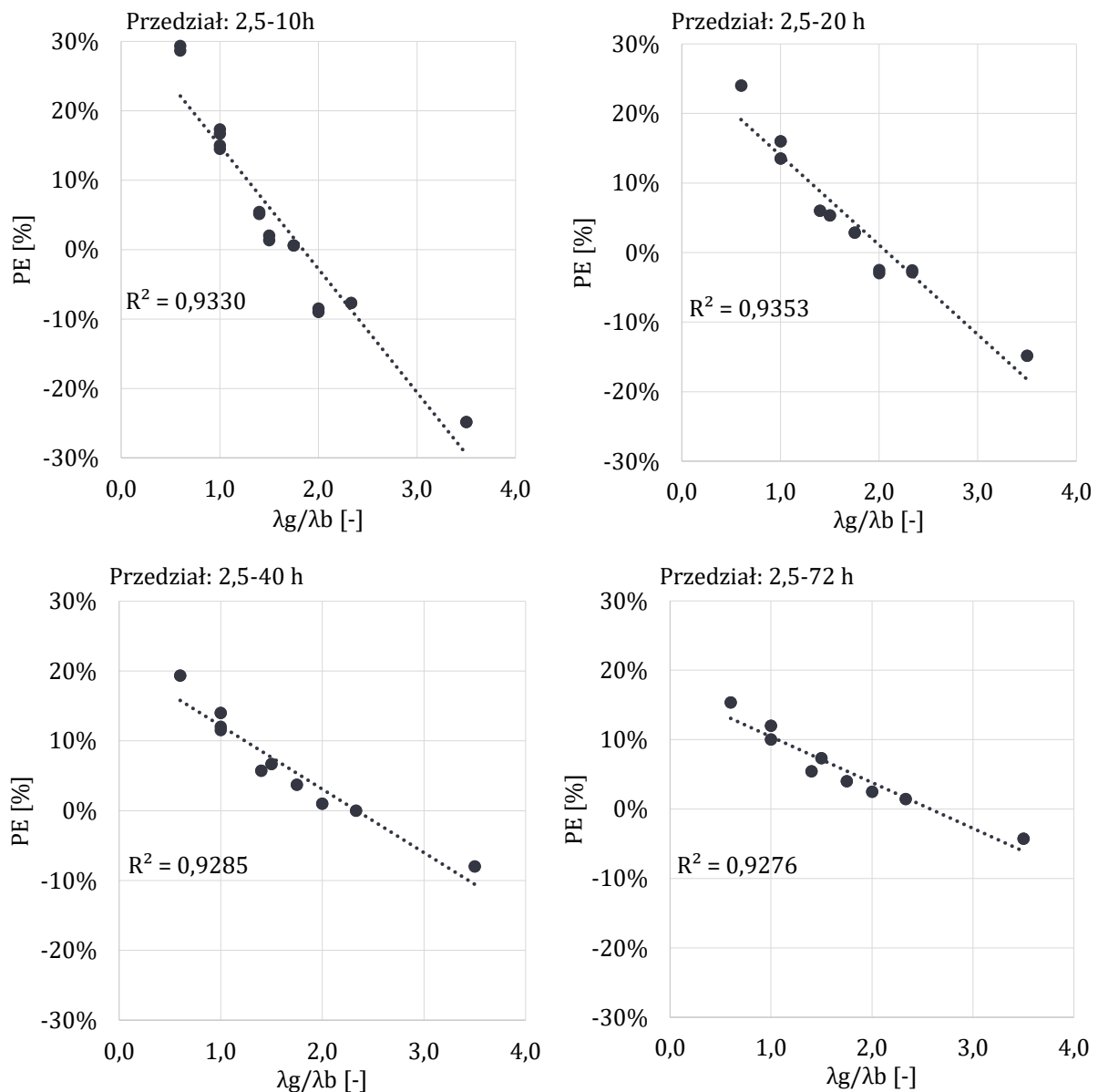
- moc cieplna dostarczana do odwiertu (jednostkowy strumień ciepła) nie ma wpływu na wyniki obliczeń, niezależnie od okresu testu, z którego wzięto dane do analizy;
- dla tożsamyh testów, w których współczynnik przewodzenia ciepła u-rury wynosił $0,33 W/(mK)$ lub $0,5 W/(mK)$ stwierdzono nieznaczny wpływ tej zmiennej na wyniki; dla najkrótszego testu (o przedziale czasu od 2,5 do 10 h) różnica w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu wynosiła 3,3 p.p., dla testów dłuższych niż 30 h różnica ta nie przekraczała 1,3 p.p.;
- dla tożsamyh testów, w których przepływ płynu w GWC wynosił $0,5 m^3/h$ lub $1,0 m^3/h$, różnica w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu wynosiła maksymalnie 1,3 p.p.



Rysunek 51 Procentowe błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła dla danych z przedziałów czasu o stałym początku $t_p = 2,5 h$ i zmiennym końcu (t_k); $Q = 6 kW$, $\dot{V} = 1 m^3/h$, $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$

W tej serii analiz stwierdzono, że skrócenie czasu trwania testu ma znaczący wpływ na błąd procentowy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS, a błąd ten jest dodatkowo silnie zależny od rzeczywistych właściwości termicznych gruntu i wypełnienia odwiertu. W przypadku stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i bentonitu

wynoszącego $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,4; 2,33 \rangle$ niezależnie od czasu trwania testu, błąd procentowy estymacji tego parametru nie przekracza $\pm 10\%$. Dla GWC charakteryzujących się stosunkiem $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,4; 1,75 \rangle$ czas trwania testu można skrócić nawet do 20 h. Dla takiej konfiguracji GWC różnica pomiędzy błędem estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu dla czasu trwania testu wynoszącego 20 h i 72 h nie przekracza 2 p.p. W przypadku szerszego przedziału parametrów GWC $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,0; 2,33 \rangle$ podobną dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu gwarantuje zachowanie minimalnego czasu testu wynoszącego 30 h, czas taki pozwala na uzyskanie wyników na zbliżonym poziomie w stosunku testu trwającego 72 godziny (różnica w wartości błędu wynosi maksymalnie 2,7 p.p.).



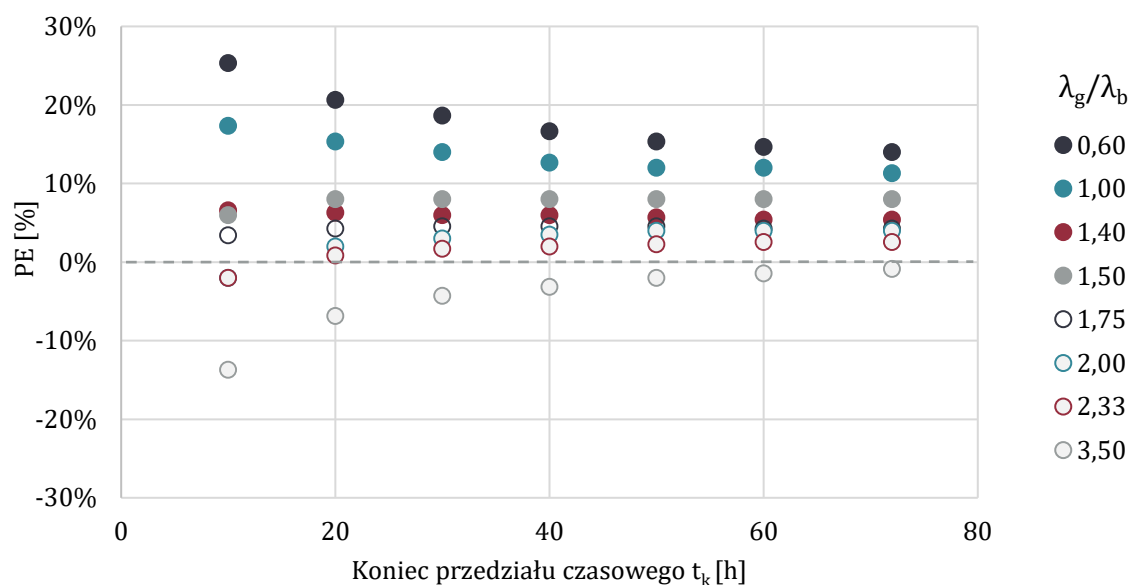
Rysunek 52 Zależność błędu procentowe (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS od stosunku λ_g/λ_b dla wybranych z serii 2 przedziałów czasowych; $Q = 6 \text{ kW}$, $\dot{V} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, $\lambda_r = 0,5 \text{ W}/(\text{mK})$

Analogicznie do pierwszej serii obliczeń stwierdzono, że mniejsze niedokładności uzyskano dla większych wartości rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu. Największy błąd wykazano dla analiz przeprowadzonych dla przedziału czasu wynoszącego 2,5 – 10 h, w najbardziej niekorzystnych konfiguracjach GWC błąd może sięgać $\pm 30\%$. Wnioski z niniejszej analizy

sugerują, że przy zachowaniu stabilnych parametrów testowych, w pewnych konfiguracjach wymiennika i otaczającego gruntu, możliwe jest znaczące skrócenie czasu trwania TRT przy zachowaniu podobnej dokładności estymacji przewodności cieplnej gruntu. Ponadto, również w tym przypadku, wykazano liniową zależność błędu procentowego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu od stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i wypełnienia odwiertu λ_g/λ_b . Zależność ta jest różna dla różnych czasów analizy (rysunek 52).

4.2.3.3. Przedział czasu od $t_p = 5 h$ do $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70\} h$

Trzecia seria obliczeń przeprowadzona została na danych pobieranych do analizy z przedziału czasu zawężanego od końca przy zachowaniu stałego początku (wynoszącego $t_p = 5 h$). Dane prezentowane na rysunku 53 przedstawiają błąd procentowy (PE) wyznaczenia efektywnej przewodności cieplnej gruntu metodą ILS (λ_{ILS}) w zależności od końca przedziału czasu przyjętego w danej analizie (np. wartość 10 na osi x oznacza, że w analizie uwzględniono dane z okresu od 5 do 10 godziny testu). Wyniki te uporządkowano dodatkowo według poszczególnych stosunków rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i bentonitu λ_g/λ_b .



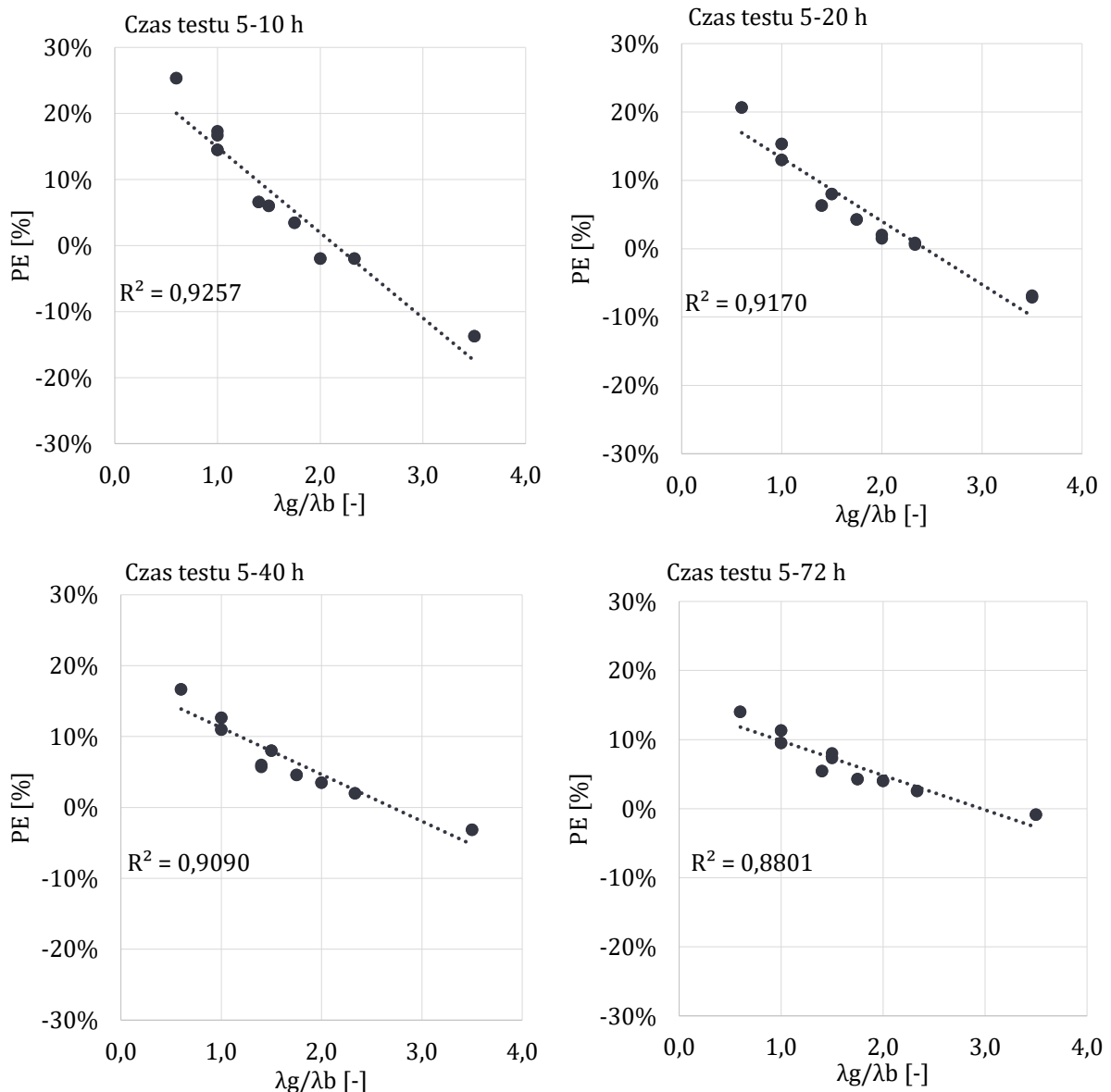
Rysunek 53 Procentowe błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła dla danych z przedziałów czasu o stałym początku $t_p = 5 h$ i zmiennym końcu (t_k); $Q = 6 kW$, $\dot{V} = 1 m^3/h$, $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$

Rysunek 53 zawiera wyniki analiz dla testów o mocy grzałki elektrycznej wynoszącej 6 kW, przepływie $1 m^3/h$ i współczynnika przewodzenia ciepła u-rury wynoszącym $0,5 W/(mK)$. Wykonano również analizy dla innych wartości tych danych wejściowych, nie ujęto ich jednak na rysunku ze względu na relatywnie niewielki wpływ tych zmiennych na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Analizy te wykazały bowiem, że:

- moc cieplna dostarczana do odwiertu (jednostkowy strumień ciepła) nie ma wpływu na wyniki obliczeń, niezależnie od okresu testu, z którego dane wzięto do analizy;
- dla tożsamyh testów, w których współczynnik przewodzenia ciepła u-rury wynosił $0,33 W/(mK)$ lub $0,5 W/(mK)$ stwierdzono nieznaczny wpływ tej zmiennej na wyniki; dla najkrótszego testu (o przedziale czasu od 5 do 10 h) różnica w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu wynosiła 2,0 p.p., dla testów dłuższych niż 30 h różnica ta nie przekraczała 0,7 p.p.;

- dla tożsamyh testów, w których przepływ płynu w GWC wynosił $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ lub $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, różnica w wartości błędu estymowanej przewodności cieplnej gruntu wynosiła maksymalnie 1,3 p.p.

W tej serii analiz również stwierdzono, że skrócenie czasu trwania testu ma znaczący wpływ na błąd procentowy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS, a błąd ten jest dodatkowo silnie zależny od rzeczywistych właściwości termicznych gruntu i wypełnienia odwiertu. Natomiast, pominięcie w analizie danych sprzed 5,0 godziny testu powoduje poprawę dokładności tej estymacji względem początku analizy wynoszącego 2,5 h. W zależności od stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu do przewodności cieplnej wypełnienia odwiertu (λ_g/λ_b) i końca czasu testu (t_k) poprawa ta mieści się w zakresie od 1% do 4%.



Rysunek 54 Zależność błędów procentowych (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS od stosunku λ_g/λ_b dla wybranych z serii 3 przedziałów czasowych; $Q = 6 \text{ kW}$, $\dot{V} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, $\lambda_r = 0,5 \text{ W}/(\text{mK})$

W przypadku stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu i bentonitu wynoszącego $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,4; 2,33 \rangle$, niezależnie od czasu trwania TRT, błąd estymacji nie przekracza $\pm 10\%$. Dla testów trwających co najmniej 20 h oraz dla $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,75; 2,33 \rangle$ błąd ten nie przekracza 5,0%.

W przypadku analizy szerszego przedziału parametrów, czyli $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,0; 2,33 \rangle$ podobną dokładność estymacji gwarantuje zachowanie minimalnego czasu testu wynoszącego 30 h, czas taki pozwala na uzyskanie wyników na zbliżonym poziomie w stosunku testu trwającego 72 h (różnica w wartości błędu wynosi maksymalnie 2,7 p.p.). Największym błędem mogą charakteryzować się wyniki analiz przeprowadzonych dla przedziału czasowego wynoszącego 5,0 – 10 h, w najbardziej niekorzystnych konfiguracjach GWC błąd ten może wynosić około $\pm 25\%$. Wnioski z niniejszej analizy sugerują, że przy zachowaniu stabilnych parametrów testowych, w pewnych konfiguracjach wymiennika i otaczającego gruntu, możliwe jest znaczące skrócenie czasu trwania testu przy zachowaniu podobnej dokładności estymacji. Tak samo jak we wcześniejszych seriach analizy, dla każdego z czasów testu uzyskiwana jest liniowa zależność błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu od stosunku λ_g/λ_b (rysunek 54).

4.2.4. Podsumowanie

Czas trwania testu odpowiedzi termicznej (w szczególności zaś czas z jakiego pobierane są dane do analizy) jest ważnym czynnikiem wpływającym na dokładność identyfikacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu z zastosowaniem modelu ILS. Badacze, dążąc do maksymalnego skrócenia czasu pomiarów w trakcie TRT, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności wyznaczanych parametrów termicznych gruntu, sugerują różne okresy testu, przykładowo: 12 – 20 h [19], 24 h [56] czy 50 h [48]. W publikacjach tych nie porusza się jednak szerzej tematu początku okresu, z jakiego dane pobierane są do analizy, jak i związku wymaganego czasu testu z właściwościami gruntowego wymiennika ciepła. Niniejsze badania wykazały, że poza czasem pomiarów niezwykle istotny wpływ na dokładność szacowania współczynnika przewodzenia ciepła gruntu ma właśnie początek przedziału czasu, od którego dane poddawane są analizie. Dodatkowo, wykazano, że istnieje liniowa zależność błędu procentowego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS}) od właściwości gruntowego wymiennika ciepła (stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu oraz materiału wypełnienia (λ_g/λ_b)). Zależność ta jest różna dla różnych przedziałów czasowych danych, na podstawie których przeprowadzono estymację. Szczegółowe wnioski z opisanych w powyższym fragmencie pracy doktorskiej badań przedstawiono poniżej.

- 1) W zależności od czasu trwania testu (przedziałów czasowych danych, na podstawie których przeprowadzono estymację współczynnika przewodzenia ciepła gruntu) oraz rzeczywistych właściwości wymiennika ciepła (stosunku λ_g/λ_b), metoda bazująca na modelu ILS obarczona jest błędem wynoszącym od 0 do nawet $\pm 30\%$.
- 2) Niezależnie od rzeczywistych właściwości gruntowego wymiennika ciepła (stosunku λ_g/λ_b) dla testów trwających 72 godziny oraz przy analizie danych od 20 godziny trwania testu, błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła nie przekracza 10 %.
- 3) Nie ma uniwersalnego przedziału czasowego danych, na podstawie których przeprowadzana estymacja współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS, niezależnie od rzeczywistych właściwości gruntowego wymiennika ciepła, obarczona jest błędem mniejszym niż 5 %.
- 4) W przypadku konfiguracji GWC, dla których $\lambda_g/\lambda_b \in \langle 1,4; 1,75 \rangle$ okres, z którego dane poddano analizie modelem ILS nie wykazuje istotnego wpływu na wartość procentowego błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Dla innych wartości λ_g/λ_b wpływ ten jest istotny. Wniosek ten ma szczególne znaczenie, ze względu na możliwości

skracania czasu trwania TRT. Dotychczasowe wnioski w tym zakresie, zawarte w literaturze, mogły dotyczyć tej korzystnej konfiguracji wymiennika, czyli $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,4; 1,75 >$ i nie mieć uniwersalnego zastosowania.

- 5) Model ILS obarczony jest najmniejszym błędem dla gruntowych wymienników ciepła charakteryzujących się stosunkiem $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,75; 2,33 >$ i dla czasu trwania testu wynoszącego co najmniej 20 godzin, dla takich warunków błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła wynosi poniżej 5 %.
- 6) Rozpoczęcie analizy danych z TRT od 5 godziny czasu trwania pomiarów poprawia dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem ILS względem początku analizy wynoszącego 2,5 godziny o 1 - 4% w zależności od stosunku λ_g/λ_b i czasu zakończenia testu (analizy danych).
- 7) Największymi błędami obarczone są konfiguracje wymienników charakteryzujące się stosunkiem $\lambda_g/\lambda_b < 1,0$. Dla takich przypadków i dla początku czasu analizy danych wynoszącego zarówno 2,5 godziny, jak i 5 godzin procentowy błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu zawsze przekraczał 10 %. Aby zmniejszyć ten błąd konieczne jest wykonanie analizy dla danych pozyskanych po 20 godzinie testu.

4.3. Metoda poprawy dokładności wyznaczanego modelem ILS współczynnika przewodzenia ciepła gruntu

4.3.1. Model statystyczny skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu

Właściwości termiczne gruntu i materiału wypełniającego odgrywają ważną rolę w procesach wymiany ciepła zachodzących w gruntowych wymiennikach ciepła (GWC). Model ILS służący powszechnie do interpretacji wyników TRT ma pewne ograniczenia, głównym z nich jest to, że nie uwzględnia różnic w dyspersji termicznej i zdolności magazynowania ciepła wypełnienia odwiertu oraz otaczającego go gruntu. Analizy numeryczne przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej pozwoliły na opracowanie wniosków dotyczących rekomendowanych czasów trwania testu w zależności od stosunku współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g) do współczynnika przewodzenia ciepła wypełnienia (λ_b).

W praktyce jednak test terenowy odpowiedzi termicznej gruntu różni się od symulacji tym, że przewodność cieplna gruntu (λ_g) nie jest znana. Opisane w niniejszym punkcie pracy analizy miały na celu potwierdzenie postawionej tezy, że możliwe jest opracowanie zależności pozwalającej na skorygowanie błędu wyznaczanego z zastosowaniem modelu ILS współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS}) na podstawie dostępnych w wyniku przeprowadzenia TRT danych. Po wykonaniu TRT oraz po analizie pozyskanych danych modelem ILS, znanymi wartościami są: współczynnik przewodzenia ciepła materiału wypełnienia (λ_b), współczynnik przewodzenia ciepła gruntu wyznaczany modelem ILS (λ_{ILS}) oraz czas z jakiego pobrano dane do analizy (określony przez początek (t_p) i koniec (t_k) przedziału tego czasu). W celu opracowania poszukiwanej zależności testowano szereg koncepcji modelu pozwalających na odzwierciedlenie zależności opisanej równaniem (36).

$$\lambda_{ILS_S} = f(\lambda_{ILS}, \lambda_b, t_p, t_k) \quad (36)$$

W założeniu, skorygowana wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS_S}), ma być obarczony mniejszym błędem niż wartość wyznaczana bezpośrednio na podstawie modelu ILS. Opracowana zależność ma pozwolić więc na dokładniejszą interpretację wyników TRT w celu uzyskania precyzyjnych danych niezbędnych do projektowania GWC. Do opracowania modelu statystycznego skorygowanej wartości przewodności cieplnej gruntu wykorzystano wyniki analiz przeprowadzonych na podstawie symulacji numerycznych TRT opisanych we wcześniejszych punktach rozdziału 4 niniejszej pracy. W szczególności, wykorzystano:

- analizy 33 numerycznych symulacji TRT wykonane dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia $t_p = \{2,5; 5; 10; 20; 30; 40; 50\} h$ oraz końca t_k w 72 h;
- analizy 33 numerycznych symulacji TRT wykonane dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia t_p w 2,5 h oraz końca $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 72\} h$;
- analizy 33 numerycznych symulacji TRT wykonane dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia t_p w 5,0 h oraz końca $t_k = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 72\} h$.

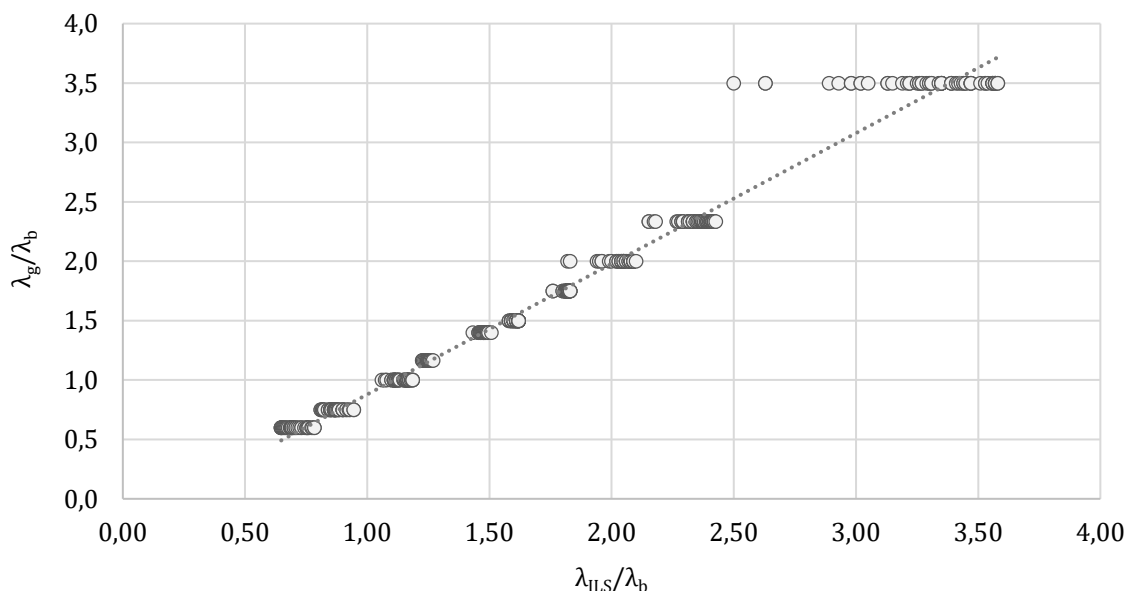
Łącznie, do prac nad modelem statystycznym przygotowano 714 przypadków. Do dalszych analiz wylosowano 428 przypadków zapewniających uzyskanie rozkładu danych wejściowych do budowy modelu statystycznego odpowiadającego rozkładowi normalnemu. Dla wybranych do docelowej próby przypadków wyznaczono macierz korelacji między rozważanymi zmiennymi

(tabela 53). Najmocniejszą korelacją wykazują się zmienne: zależna (λ_g/λ_b) i niezależna (λ_{ILS}/λ_b).

Tabela 53 Macierz korelacji między zmiennymi; analiza wykonana dla liczby przypadków wynoszącej 428

	t_p	t_k	λ_b	λ_g	λ_g/λ_b	λ_{ILS}/λ_b	λ_{ILS}	$t_k - t_p$
t_p	1,0000	0,4337	-0,0012	-0,0020	0,0051	0,0305	0,0160	-0,1697
t_k	0,4337	1,0000	0,0246	-0,0201	-0,0243	0,0218	0,0229	0,8144
λ_b	-0,0012	0,0246	1,0000	-0,1473	-0,7118	-0,7182	-0,0286	0,0276
λ_g	-0,0020	-0,0201	-0,1473	1,0000	0,7325	0,7339	0,9815	-0,0207
λ_g/λ_b	0,0051	-0,0243	-0,7118	0,7325	1,0000	0,9910	0,6269	-0,0299
λ_{ILS}/λ_b	0,0305	0,0218	-0,7182	0,7339	0,9910	1,0000	0,6473	0,0042
λ_{ILS}	0,0160	0,0229	-0,0286	0,9815	0,6269	0,6473	1,0000	0,0148
$t_k - t_p$	-0,1697	0,8144	0,0276	-0,0207	-0,0299	0,0042	0,0148	1,0000

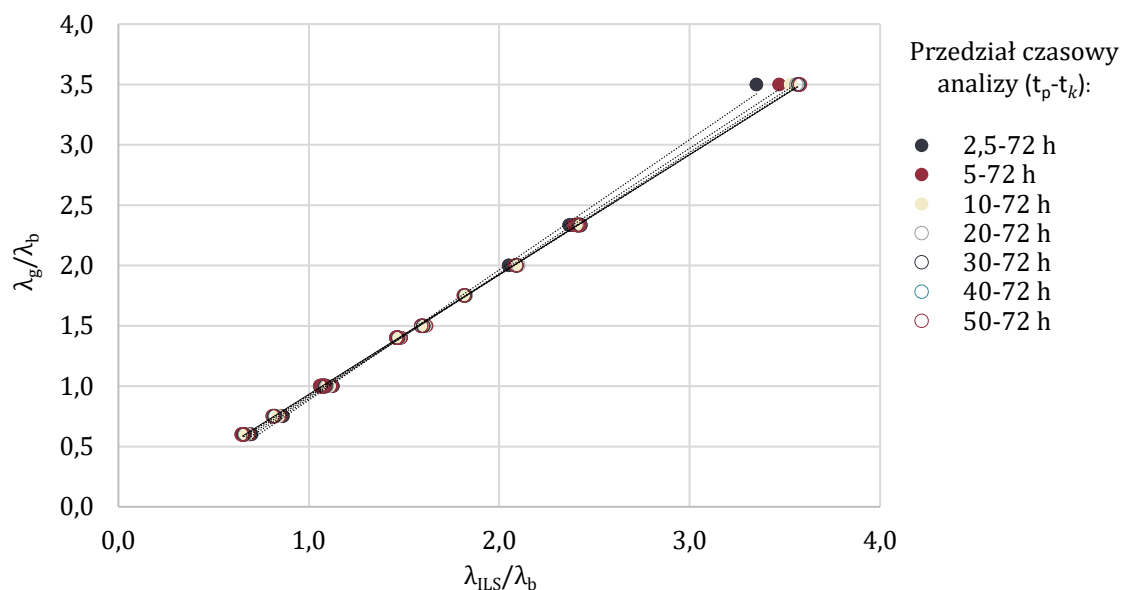
Wykres rozrzutu dla tych dwóch zmiennych względem siebie przedstawiono na rysunku 55. Widoczne jest, że zależność taka nie wyjaśni wszystkich przypadków. Dodatkowe efekty w modelu, które mogłyby wytłumaczyć przyjmowanie tej samej wartości zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) dla różnych zmiennych niezależnych (λ_{ILS}/λ_b) związane są głównie z czasem trwania analizy, a dokładnie wartością początku (t_p) i końca (t_k) przedziału analizy i zdecydowanie najmocniej nasilają swój wpływ dla wysokich wartości zmiennej zależnej i niezależnej, bliskich 3,5. Podkreślić należy, że wartości takie nie należą do typowych (dotyczą wymienników ciepła o wysokich wartościach współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g), większych od 3,5, a jednocześnie niskich wartościach współczynnika przewodzenia wypełnienia (λ_b), wynoszących około 1,0. Wykresy rozrzutu tych dwóch zmiennych (λ_g/λ_b i λ_{ILS}/λ_b) względem siebie w podziale na poszczególne przedziały czasu zamieszczono na rysunkach 56 – 58.



Rysunek 55 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b); korelacja między zmiennymi 0,9910; liczba przypadków 428

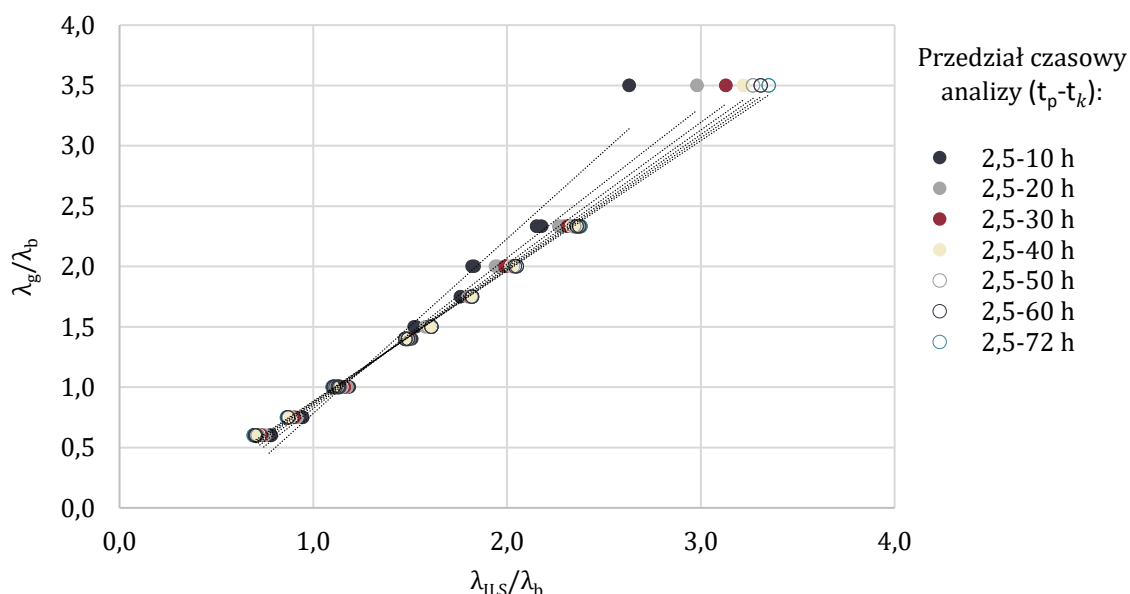
Wykres rozrzutu zmiennych (λ_g/λ_b i λ_{ILS}/λ_b) dla symulacji o zmiennym początku przedziału czasu (t_p) i stałym końcu (t_k) wynoszącym 72 h zawiera poniższy rysunek 56. Widoczna jest

niewielka zależność parametrów 'a' i 'b' poszukiwanej funkcji od przedziału czasowego analizy. Zakres zmian parametru 'a' zawiera się w przedziale od 1,0889 do 0,9906 (czyli $1,03971 \pm 0,0492$), a parametru 'b' w przedziale od -0,2040 do -0,0539 (czyli $0,1289 \pm 0,075$).



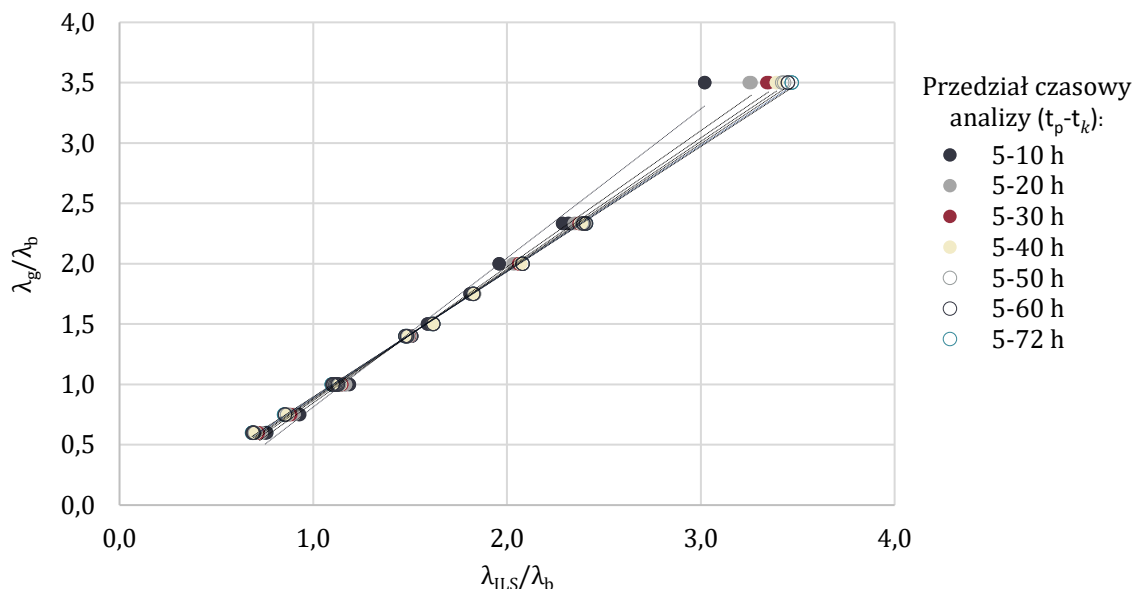
Rysunek 56 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b) z podziałem na przedziały czasowe; analiza danych dla początku przedziału 2,5 h i zmiennej wartości końca przedziału czasu od 10 do 72h

Wykres rozrzutu zmiennych (λ_g/λ_b i λ_{ILS}/λ_b) dla symulacji o stałym początku przedziału czasu (t_p) wynoszącym 2,5 h i zmiennym końcu przedziału (t_k) zawiera rysunek 57. Widoczna jest istotna zależność parametrów 'a' i 'b' poszukiwanej funkcji od przedziału czasowego analizy. Zakres zmian parametru 'a' zawiera się w przedziale od 1,4904 do 1,0896 (czyli $1,2900 \pm 0,2004$), a parametru 'b' w przedziale od -0,7066 do -0,2044 (czyli $0,4555 \pm 0,2511$).



Rysunek 57 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b) z podziałem na przedziały czasowe; analiza danych dla stałego początku przedziału czasu 2,5 h i zmiennej wartości końca przedziału czasu od 10 do 72 h

Wykres rozrzutu zmiennych (λ_g/λ_b i λ_{ILS}/λ_b) dla symulacji o stałym początku przedziału czasu (t_p) wynoszącym 5 h i zmiennym końcu przedziału (t_k) zawiera rysunek 58. Widoczna jest istotna zależność parametrów 'a' i 'b' poszukiwanej funkcji od przedziału czasowego analizy. Zakres zmian parametru 'a' zawiera się w przedziale od 1,2582 do 1,0414 (czyli $1,1498 \pm 0,1084$), a parametru 'b' w przedziale od -0,4450 do -0,1426 (czyli $0,2938 \pm 0,1512$).

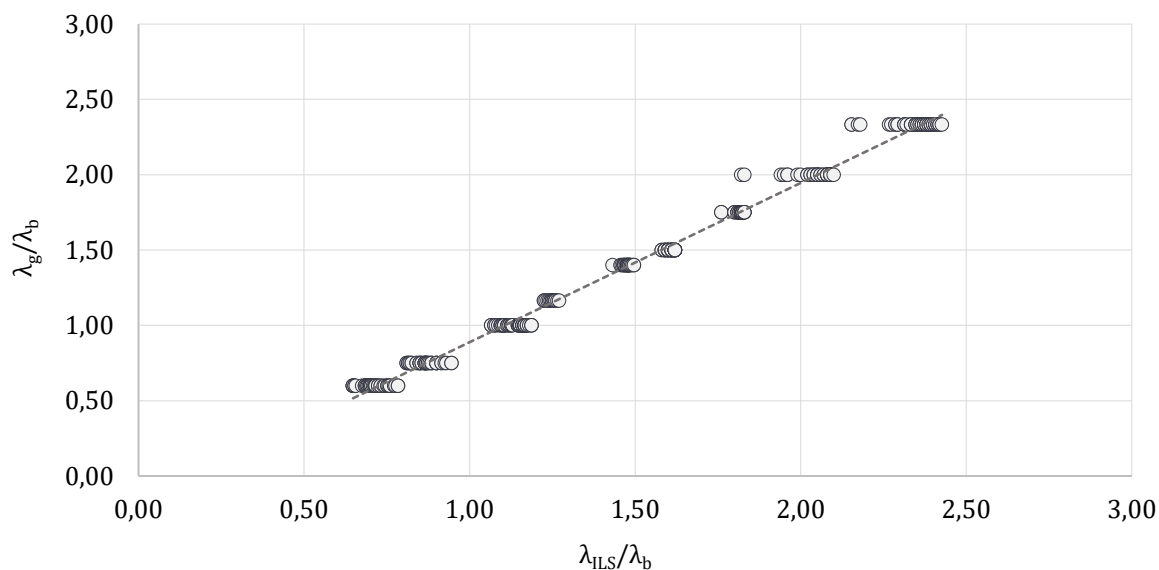


Rysunek 58 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b) z podziałem na przedziały czasowe; analiza danych dla stałego początku przedziału czasu 5 h i zmiennej wartości końca przedziału czasu od 10 do 72 h

W pierwszym etapie prac nad modelem statystycznym skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepłą guntu przeprowadzono szczegółową analizę zmienności parametrów 'a' i 'b' od okresu analizy (a dokładnie od: $\ln(t_p)$ i $\ln(t_k)$) i stosunku λ_g/λ_b . Zależności współczynników 'a' i 'b' od czasu $\ln(t_p)$ i $\ln(t_k)$ miały postać wielomianów drugiego stopnia. Zrezygnowano z tej postaci modelu ze względu na jego złożoność oraz niewielki wpływ na ogólną poprawę dokładności wyników. Natomiast, silna korelacja między zmiennymi λ_g/λ_b i λ_{ILS}/λ_b , wynosząca 0,9910 (tabela 53), skłoniła do opracowanie prostego modelu statystycznego zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem jednej zmiennej niezależnej (λ_{ILS}/λ_b). Zależność między tymi zmiennymi opisuje równanie (37).

$$\frac{\lambda_{ILS_S}}{\lambda_b} = a \cdot \frac{\lambda_{ILS}}{\lambda_b} + b \quad (37)$$

Przy opracowywaniu modelu statystycznego dokonano wykluczenia z analizy przypadków, dla których λ_g/λ_b wynosiła 3,5, gdyż to dla tych wartości wpływ czasu analizy jest najistotniejszy i powodowałby problemy w estymacji parametrów 'a' i 'b' modelu opisanego równaniem 37. Dodatkowym uzasadnieniem takiego działania jest fakt, że obszarem częściej występujących w rzeczywistości wartości zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) jest zakres zawierający się w przedziale od 0,6 do 2,5. Po takiej selekcji, w analizie pozostało 365 przypadków, a wykres rozrzutu dla zmiennych zależnej i niezależnej względem siebie (po tej selekcji) przedstawiono na rysunku 59.



Rysunek 59 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b); korelacja między zmiennymi 0,9968; liczba przypadków 365

Parametry 'a' i 'b' opisanego równaniem (37) modelu statystycznego wyznaczone zostały z zastosowaniem regresji wielorakiej (w pakiecie *Statistica*). W trakcie analizy statystycznej stwierdzono, że wykres normalności reszt modelu opracowanego dla danych ze wszystkich przedziałów czasowych w sposób istotny odbiega od oczekiwanego. Wyselekcjonowano przypadki, których obecność powodowała te rozbieżności. Stwierdzono konieczność usunięcia przypadków charakteryzujących się przedziałem czasu analizy mniejszym od 24 godzin oraz początkiem przedziału czasu analizy mniejszym od 5 godzin. Taka selekcja jest zgodna z oceną wizualną zamieszczonych powyżej wykresów (rysunki 56-58). Po usunięciu tych przypadków z analizy uzyskano wykres normalności reszt zgodny z oczekiwanym. Parametry modelu statystycznego wyznaczone na podstawie tak wyselekcjonowanych przypadków zawiera tabela 54. Współczynnik determinacji modelu jest wysoki i wynosi 99,88%. Zarówno parametr 'a', jak i 'b' są istotne statystycznie. Opracowany model statystyczny opisuje równanie (38):

$$\frac{\lambda_{ILS,S}}{\lambda_b} = 1,014 \cdot \frac{\lambda_{ILS}}{\lambda_b} - 0,108 \quad (38)$$

Tabela 54 Podsumowanie wyników regresji zmiennej zależnej λ_g/λ_b ; $R^2=0,9988$; liczba przypadków 142 (warunki pomijania: $\lambda_g/\lambda_b = 3,5$ lub $t_k - t_p < 24$ lub $t_p < 5$)

Parametr	Wartość parametru	Błąd standardowy
b	-0,107812	0,004508
a	1,014091	0,002771

Po przekształceniu, model statystyczny skorygowanej wartość współczynnika przewodzenia ciepła wyznaczonego modelem ILS ($\lambda_{ILS,S}$), mającej lepiej odzwierciedlać rzeczywistą wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g) niż wartość (λ_{ILS}) estymowana modelem ILS, przyjmie postać opisaną równaniem (39).

$$\lambda_{ILS,S} = a \cdot \lambda_{ILS} + b \cdot \lambda_b \quad (39)$$

Ostateczną postać opracowanego modelu statystycznego opisuje równanie (40).

$$\lambda_{ILS,S} = 1,014 \cdot \lambda_{ILS} - 0,108 \cdot \lambda_b \quad (40)$$

4.3.2. Podsumowanie, weryfikacja efektów i zakres stosowania modelu statystycznego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu

Weryfikacji modelu dokonano na łącznie 876 przypadkach. Wśród nich wyróżnić należy dwie grupy: grupę A, do której należy 714 przypadków, na których częściowo budowany był model i grupę B, do której należą 162 przypadki obejmujące nowe analizy, wykonane dla innych przedziałów czasu. Te dodatkowe analizy przeprowadzono na podstawie wyników 9 numerycznych symulacji TRT o mocy grzewczej 6 kW, przepływie czynnika 1 m³/h oraz konfiguracji właściwości GWC zestawionych w tabeli 55.

Tabela 55 Zestawienie właściwości wymiennika w analizach dla dodatkowych przedziałów czasowych

Lp.	λ_g [W/(mK)]	λ_b [W/(mK)]	λ_g/λ_b [-]
1	1,50	2,50	0,60
2	1,50	1,50	1,00
3	2,00	2,00	1,00
4	3,50	2,50	1,40
5	1,50	1,00	1,50
6	3,50	2,00	1,75
7	2,00	1,00	2,00
8	3,50	1,50	2,33
9	3,50	1,00	3,50

W szczególności, na potrzeby weryfikacji opracowanego modelu statystycznego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, wykonano:

- analizę 9 numerycznych symulacji TRT dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia t_p w 10 h oraz końca $t_k = \{20; 30; 40; 50; 60; 72\} h$;
- analizę 9 numerycznych symulacji TRT dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia t_p w 20 h oraz końca $t_k = \{30; 40; 50; 60; 72\} h$;
- analizę 9 numerycznych symulacji TRT dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia t_p w 30 h oraz końca $t_k = \{40; 50; 60; 72\} h$;
- analizę 9 numerycznych symulacji TRT dla przedziałów czasowych z czasem rozpoczęcia t_p w 40 h oraz końca $t_k = \{50; 60; 72\} h$.

W znaczącej większości z 876 wszystkich analizowanych przypadków zastosowanie przy interpretacji wyników TRT oprócz modelu ILS również modelu statystycznego opisanego równaniem (40) powoduje zmniejszeniem błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. W szczególności, zastosowanie opracowanego modelu (40) skutkuje (tabela 56):

- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,8% do 2,1% dla 88% wszystkich analizowanych przypadków;
- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 9,5% do 2,3% dla 86% przypadków, które wykorzystano do opracowania modelu;
- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 6,3% do 1,5% dla 96% przypadków spoza grupy wykorzystanej do opracowania modelu.

Tabela 56 Wyniki weryfikacji modelu – wszystkie analizowane przypadki

Opis	Ilość przypadków, w których uzyskano poprawę:	MAPE λ_{ILS} [%]	MAPE λ_{ILS_S} [%]
Grupa A	612 (86% wszystkich analizowanych przypadków)	9,5	2,3
Grupa B	156 (96% wszystkich analizowanych przypadków)	6,3	1,5
RAZEM	768 (88% wszystkich analizowanych przypadków)	8,8	2,1

Opracowany model statystyczny nie jest uniwersalny. Szczegóły dotyczące powodów przyjęcia pewnych wymogów co do zalecanego obszaru stosowania modelu opisane zostały w dalszej części tego punktu pracy. Natomiast, zalecany zakres stosowania modelu skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła obejmuje sytuacje, dla których:

- $t_p \geq 2,5$ h;
- $\lambda_{ILS}/\lambda_b < 2,5$;
- $t_k - t_p > 20$ h.

Z analizowanych 876 przypadków, 612 spełnia kryteria zalecanego obszaru stosowania modelu. Zastosowanie opracowanego modelu w zalecanym obszarze skutkuje (tabela 57):

- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,7% do 1,8% dla przypadków, które wykorzystano do opracowania modelu (kryteria zalecanego obszaru zastosowania modelu spełniało 70% wszystkich analizowanych przypadków);
- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 6,6% do 1,6% dla przypadków spoza grupy wykorzystanej do opracowania modelu (kryteria zalecanego obszaru zastosowania modelu spełniało 69% wszystkich analizowanych przypadków);
- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,4% do 1,7% dla wszystkich analizowanych przypadków w trakcie pracy (kryteria zalecanego obszaru zastosowania modelu spełniało 70% wszystkich analizowanych przypadków).

Tabela 57 Wyniki weryfikacji modelu – przypadki spełniające kryteria zalecanego obszaru stosowania modelu

Opis	Ilość przypadków spełniających kryteria modelu:	MAPE λ_{ILS} [%]	MAPE λ_{ILS_S} [%]
Grupa A	500 (70% wszystkich analizowanych przypadków)	8,7	1,8
Grupa B	112 (69% wszystkich analizowanych przypadków)	6,6	1,6
RAZEM	612 (70% wszystkich analizowanych przypadków)	8,4	1,7

Jak już napisano, opracowany model statystyczny skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła nie jest uniwersalny. Po pierwsze, zaleca się zastosowania opracowanego modelu tylko w przypadku analizy danych dla czasu początku $t_p \geq 2,5$ h. Zalecenie takie jest zgodne z ogólnie przyjętymi zasadami dotyczącymi interpretacji wyników TRT. Dodatkowo, nie zaleca się stosowania opracowanego modelu dla właściwości gruntowego wymiennika ciepła, dla których $\lambda_{ILS}/\lambda_b > 2,5$. W takich przypadkach, w wyniku analizy danych dla przedziału czasowego dłuższego niż 20 h uzyskiwane są bardzo dobre wyniki (średni błąd około 3%) z zastosowaniem wyłącznie modelu ILS. Natomiast, analiza danych pozyskanych w trakcie TRT dla krótszego niż 20 godzin okresu czasu nie jest zalecana, skutkuje ona bowiem wysokimi błędami estymacji

współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, a zaproponowany model pozwala co prawda na poprawę sytuacji, ale nadal nie na satysfakcjonującym poziomie. W szczególności dla testów, które nie spełniają kryterium $t_k - t_p > 20$ h wykorzystanie modelu skutkuje:

- w przypadku wszystkich testów, dla których rozpoczęto analizę od 2,5 h, zakończonych w 10 h ($dt = 7,5$ h), dla 59% analizowanych przypadków uzyskano zmniejszenie średniego błędu estymacji (z 14% do 8%),
- w przypadku wszystkich testów, dla których rozpoczęto analizę od 2,5 h, zakończonych w 20 h ($dt = 17,5$ h), dla 74% analizowanych przypadków uzyskano zmniejszenie średniego błędu estymacji (z 12% do 5%),
- w przypadku wszystkich testów, dla których rozpoczęto analizę od 5 h, zakończonych w 10 h ($dt = 5$ h), dla 74% analizowanych przypadków uzyskano zmniejszenie średniego błędu estymacji (z 12% do 5%),
- w przypadku wszystkich testów, dla których rozpoczęto analizę od 5 h, zakończonych w 20 h ($dt = 15$ h), dla 82% analizowanych przypadków uzyskano zmniejszenie średniego błędu estymacji (z 11% do 3%).

Pomimo tego, że dla dużej części testów nie spełniających kryterium $t_k - t_p > 20$ h uzyskuje się poprawę dokładności estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu, to zasadniczo nie jest zalecane przeprowadzanie TRT krótszych niż 20 godzin. Wynika to z faktu, że terenowe testy odpowiedzi termicznej gruntu są narażone na szereg zakłóceń, takich jak wahania mocy dostarczanej do odwiertu czy duży wpływ warunków atmosferycznych, które mogą skutkować brakiem stabilnych parametrów testowych. Dla krótkiego czasu testu wpływ tych zakłóceń może znacząco zaburzyć wartość wyznaczanego na podstawie takich pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Zasadniczo przyjęto więc zasadę, że 20 godzinny przedział stabilnych danych pomiarowych z TRT jest absolutnym minimum niezbędnym do pozyskania odpowiednich danych wejściowych do zastosowania zaproponowanego modelu statystycznego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS_S}).

Dla testów spełniających kryteria stosowania modelu, niezależnie od przyjętego przedziału czasu analizy danych, uzyskano bardzo dobrą zgodność skorygowanego (λ_{ILS_S}) i rzeczywistego współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g). Zależność opisana równaniem (40), zastosowana jako dodatkowa przy interpretacji modelem ILS wyników uzyskanych w teście TRT pozwala na wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła gruntu obciążonego mniejszym błędem estymacji niż tylko z zastosowaniem modelu ILS. Możliwe jest więc pozyskanie dokładniejszych danych do projektowania, analizy ich pracy oraz przygotowania kosztorysów gruntowych wymienników pomp ciepła. Powyższe wyniki badań wskazują również, że możliwe jest pozyskanie dokładnych danych o parametrach gruntu również w sytuacjach, w których dane z początkowego okresu pomiarów charakteryzują się dużą niestabilnością bądź wystąpiły problemy z ich archiwizacją. Warto zaznaczyć, że występowanie problemów technicznych oraz zakłóceń w warunkach testów terenowych jest częstym problemem. Wznowienie testu wymaga czasu pozwalającego na powrót gruntu do stanu ustalonego. Konsekwencjami czego jest przesunięcie terminu realizacji robót budowlanych oraz zwiększenie kosztów realizacji TRT.

5. Podsumowanie i wnioski z pracy

5.1. Podsumowanie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono badania dotyczące dokładności estymacji parametrów gruntu na podstawie danych uzyskanych w teście odpowiedzi termicznej gruntu (ang. Thermal Response Tests – TRT) z wykorzystaniem modelu nieskończonego źródła liniowego (ang. Infinite Line Source – ILS). Przeprowadzono badania terenowe oraz szereg symulacji numerycznych, które umożliwiły ocenę dokładności estymacji parametrów gruntu modelem ILS, w zależności od parametrów testu, czasu trwania testu i właściwości wymiennika. Na podstawie przeprowadzonych analiz danych pomiarowych oraz wyników symulacji numerycznych opracowano metodę pozwalającą na zwiększenie dokładności wyznaczanego modelem ILS współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Wyniki pracy mogą pozwolić na dobór czasu trwania TRT i czasu analizy danych prowadzących do uzyskania najdokładniejszych informacji o wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu oraz na skorygowanie uzyskanej wartości tego współczynnika w zależności od właściwości wymiennika ciepła. Dla dużych instalacji gruntowych wymienników ciepła, dla których zalecane jest wykonywanie TRT, może to prowadzić do znaczących oszczędności kosztów inwestycyjnych, lub do zapobiegania błędom projektowym.

5.2. Wnioski główne

- 1) Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych stwierdzono, że moc grzewcza w trakcie testu odpowiedzi termicznej gruntu nie miała wpływu na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z zastosowaniem modelu ILS. Zmiana przepływu miała niewielki wpływ na wartość tego błędu. Również parametry U-rury nie miały większego wpływu na wartość względnego błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.
- 2) Dokładność identyfikacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu modelem ILS jest zależna od właściwości wymiennika: współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_g) i współczynnika przewodzenia ciepła wypełnienia odwiertu (λ_b).
- 3) Czas trwania testu odpowiedzi termicznej (w szczególności zaś czas z jakiego pobierane są dane do analizy) jest ważnym czynnikiem wpływającym na dokładność identyfikacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu z zastosowaniem modelu ILS. Dążenie do skrócenia czasu pomiarów, przy zachowaniu dokładności estymacji parametrów termicznych gruntu wymaga uważnej analizy początku i końca przedziału czasowego oraz długości przedziału czasu, z którego dane poddawane są analizie.
- 4) Istnieje liniowa zależność błędu procentowego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS}) od właściwości gruntowego wymiennika ciepła (stosunku rzeczywistej przewodności cieplnej gruntu oraz materiału wypełnienia (λ_g/λ_b)). Zależność ta jest różna dla różnych przedziałów czasowych danych, na podstawie których przeprowadzono estymację.

- 5) Dla analizowanych przypadków stwierdzono, że w zależności od czasu trwania testu (przedziałów czasu pobierania danych, na podstawie których przeprowadzana jest estymacja współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem ILS) oraz właściwości wymiennika, metoda bazująca na modelu ILS obarczona jest błędem wynoszącym od -25% do +30%.
- 6) Dla analizowanych przypadków stwierdzono, że nie ma uniwersalnego przedziału czasowego danych, na podstawie których przeprowadzana estymacja współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS, niezależnie od właściwości wymiennika, obarczona jest błędem mniejszym niż 5%.
- 7) Niezależnie od właściwości wymiennika dla testów trwających 72 h oraz dla analizy danych rozpoczynającej się od 20 h trwania testu, błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła modelem ILS nie przekracza 10%.
- 8) W ramach prac badawczych stwierdzono liniową zależność stosunku współczynnika przewodzenia ciepła gruntu do wypełnienia odwiertu (λ_g/λ_b) względem stosunku współczynnika przewodzenia ciepła gruntu uzyskanego z zastosowaniem modelu ILS do wypełnienia odwiertu (λ_{ILS}/λ_b). Na tej podstawie opracowano zależność pozwalającą na skorygowanie błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu uzyskanego z zastosowaniem modelu ILS (λ_{ILS}) na podstawie dostępnych w wyniku przeprowadzenia TRT danych. Zaproponowano model, w którym poszukiwana zamienna zależna, skorygowana wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (λ_{ILS_S}), jest liniową funkcją λ_{ILS} oraz λ_b .
- 9) Zalecany zakres stosowania statystycznego modelu skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła obejmuje sytuacje, dla których: $t_p \geq 2,5$ h; $\lambda_{ILS}/\lambda_b < 2,5$; $(t_k - t_p) > 20$ h.
- 10) Zastosowanie opracowanego modelu statystycznego w zalecanej obszarze skutkuje zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,4% do 1,7% dla wszystkich analizowanych przypadków.

5.3. Wnioski szczegółowe

5.3.1. Wnioski z badań terenowych TRT

- 1) Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do TRT pozwala na uzyskanie bardzo stabilnych parametrów testowych.
- 2) Wyznaczona wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu dla TESTU 1 (moc 4 kW; przepływ $1 \text{ m}^3/\text{h}$) to $2,33 \text{ W}/(\text{mK})$, a dla TESTU 2 (moc 2 kW; przepływ $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$) to $2,34 \text{ W}/(\text{mK})$. Zmiana mocy grzewczej oraz przepływu płynu bardzo nieznacznie wpłynęła na wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.
- 3) W analizowanym przypadku lokalizacja aparatury badawczej znacząco wpłynęła na wyniki estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (różnica ta wynosiła dla TESTU 1 12,45%, a dla TESTU 2 18,4% względem wartości wyznaczonej na podstawie pomiarów w studni rewizyjnej). Aparatura testowa powinna znajdować się możliwie blisko odwiertu i być zabezpieczona przed oddziaływaniem warunków zewnętrznych (ograniczenie strat ciepła i przegrzewania stanowiska).

5.3.2. Wnioski dotyczące symulacji numerycznych TRT

- 1) Symulacja numeryczna TRT (z założeniem stałej mocy dostarczanej do odwiertu) wymaga opracowania oraz skompilowania pliku UDF w solwerze obliczeniowym, pozwalającego na zdefiniowanie profilu temperatury na wlocie do wymiennika na podstawie przechowanej w pamięci temperatury na wylocie (z poprzedniego kroku czasowego) oraz stałej różnicy temperatur.
- 2) W analizowanych przypadkach, zastosowany w modelowaniu numerycznym model turbulencji nie wpłynął znacząco na wyniki symulacji TRT.
- 3) Wykazano, że numeryczna symulacja TRT wymaga zastosowania krótkiego kroku czasowego (w przeprowadzonych symulacjach był to krok minutowy). Wykazano, że krok godzinowy, nawet przy dużej liczbie iteracji, nie pozwala na uzyskanie dobrej jakości danych, a zwiększanie ilości iteracji powoduje, że czas obliczeń jest zbliżony do czasu symulacji w kroku minutowym.
- 4) Wykazano, że przewodność cieplna u-rury oraz wypełnienia odwiertu ma najsilniejszy wpływ na wyniki symulacji temperatury płynu w pierwszej fazie testu. Stwierdzono również, że wyznaczana z zastosowaniem metody ILS przewodność cieplna gruntu jest znacząco zawyżona względem wartości rzeczywistej.
- 5) Stwierdzono, że opracowany model numeryczny TRT z bardzo dobrą dokładnością odzwierciedlił rzeczywiste testy odpowiedzi termicznej gruntu. Średni błąd względny wartości temperatur średnich płynu w GWC uzyskanych na podstawie symulacji numerycznych dla skalibrowanego modelu wynosił dla TESTU 1: 0,67%, a dla TEST 2: 0,34 %.

5.3.3. Wnioski z numerycznej analizy wrażliwości TRT

- 1) We wszystkich analizowanych przypadkach moc testu oraz właściwości u-rury nie miały wpływu na błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Przepływ płynu miał niewielki wpływ na wielkość tego błędu.
- 2) Wykazano silną zależność błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu na podstawie ILS od stosunku wartości współczynnika przewodzenia ciepła wypełnienia odwiertu oraz gruntu.
- 3) W przypadku konfiguracji GWC, dla których $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,4; 1,75 >$ okres, z którego dane poddano analizie modelem ILS nie wykazuje istotnego wpływu na wartość procentowego błędu estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu. Dla innych wartości λ_g/λ_b wpływ ten jest istotny. Wniosek ten ma szczególne znaczenie, ze względu na możliwości skracania czasu trwania TRT. Dotychczasowe wnioski w tym zakresie, zawarte w literaturze, mogły dotyczyć tej korzystnej konfiguracji wymiennika, czyli $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,4; 1,75 >$ i nie mieć uniwersalnego zastosowania.
- 4) Model ILS obarczony jest najmniejszym błędem dla gruntowych wymienników ciepła charakteryzujących się stosunkiem $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,75; 2,33 >$ i dla czasu trwania testu wynoszącego co najmniej 20 godzin, dla takich warunków błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła wynosi poniżej 5%.
- 5) Rozpoczęcie analizy danych z TRT od 5 godziny czasu trwania pomiarów poprawia dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem ILS względem

początku analizy wynoszącego 2,5 godziny o 1 - 4% w zależności od stosunku λ_g/λ_b i czasu zakończenia testu (analizy danych).

- 6) Największymi błędami obarczone są konfiguracje wymienników charakteryzujące się stosunkiem $\lambda_g/\lambda_b < 1,0$. Dla takich przypadków i dla początku czasu analizy danych wynoszącego zarówno 2,5 godziny, jak i 5 godzin procentowy błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu zawsze przekraczał 10%. Aby zmniejszyć ten błąd konieczne jest wykonanie analizy dla danych pozyskanych po 20 godzinie testu.
- 7) możliwe jest dla konfiguracji wymiennika $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,75; 2,33 >$ w przypadku analiz prowadzonych od 5 h oraz dla $\lambda_g/\lambda_b \in < 1,5; 1,75 >$ w przypadku analiz prowadzonych od 2,5 h.
- 8) Rozpoczęcie analizy danych z TRT od 5 h czasu trwania pomiarów poprawia dokładność estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem ILS względem początku analizy wynoszącego 2,5 h o 1 - 4% w zależności od stosunku λ_g/λ_b i końca czasu testu.

5.3.4. Wnioski dotyczące opracowanego modelu statystycznego

- 1) Stwierdzono, że zastosowanie opracowanego modelu statystycznego skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła skutkuje:
 - zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,8% do 2,1% dla 88% wszystkich analizowanych przypadków;
 - zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 9,5% do 2,3% dla 86% przypadków, które wykorzystano do opracowania modelu;
 - zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 6,3% do 1,5% dla 96% przypadków spoza grupy wykorzystanej do opracowania modelu.
- 2) Zalecanym obszarem zastosowania opracowanego modelu jest obszar spełniający kryteria:
 - $t_p \geq 2,5$ h;
 - $\lambda_{ILS}/\lambda_b < 2,5$;
 - $t_k - t_p > 20$ h.Poza tym obszarem nie zaleca się stosowania opracowanego modelu ponieważ:
 - Zalecenie rozpoczęcia analizy danych z TRT dla $t_p \geq 2,5$ h jest zgodne z ogólnie przyjętymi zasadami dotyczącymi interpretacji wyników TRT;
 - dla $\lambda_{ILS}/\lambda_b > 2,5$ i dla okresu pomiarowego wynoszącego więcej niż 20 h błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu modelem ILS jest niewielki i nie wymaga korekty;
 - dla okresu pomiarowego wynoszącego mniej niż 20 h nie zaleca się przeprowadzania procedury estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS.
- 3) Zastosowanie modelu w zalecanym obszarze skutkuje:
 - zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,7% do 1,8% dla przypadków, które wykorzystano do opracowania modelu (kryteria zalecanego obszaru zastosowania modelu spełniało 70% wszystkich analizowanych przypadków);

- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 6,6% do 1,6% dla przypadków spoza grupy wykorzystanej do opracowania modelu (kryteria zalecanego obszaru zastosowania modelu spełniało 69% wszystkich analizowanych przypadków);
- zmniejszeniem średniego błędu względnego estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu z 8,4% do 1,7% dla wszystkich analizowanych przypadków w trakcie pracy (kryteria zalecanego obszaru zastosowania modelu spełniało 70% wszystkich analizowanych przypadków).

Bibliografia

- [1] Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła – POPRT PC; Raport Rynkowy PORT PC: Pompy Ciepła 2019; Rynek pomp ciepła w Polsce w latach 2010–2018; Perspektywy rozwoju rynku pomp ciepła do 2030 roku; Kraków; 2019
- [2] B. Nykvist; A. Dzebo; Pathways Project Exploring transition pathways to sustainable; low carbon societies; Country report 3: Green niche-innovations in the Swedish heat system; Stockholm Environmental Institute; 2014
- [3] J. Acuña; Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers; Licentiate Thesis; KTH School of Industrial Engineering and Management; Stockholm; 2010
- [4] T. Blomberg; J. Claesson; P. Eskilson; G. Hellström; B. Sanner; EED v3.2 Manual; Tutorial Examples. Blocon. February 2015. Available online: <https://buildingphysics.com/manuals/EED4.pdf> (dostęp: 31.03.2022)
- [5] S. Erol; B. François; Thermal stresses in borehole heat exchangers. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2015; 39(13): 1450– 1470
- [6] B. Sanner; Ground Source Heat Pumps – history; development; current status; and future prospects; 12th IEA Heat Pump Conference; Giessen; Germany; 2017
- [7] A. Von Humboldt; Ueber die unterirdischen Gasarten und die Mittel ihren Nachtheil zu vermeiden. Braunschweig; Vieweg; 1799
- [8] G. L. Buffon; *Histoire naturelle; générale et particulière*. Paris: De l'imprimerie royale; 1778
- [9] L. Cordier; *Essai sur la Température de l'Intérieure de la Terre*. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences Paris; 473-559; 1827
- [10] G. Bischof; *Die Wärmelehre des Innern unsers Erdkörpers*. Leipzig: Verl. Joh. A. Barth; 1837
- [11] W. Thomson; On the reduction of observations of underground temperature. *Trans. Royal Soc. Edinburgh*; 1860;XXII/II:405-427
- [12] J. D. Everett; On a method of reducing observations of underground temperatures; *Trans. Royal Soc. Edinburgh*; XXII/II; 429-439; 1860;
- [13] C. Popiel; J. Wojtkowiak; B. Biernacka; Measurements of temperature distribution in ground; *Exp Therm Fluid Sci*; vol. 25; pp. 301-309; 2001
- [14] W. Thomson; On the economy of the heating or cooling of buildings by means of currents of air. *Proc. Philos. Soc.*; Glasgow; 269–272; 1853
- [15] G. Emmi; A. Zarrella; M. De Carli; M. Donà; A. Galgaro; Energy performance and cost analysis of some borehole heat exchanger configurations with different heat-carrier fluids in mild climates; *Geothermics*; vol. 65; 158-169; 2017
- [16] G. Hellström; *Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems*; Lund University; 1991
- [17] G. Florides; S. Kalogirou; *Ground heat exchangers—A review of systems; models and applications*; *Renew. Energy*; vol. 32; 2461-2478; 2007
- [18] A. A. Serageldin; Y. Sakata; T. Katsura; K. Nagano; Thermo-hydraulic performance of the U-tube borehole heat exchanger with a novel oval cross-section: Numerical approach; *Energy. Conver. And Manag.*; vol. 177; 406-415; 2018

- [19] M. Smith; R. Perry; In-situ Testing and Thermal Conductivity Testing; Proceedings of the Georexchange Technical Conference and Exposition; Oklahoma State University; Stillwater; Oklahoma; 16-19; 1999
- [20] S. Erol; B. François; Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers; App. Therm. Eng.; vol. 70; 788-799; 2014
- [21] D. Pahud; B. Matthey; Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ; Energy Buildings; vol. 33; 503-507; 2001
- [22] E. Stefanowicz; K. Piechurski; Przyczyny i skutki przeciążenia dolnego źródła gruntowej pompy ciepła; Rynek Instalacyjny; nr 9; 2019
- [23] B. Usowicz; W. Marczewski; J. Lipiec; J.B. Usowicz; Z. Sokołowska; H. Dąbkowska-Naskręt; M. Hajnos; M. I. Łukowski; Woda w glebie. Pomiary naziemne i satelitarne w badaniach zmian klimatu; PAN; Komitet Agrofizyki; Wyd. FRNA; 2009
- [24] A. Różański; Analiza wieloskalowa charakterystyki cieplnej wielofazowego ośrodka gruntowego; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Wrocław; 2018
- [25] D. Barry-Macaulay; A. Bouazza; B. Wang; R.M. Singh; Evaluation of soil thermal conductivity models; Canadian Geotechnical Journal; vol. 52; 2015
- [26] O.T. Farouki; Ground thermal properties. [w:] Thermal design considerations in frozen ground engineering; ed. T.G. Krzewinski; R.G. Tart; ASCE; New York; 186 – 203; 1985
- [27] M. A. Márquez; M. Á. M. Bohórquez; S. G. Melgar; Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems; Sensors (Basel); 16(3): 306; 2016
- [28] Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła – POPRT PC; Wytuczne projektowania; wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła. Część 1. Dolne Źródła do pomp ciepła; 01/2013
- [29] P. Eskilson; Thermal analysis of heat extraction boreholes. Ph.D. thesis. Sweden: University of Lund; 1987
- [30] J. D. Spitler; M. Bernier; Vertical borehole ground heat exchanger design methods; Chapter in Advances in Ground-Source Heat Pump Systems; 2016
- [31] S. Kavanaugh; Ground and Water Source Heat Pumps – A Manual for the Design and Installation of Ground-Coupled; Ground Water and Lake Water Heating and Cooling Systems in Southern Climates; University of Alabama; Tuscaloosa; 1985
- [32] S. Kavanaugh; A design method for hybrid ground source heat pumps; ASHRAE Transactions; 104 (2); 691-698; 1998
- [33] S. Kavanaugh; A 12-step method for closed-loop ground-source heat-pump design. ASHRAE Transactions; 114 (2); 328-337; 2008
- [34] Viessmann; Podręcznik architekta; projektanta i instalatora. Pompy ciepła; Viessmann Werke; Allendorf (Eder); 2013
- [35] E. Stefanowicz; K. Piechurski; Metody wyznaczania parametrów gruntu do projektowania pionowych wymienników dla pomp ciepła solanka/woda; Rynek Instalacyjny 6/2019
- [36] J. M. Markle; R.A. Schincariol; Thermal plume transport from sand and gravel pits: Potential thermal impacts on cool water streams. Hydrology; 338; 174–195; 2007
- [37] S. Koochi-Fayegh; M. A. Rosen; A Review of the Modelling of Thermally Interacting Multiple Boreholes; Sustainability; 5; 2519-2536; 2013

- [38] S. Smolen; W. Szaflik; Analytische Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Boden für Wärmepumpen mit vertikalen Erdwärmesonden. - IZW-Bericht 2/97; 219-224; 1997
- [39] P. Eskilson; J. Claesson; Simulation Model for thermally interacting heat extraction boreholes; Numerical Heat Transfer 13; 149-165; 1988
- [40] E. A. Stefanowicz; M. Szulgowska-Zgrzywa; Energy balancing in ground heat exchanger for heat pump systems - a case study with simulations; E3S Web of Conf. Volume 100; 2019
- [41] S. Szauter; Untersuchungen der gegenseitigen Beeinflussung von EW - Sonden durch Grundwasserfluß bei dichter Bebauung; Dipl. thesis; Giessen University; 1998
- [42] P. Mogensen; Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages. In: International conference on subsurface heat storage in theory and practice; Stockholm; Sweden: Swedish Council for Building Research; 652–57; 1983
- [43] L. H. Salomone; J. I. Marlowe; Soil and Rock Classification for the Design of Ground Coupled Heat Pump Systems: Field Manual Paperback – December 1; 1989
- [44] D.A. de Vries; A.J. Peck; On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils; Analysis of moisture effects; Division of Plant Industry; 1958
- [45] IEEE 442-2017; Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials; 2018
- [46] ASTM D5334-14; Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure; 2014
- [47] A.D. Chiasson; S.J. Rees; J.D. Spitler; A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems; ASHRAE; Trans. 106; 380-393; 2000
- [48] J.D. Spitler; SEA Gehlin; Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review; Renew. and Sust.; vol. 50; 1125-1137; 2015
- [49] S. Gehlin; Thermal Response Test. Method Development and Evaluation; Doctoral Thesis; Luleå University of Technology; 2002
- [50] C Eklöf; S. Gehlin; TED—a mobile equipment for thermal response test [Masters thesis] Luleå University of Technology; 1996
- [51] S. Gehlin; Thermal response test—in situ measurements of thermal properties in hard rock; Licentiate thesis; Luleå University of Technology; Luleå; 1998
- [52] H. Witte; G. van Gelder. J.D. Spitler; In situ measurement of ground thermal conductivity: the dutch perspective; ASHRAE Trans; 108;263-272; 2002
- [53] A. M. Gustafsson; Thermal response test—Influence of convective flow in groundwater filled boreholes; Doctoral thesis; Luleå University of Technology; Luleå ; 2010
- [54] A. M. Gustafsson; L. Westerlund; Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole heat exchanger; Renewable Energy; 1061-1070; 2010
- [55] A. M. Gustafsson; L. Westerlund; Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger—investigation of the borehole thermal resistance; Renewable Energy; 36; 2388-2394; 2011
- [56] P. Bujok; D. Grycz; M. Klempa; A. Kunz; M. Porzer; A. Pytlik; Z. Rozhnal; P. Vojčínák; Assessment of the influence of shortening the duration of TRT (thermal response test) on the precision of measured values; Energy; 64:120–9; 2014

- [57] A. M. Gustafsson; L Westerlund; G. Hellström; CFD-modelling of natural convection in a groundwater-filled borehole heat exchanger; *Appl. Therm. Eng.*; 30; 683-691; 2009
- [58] A. M. Gustafsson; L. Westerlund; Simulation of the thermal borehole resistance in groundwater filled borehole heat exchanger using CFD technique; *Int J Energy Environ*; 1; 399-410; 2010
- [59] S. Gehlin; G. Hellström Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock *Renewable Energy*; 28; 2221-2238; 2003
- [60] S. Kavanaugh; L Xie; C. Martin; Investigation of methods for determining soil and rock formation thermal properties from short-term field tests. ASHRAE 1118-RP. Atlanta; Georgia; 2001
- [61] S. Gehlin; B. Nordell; Determining undisturbed ground temperature for thermal response test; *ASHRAE; Trans*; 109; 151-156; 2003
- [62] J. Gottlieb; M. A. Tilg; D. Fischer; R. Zorn; S. Meier; Measuring methods for monitoring; quality control and preservation of evidence in borehole heat exchangers (in German); *Handb. Oberflächennahe geotherm.*; Springer Spektrum; Berlin; Germany; 637-652; 2018
- [63] J. Martos; Á. Montero; J. Torres; J. Soret; G. Martínez; R. García-Olcina; Novel wireless sensor system for dynamic characterization of borehole heat exchangers; *Sensors*; 11; 7082-7094; 2011
- [64] N. Aranzabala; J. Martosa; M. Stokucac; W. Mazzotti Pallard; J. Acuña; J. Soreta; P. Blum; Novel instruments and methods to estimate depth-specific thermal properties in borehole heat exchangers; *Geothermics*; 86; 2020
- [65] N. Aranzabal; J. Martos; H. Steger; P. Blum; J. Soret; Temperature measurements along a vertical borehole heat exchanger: A method comparison; *Renew. Energy*; 143; 1247-1258; 2019
- [66] W. Austin; C. Yavuzturk; J. Spitler; Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties; *ASHRAE Trans*; 106; 365-379; 2000
- [67] B. Sanner; G. Hellström; J. Spitler; S. Gehlin; More than 15 years of mobile Thermal Response Test—a summary of experiences and prospects. w: *Proceedings of the European geothermal congress*; Italy; 2013
- [68] H. Fujii; H. Okubo; R. Itoi; Thermal response tests using optical fiber thermo-meters; *Geotherm Resour. Council Trans.*; 30; 545–51; 2006
- [69] E. Rohner; L. Rybach; U. Schärli; A new; small wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design. w:*Proceedings of the world geothermal congress*; 2005
- [70] S. Wilke; K. Menberg; H. Steger; P. Blum; Advanced thermal response tests: A review; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 2019
- [71] S. W. Tyler; J. S. Selker; M. B. Hausner; C. E. Hatch; T. Torgersen; C. E. Thodal; et al. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods; *Water Resour. Res.*; 45;. 1-11; 2009
- [72] V. Soldo; L. Boban; Vertical distribution of shallow ground thermal properties in different geological settings in Croatia; *Renew. Energy*; 99; 1202-1212; 2016
- [73] V. Wagner; P. Bayer; M. Kübert; P. Blum; Numerical sensitivity study of thermal response tests; *Renew; Energy* ;41:245–53; 2012
- [74] C. A. Martin; S. P. Kavanaugh; Ground thermal conductivity testing - Controlled site analysis; *ASHRAE Trans*; 108; 945-952; 2002

- [75] I. Sarbu; C. Sebarchievici; Ground-Source Heat Pump Systems; Chapter in Fundamentals; Experiments and Applications; 71-128; 2016
- [76] B. Sanner; G. Hellström; J. Spitler; S. Gehlin; Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application; Proceedings World Geothermal Congress; 2005
- [77] ASHRAE; Methods for determining soil and rock formation thermal proper-ties fromfield tests. ASHRAE research summary–ASHRAE 1118-TRP. American Society of Heating; Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2002.
- [78] J. Luo; Y. Zhang; J. Tuo; W. Xue; J. Rohn; S. Baumgärtel; A Novel Approach to the Analysis of Thermal Response Test (TRT) with Interrupted Power Input; Energies; 13(19); 2020
- [79] C. X. Zhang; Z. J. Guo; Y. F. Liu; X. C. Cong; D. G. Peng; A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems Renew Sustain Energy Rev; 40;851-867; 2014
- [80] J. F. Urchueguia; L. Lemus; J. V. Oliver-Villanueva; B. Badenes; M. A. Mateo Pla; J.M. Cuevas Castell; How Reliable Are Standard Thermal Response Tests? An Assessment Based on Long-Term Thermal Response Tests Under Different Operational Conditions; Energies 11(12); 2018
- [81] S. You; X. Cheng; H. Guo; Z. Yao; In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers; Energy Build; 79; 23-31; 2014
- [82] C. Yavuzturk; J. Spitler; S. J. Rees; A Transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers; ASHRAE; Trans 1999; 105(A): 465–74; 1999
- [83] C. Yavuzturk; J. Spitler; Field validation of a short time step model for verticalground-loop heat exchangers; ASHRAE; Trans 2001;107(1):617–25; 2001
- [84] W. Choi; R. Ooka; Effect of disturbance on thermal response test; Part 1:development of disturbance analytical model; parametric study; and sensi-tivity analysis; Renew. Energy; 85; 306-318; 2016
- [85] W. Choi; R. Ooka; Effect of disturbance on thermal response test; Part 2: Numerical study of applicability and limitation of infinite line source model for interpretation under disturbance from outdoor environment; Renew. Energy; 85; 1090-1105; 2016
- [86] S. Yoon; S.R. Lee; G. H. Go; A numerical and experimental approach to the estimation of borehole thermal resistance in ground heat exchangers; Energy; 71; 547-555; 2014
- [87] H. Witte; Error analysis of thermal response tests; Applied Energy; 109;302–311; 2013
- [88] International Energy Agency; Energy Conservation through Energy Storage Programme; 2009; https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/090525_broschuere_eces.pdf (dostę: 31.03.2022)
- [89] IGSHPA; Closed-loop geothermal heat pump systems: design and installation standards. 2013 edition. International Ground Source Heat Pump Association; Oklahoma State University; 2013
- [90] M. Li; A.C.K. Lai; Parameter estimation of in-situ thermal response tests for borehole ground heat exchangers; Internat. Jour. of Heat and Mass Transf.; vol. 55; 2615-2624; 2012
- [91] X. Yu; Y. Zhang; N. Deng; H. Ma; S. Dong; Thermal response test for ground source heat pump based on constant temperature and heat-flux methods; Appl. Therm. Eng.; 93 ; 678-682; 2016
- [92] W. Choi; R. Ooka; Development of TPRT (Thermal Performance-Response Test) for Borehole Heat Exchanger Design. Proceedings of the IGSHPA Technical/Research Conference and Expo 2017; International Ground Source Heat Pump Association; 2017

- [93] W. Choi; H. Kikumoto; R. Ooka; New perspectives in thermal performance test: Cost-effective apparatus and extended data analysis; *Energy Build*; 180; 109-121; 2018
- [94] J. Jia; W. L. Lee; Y. Cheng; Field demonstration of a first constant-temperature thermal response test with both heat injection and extraction for ground source heat pump systems; *Appl Energy*; 249; 79-86; 2019
- [95] M. Aydin; M. Onur; A. Sisman; A new method for analysis of constant-temperature thermal response tests; *Geothermics*; 78; 1-8; 2019
- [96] W. Choi; H. Kikumoto; R. Ooka; Critical comparison between thermal performance test (TPT) and thermal response test (TRT): Differences in heat transfer process and extractable information; *Energy. Conv. And Manag.*; 2019
- [97] P. Oberdorfer; Heat transport phenomena in shallow geothermal boreholes development of a numerical model and a novel extension for the thermal response test method by applying oscillating excitations; *Univ. Göttingen; Göttingen*; 2014
- [98] P. Hakala; S. Vallin; T. Arola; I. Martinkauppi; Novel use of the enhanced thermal response test in crystalline bedrock; *Renew. Energy*; vol. 182; 467-482; 2022
- [99] L. Laloui; A. Rotta Loria; Analysis and Design of Energy Geostructures; Theoretical Essentials and Practical Application; Chapter 9 - Analytical modelling of transient heat transfer; 409-456; 2020
- [100] S. Whitehead; Determining temperature distribution—a contribution to the evaluation of the flow of heat in isotropic media. *Electrician* (1927), pp. 225-226
- [101] H. S. Carslaw; J. C. Jaeger; Conduction of heat in solids; Oxford UK: Clarendon Press; 1946
- [102] L. R. Ingersoll; O. J. Zobel; A. C. Ingersoll; Heat conduction with engineering; geological; and other applications. New York: McGraw-Hill; 1954
- [103] L. Lamarche; B. Beauchamp; A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes; *Energy Build*; 39; 188-198; 2017
- [104] H. Y. Zeng; N. R. Diao; Z. H. Fang; A finite line source model for boreholes in geothermal heat exchangers; *Heat Transf Asian Res*; 31; 558-567; 2002
- [105] J. Raymond; R. Therrien; L. Gosselin; R. Lefebvre; A review of thermal response test analysis using pumping test concepts; *Ground Water*; 49; 932-945; 2011
- [106] J. Acuña; B. Palm; Distributed thermal response tests on pipe-in-pipe borehole heat exchangers; *Appl Energy*; 109; 312-320; 2013
- [107] S. Kavanaugh; Simulation and experimental verification of vertical ground coupled heat pump systems. Ph. D dissertation; Stillwater; Oklahoma State University; 1985
- [108] G. Hellstrom; Ground heat storage: Thermal analyses of duct storagesystems. Sweden: Department of Mathematical Physics University of Lund; 1991
- [109] X. L. Liu; DL. Wang; ZH. Fang; Modeling of heat transfer of a vertical bore inground-source heat pumps; *J Shandong Inst Architect Eng.*; 47-51; 2001
- [110] H. Y. Zeng; N. R. Diao; Z. H. Fang; A finite line-source model for boreholes ingeothermal heat exchangers; *Heat Transfer Asian Res.*; 558-67; 2002
- [111] J. E. Bose; J. D. Parker; F. C. McQuiston; Design data manual for closed-loop ground coupled heat pump systems. Oklahoma State Univ. for ASHRAE; 1985
- [112] L. R. Ingersoll; O. J. Zobel; A. C. Ingersoll; Heat conduction with engineering; Geological; and other applications; New York: McGraw-Hill; 1954
- [113] D. P. Hart; R. Couvillion; Earth coupled heat transfer. Publication of the National Water Well Association; 1986.

- [114] G. Hellström; B. Sanner; PC-programs and modelling for borehole heat exchanger design; International Geothermal Days Germany; 2001
- [115] F. Tang; H. Nowamooz; Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger; Energy Conv.and Manag.; Vol.181; 571-583; 2019
- [116] W. Choi; R. Choudhary; R. Ooka; Development of chiller-attached apparatus for accurate initial ground temperature measurement: Insights from global sensitivity analysis of thermal response tests; Energy and Buildings; vol. 238; 2021
- [117] P. Pasquier; D. Marcotte; Joint Use of Quasi-3D Response Model and Spectral Method to Simulate Borehole Heat Exchanger; Geothermics; 2013
- [118] J. Claesson; P. Eskilson; PC Design Model for Heat Extraction Boreholes. - Proc.4th Int. Conf. Energy Storage; 135-137; 1988
- [119] A.A. Serageldin; Y. Sakata; T.Katsura; K. Nagano; Thermo-hydraulic performance of the U-tube borehole heat exchanger with a novel oval cross-section: Numerical approach; Energy; Conv. And Manag.; vol. 177; 406-415; 2018
- [120] G. Brunettia; H. Saitob; T. Saitoc; J. Šimůnek; A computationally efficient pseudo-3D model for the numerical analysis of borehole heat exchangers; App. Energy; vol. 208; 1113-1127; 2017
- [121] L. Guo; J. Zhang; Y. Li; J. McLennan; Y. Zhang; H. Jiang; Experimental and numerical investigation of the influence of groundwater flow on the borehole heat exchanger performance: A case study from Tangshan; China; Energy and Build.; vol. 248; 2021
- [122] E. D. Kerme; A. S. Fung; Heat transfer simulation; analysis and performance study of single U-tube borehole heat exchanger; Renew. Energy; vol. 145; 1430-1448; 2020
- [123] C. Zhang; X. Wang; P. Sun; X. Kong S. Sun; Effect of depth and fluid flow rate on estimate for borehole thermal resistance of single U-pipe borehole heat exchanger; Renew. Energy; vol. 147; 2399-2408; 2020
- [124] X. Yu; H. Li; S. Yao; V. Nielsen; A. Heller; Development of an efficient numerical model and analysis of heat transfer performance for borehole heat exchanger; Renew. Energy; vol. 152; 189-197; 2020
- [125] V. Wagner; P. Bayer; M. Kübert; P. Blum; Numerical sensitivity study of thermal response tests; Renew. Energy; vol. 41; 245-253; 2012
- [126] X. Lei; X. Zheng; C. Duan; J. Ye; K. Liu; Three-Dimensional Numerical Simulation of Geothermal Field of Buried Pipe Group Coupled with Heat and Permeable Groundwater; Energies; 2019
- [127] A. Sapińska-Śliwa; T. Śliwa; K. Twardowski; K. Szymiski; A. Gonet; P. Żuk; Method of Averaging the Effective Thermal Conductivity Based on Thermal Response Tests of Borehole Heat Exchangers; Energies; 13; 2020
- [128] K. Zhou; J. Mao; Y. Li; H.Zhang; C. Li; A numerical investigation to analyze the effect of changing ambient conditions on accurate and stable identification of thermal conductivity of ground source heat pump system using thermal response test; Sust. Energy Tech. and Assessments; vol. 46; 2021
- [129] W. Choi; H. Kikumoto; R. Choudhary; R. Ooka; Bayesian inference for thermal response test parameter estimation and uncertainty assessment; App. Energy; vol. 209; 306-321; 2018
- [130] R. Al-Khoury; T. Kölbl; R. Schramedei; Efficient numerical modelling of borehole heat exchangers; Computers and Geosciences; 2009

- [131] M. Janiszewski; E. Caballero Hernández; T. Siren; L. Uotinen; I. Kukkonen; M. Rinne; In Situ Experiment and Numerical Model Validation of a Borehole Heat Exchanger in Shallow Hard Crystalline Rock; 2018
- [132] J. Raymond; R. Therrien; L. Gosselin; R. Lefebvre; Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model; *Renew. Energy*; vol. 36; 315-324; 2011
- [133] A. Cazorla-Marín; C. Montagud-Montalv'a; J. Miguel Corber'an; A. Montero; T. Magraner; A TRNSYS assisting tool for the estimation of ground thermal properties applied to TRT (thermal response test) data: B2G model; *App. Therm. Eng.*; vol. 185; 2021
- [134] W. Li; J. Dong; Y. Wang; J. Tu; Numerical modeling of thermal response of a ground heat exchanger with single U-shaped tube; *Science and Technology for the Built Environment*; 25:5; 525-533; 2019
- [135] X. Zhang; Z. Han; Q. Ji; H. Zhang; X. Li; Thermal response tests for the identification of soil thermal parameters: A review; *Renew. Energy*; vol. 173; 1123-1135; 2021
- [136] T. Śliwa; P. Leśniak; A. Sapińska-Śliwa; M.A. Rosen; Effective Thermal Conductivity and Borehole Thermal Resistance in Selected Borehole Heat Exchangers for the Same Geology; *Energies* 2022; 15(3); 2021
- [137] R. A. Beier; Soil Thermal Conductivity Tests; Mechanical Engineering Technology Department; Oklahoma State University; 2008
- [138] M. Banjac; M. Todorović; M. Ristanović; R. Galić; Experimental determination of thermal conductivity of soil with a thermal response test; *Thermal Science*; vol. 16; 1117-1126; 2012
- [139] T. Śliwa; A. Gołaś; J. Wołoszyn; A. Gonet; Numerical model of borehole heat exchanger in ansys cfx software; *Arch. Min. Sci.*; Vol. 57; 375-390; 2012
- [140] W. Sobieski; S. Lipiński; W. Dudda; A. Trykozko; M. Marek; J. Wiącek; M. Matyka; J. Gołembiewski; Granularne Ośrodki Porowate; Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn; Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie; Olsztyn; 2016
- [141] Ansys. "ANSYS Meshing User's Guide." Release 13.0 (2010): 724-746.
- [142] C. K. Lee; Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation; *App. Energy*; vol. 88; 4405-4410; 2011
- [143] S. Focaccia; Thermal response test numerical modeling using a dynamic simulator; *Geothermal Energy*; vol. 1; 2013
- [144] E. J. Kim; Development of numerical models of vertical ground heat exchangers and experimental verification: domain decomposition and state model reduction approach. Other [cond-mat.other]. INSA de Lyon; 2011.
- [145] A. Franco; R. Moffat; M. Toledo; P. Herrera; Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles; *Renew. Energy*; vol. 86; 985-992; 2016
- [146] G. Radioti; B. Cerfontaine; R. Charlier; F. Nguyen; Experimental and numerical investigation of a long-duration Thermal Response Test: Borehole Heat Exchanger behaviour and thermal plume in the heterogeneous rock mass; *Geothermics*; vol. 71; 245-258; 2018
- [147] Ansys® Academic Research Mechanical; Release 18.1; Help System; Coupled Field Analysis Guide; ANSYS; Inc.
- [148] G. Jin; X. Zhang; S. Guo; X. Wua; W. Bi; Evaluation and Analysis of Thermal Short-circuiting in Borehole Heat Exchangers *Energy Procedia*; vol. 105; 1677-1682; 2017

- [149] J. Raymond; R. Therrien; L. Gosselin; R. Lefebvre; Numerical analysis of thermal response test with a groundwater flow and heat transfer model; *Renew. Energy*; vol. 36; 315-324; 2011
- [150] PN-EN ISO 12524:2003; Materiały i wyroby budowlane - Właściwości cieplno-wilgotnościowe - Tabelaryczne wartości obliczeniowe; 2003
- [151] PN-EN ISO 6946:1999; Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania; 1999
- [152] PN-B-02020: 1991; Ochrona cieplna budynków -- Wymagania i obliczenia; 1991

Spis tabel

Tabela 1 Parametry termiczne poszczególnych składników złożonego ośrodka gruntowego (na podstawie [24]).	16
Tabela 2 Przewodność cieplna, objętościowa pojemność cieplna oraz dyfuzyjność cieplna dla różnych rodzajów gruntu (na podstawie [27])	17
Tabela 3 Zestawienie wymagań dotyczących procedur wykonywania GWC [28]	19
Tabela 4 Zestawienie podstawowych założeń projektowych dla systemów GWC różnej wielkości	20
Tabela 5 Jednostkowa wydajność cieplna różnych typów gruntu [34]	21
Tabela 6 Profil geologiczny badanego odwiertu oraz zestawienie parametrów fizycznych poszczególnych rodzajów gruntu (na podstawie [28])	42
Tabela 7 Zestawienie przeprowadzonych testów terenowych i ich najważniejsze parametry	43
Tabela 8 Zestawienie elementów pomiarowych	44
Tabela 9. Wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1)	46
Tabela 10. Wyniki estymacji przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1)	47
Tabela 11 Wyniki obliczeń oporu cieplnego odwiertu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1)	48
Tabela 12 Wyniki obliczeń oporu cieplnego odwiertu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 2)	48
Tabela 13. Wyniki estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych	50
Tabela 14. Wyniki estymacji parametrów gruntu na podstawie danych z TESTU 2 (wariant 1 i 2)	54
Tabela 15. Wyniki estymacji efektywnej przewodności cieplnej gruntu na podstawie danych z TESTU 2 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych	56
Tabela 16 Zakresy wartości parametrów siatki numerycznej i odpowiadająca im jakość siatki	64
Tabela 17 Wartość parametrów opisujących jakości siatki numerycznej opracowanego modelu GWC	64
Tabela 18 Parametry domen obliczeniowych	65
Tabela 19 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej odpowiadające warunkom TESTU 1 (wariant 1)	71
Tabela 20 Zestawienie średnich błędów wartości średniej temperatury płynu w GWC wyznaczonej za pomocą modelu numerycznego względem wyznaczonej za pomocą modelu ILS	72
Tabela 21 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego (dla różnych modeli turbulencji) względem wyznaczonych za pomocą modelu ILS	74
Tabela 22 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznych z założeniem różnych kroków czasowych odpowiadające warunkom TESTU 1 (wariant 1)	74
Tabela 23 Zestawienie wariantów analizy: krok czasowy i ilości iteracji	74
Tabela 24 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego (dla różnych kroków czasowych i liczby iteracji) względem wyznaczonych za pomocą modelu ILS	75
Tabela 25 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej odpowiadające warunkom TESTU 1 (wariant 1)	76
Tabela 26 Zestawienie średnich błędów wartości temperatur zasilania, powrotu oraz średnich wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego względem danych pomiarowych (TEST 1, wariant 1)	78
Tabela 27 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej dla czasu testu 2,5 - 72 h (TEST 1, wariant 1)	78
Tabela 28 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznych z założeniem różnych wartości przewodności cieplnej bentonitu (TEST 1, wariant 1)	79

Tabela 29 Zestawienie wariantów analizy: wartości przewodności cieplnej bentonitu _____	79
Tabela 30 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego z założeniem różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu względem danych pomiarowych _____	80
Tabela 31 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznych z uwzględnieniem różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1) _____	81
Tabela 32 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznych z założeniem różnych wartości przewodności cieplnej u-rury (TEST 1, wariant 1) _____	81
Tabela 33 Zestawienie wariantów analizy: wartości przewodności cieplnej u-rury _____	81
Tabela 34 Zestawienie średnich błędów wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego z założeniem różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła u-rury względem danych pomiarowych _____	82
Tabela 35 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznych dla różnych parametrów u-rury dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1) _____	83
Tabela 36 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznych dla różnych danych wejściowych dla czasu testu 2,5 – 72 h (TEST 1, wariant 1) - podsumowanie _____	84
Tabela 37 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej z uwzględnieniem skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (TEST 1, wariant 1) _____	84
Tabela 38 Zestawienie średnich błędów wartości temperatur zasilania, powrotu oraz średnich wyznaczonych za pomocą symulacji numerycznej dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu względem danych pomiarowych (TEST 1, wariant 1) _____	86
Tabela 39 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej dla czasu testu 2,5 – 119 h (TEST 1, wariant 1) ____	87
Tabela 40 Dane wejściowe przyjęte do symulacji numerycznej odpowiadające warunkom TESTU 2 (wariant 1) _____	87
Tabela 41 Zestawienie średnich błędów wartości temperatur zasilania, powrotu oraz średnich wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego względem danych pomiarowych (TEST 2, wariant 1) _____	89
Tabela 42 Zestawienie wartości efektywnej przewodności cieplnej gruntu (λ_{ILS}) oraz oporu cieplnego odwiertu (R_{odw}) wyznaczonych z wykorzystaniem modelu ILS na podstawie danych pomiarowych oraz symulacji numerycznej dla czasu testu 2,5 – 61 h (TEST 2, wariant 1) ____	90
Tabela 43 Macierz symulacji numerycznych _____	93
Tabela 44 Główne dane wejściowe do symulacji i wyniki analizy danych z zastosowaniem modelu ILS__	95
Tabela 45 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów z zadaniem współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu równym $\lambda_g = 1,5 W/(mK)$ _____	96
Tabela 46 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów z zadaniem współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu równym $\lambda_g = 3,5 W/(mK)$ _____	97
Tabela 47 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów uzupełniających z zadaniem współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu równym $\lambda_g = 2,0 W/(mK)$ lub $\lambda_g = 3,5 W/(mK)$ _____	98

Tabela 48 Zestawienie wyników analiz dla wybranych testów uzupełniających z zadany współczynnikiem przewodzenia ciepła u-rury równym $\lambda_r = 0,5 W/(mK)$ lub $\lambda_g =$ $0,33 W/(mK)$ _____	99
Tabela 49 Zestawienie średnich błędów procentowych estymacji współczynnika przewodzenia ciepła gruntu metodą ILS odpowiadających sobie testów dla różnych wartości analizowanych zmiennych _____	100
Tabela 50 Wyniki pierwszej serii obliczeń – przedział czasu od $t_p = \{2,5;5;10;20;30;40;50\}$ h do $t_k = 72$ h _____	102
Tabela 51 Wyniki drugiej serii obliczeń – przedział czasu od $t_p = 2,5$ h do $t_k = \{10;20;30;40;50;60;72\}$ h _____	103
Tabela 52 Wyniki trzeciej serii obliczeń – przedział czasu od $t_p = 5$ h do $t_k = \{10;20;30;40;50;60;72\}$ h	104
Tabela 53 Macierz korelacji między zmiennymi; analiza wykonana dla liczby przypadków wynoszącej 428 _____	114
Tabela 54 Podsumowanie wyników regresji zmiennej zależnej λ_g/λ_b ; $R^2=0,9988$; liczba przypadków 142 (warunki pomijania: $\lambda_g/\lambda_b = 3,5$ lub $t_k - t_p < 24$ lub $t_p < 5$) _____	117
Tabela 55 Zestawienie właściwości wymiennika w analizach dla dodatkowych przedziałów czasowych	118
Tabela 56 Wyniki weryfikacji modelu – wszystkie analizowane przypadki _____	119
Tabela 57 Wyniki weryfikacji modelu – przypadki spełniające kryteria zalecanego obszaru stosowania modelu _____	119

Spis rysunków

Rysunek 1 Schemat budowy pompy ciepła _____	11
Rysunek 2 Nomogramy Johansena (1975) do wyznaczania współczynnika przewodnictwa cieplnego na podstawie gęstości, oraz wilgotności dla gruntów o współczynniku przewodnictwa cieplnego szkieletu ziarnowego; a – niezamarznięty grunt gruboziarnisty, b – zamarznięty grunt gruboziarnisty [26] _____	17
Rysunek 3 Stosunek jednostkowej wydajności cieplnej do współczynnika przewodzenia ciepła gruntu wg PORT PC [28] _____	21
Rysunek 4 Wyniki testu odpowiedzi termicznej _____	34
Rysunek 5 Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) - przygotowanie stanowiska do pomiarów _____	39
Rysunek 6 Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) - przygotowanie stanowiska do transportu _____	40
Rysunek 7 Zaprojektowane i zbudowane w ramach pracy doktorskiej stanowisko badawcze do przeprowadzania testów odpowiedzi termicznej gruntu (TRT) - schemat stanowiska _____	40
Rysunek 8 Profil geologiczny oraz schemat przedstawiający lokalizację badanego odwiertu _____	41
Rysunek 9 Temperatura czynnika na wylocie z wymiennika (T_{pow_1}) w pierwszym etapie TRT (TEST 1) _____	44
Rysunek 10 Zmiany temperatur w trakcie TESTU 1 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła) _____	45
Rysunek 11 Moc cieplna dostarczana do odwiertu oraz przepływ czynnika w trakcie TESTU 1 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pom. w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pom. w pom. techn. pompy ciepła) _____	45
Rysunek 12 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu odpowiadającą okresowi testu 2,5 – 119 h _____	46
Rysunek 13 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 2) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu odpowiadającą okresowi testu 2,5 - 119 h _____	47
Rysunek 14 Wyznaczenie ekstrapolowanej średniej temp. płynu w pierwszej godzinie TESTU 1 (wariant 1) _____	48
Rysunek 15 Wyznaczenie ekstrapolowanej średniej temp. płynu w pierwszej godzinie TESTU 1 (wariant 2) _____	49
Rysunek 16 Porównanie zmierzonej i wyznaczonej na podstawie modelu ILS średniej temperatury płynu w GWC dla warunków TESTU 1 (wariant 1) _____	50
Rysunek 17 Wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu λ_{ILS_t} wyznaczone na podstawie danych z TESTU 1 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych _____	51
Rysunek 18 Temperatura czynnika na wylocie z wymiennika T_{pow_1} w pierwszym etapie TRT (TEST 2) _____	52
Rysunek 19 Zmiany temperatur w trakcie TESTU 2 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pomiarowych w pomieszczeniu technicznym pompy ciepła) _____	52
Rysunek 20 Moc cieplna dostarczana do odwiertu oraz przepływ czynnika w trakcie TESTU 1 dla wariantu 1 (lokalizacja urządzeń pom. w studni) i wariantu 2 (lokalizacja urządzeń pom. w pom. techn. pompy ciepła) _____	53

Rysunek 21 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1 i 2) w funkcji $\ln(t)$ wraz z liniami trendu odpowiadającymi okresowi testu 2,5 - 61 h	54
Rysunek 22 Porównanie zmierzonej i wyznaczonej na podstawie modelu ILS średniej temperatury płynu w GWC dla warunków TESTU 2 (wariant 1)	55
Rysunek 23 Wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu λ_{ILS_t} wyznaczona na podstawie danych z TESTU 2 (wariant 1) w zależności od przedziału czasu przyjętego w analizie danych	56
Rysunek 24 Geometria modelu numerycznego gruntowego wymiennika ciepła	61
Rysunek 25 Rozkład temperatury gruntu po 120 godzinach trwania TRT na głębokościach 1m, 40 m i 78 m	62
Rysunek 26 Siatka numeryczna opracowanego modelu numerycznego gruntowego wymiennika ciepła: a) górna powierzchnia wymiennika, b) górna powierzchnia bentonitu z ramionami u-rury, c) symetria modelu d) symetria modelu – zbliżenie, e) dolna powierzchnia wymiennika, f) symetria dna odwiertu	63
Rysunek 27 Schemat powierzchni modelu numerycznego, na których zdefiniowano warunki brzegowe modelu	66
Rysunek 28 Proces tworzenia zdefiniowanej funkcji użytkownika	68
Rysunek 29 Schemat blokowy zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej symulacji numerycznych TRT	69
Rysunek 30 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie modelu ILS ($T_{\acute{s}r_ILS}$) oraz modelu numerycznego ($T_{\acute{s}r_num}$)	72
Rysunek 31 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie modelu ILS ($T_{\acute{s}r_ILS}$) oraz modelu numerycznego z założeniem różnych modeli turbulencji	73
Rysunek 32 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w GWC wyznaczonych na podstawie modelu ILS ($T_{\acute{s}r_ILS}$) oraz modelu numerycznego z założeniem różnych kroków czasowych i ilości iteracji	75
Rysunek 33 Porównanie mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu w trakcie TESTU 1 (warunki 1): wyniki pomiarów (Q_1) oraz symulacji numerycznej (Q_{num})	76
Rysunek 34 Porównanie wartości temperatur zasilania i powrotu czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (warunki 1): wyniki pomiarów (T_1) oraz symulacji numerycznej T_{num}	77
Rysunek 35 Porównanie wartości średnich temperatur czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów ($T_{\acute{s}r_1}$) oraz symulacji numerycznej $T_{\acute{s}r_num}$	77
Rysunek 36 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 72 h: wyniki pomiarów ($T_{\acute{s}r_1}$) oraz symulacji numerycznej $T_{\acute{s}r_num}$	78
Rysunek 37 Porównanie wartości średnich temperatur płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów ($T_{\acute{s}r_1}$) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości przewodności cieplnej bentonitu $T_{\acute{s}r_num}$	79
Rysunek 38 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 72 h: wyniki pomiarów ($T_{\acute{s}r_1}$) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości współczynnika przewodzenia ciepła bentonitu ($T_{\acute{s}r_num}$)	80
Rysunek 39 Porównanie wartości średnich temperatury płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów ($T_{\acute{s}r_1}$) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości parametrów u-rury ($T_{\acute{s}r_num}$)	82
Rysunek 40 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 72 h: wyniki pomiarów ($T_{\acute{s}r_1}$) oraz symulacji numerycznych dla różnych wartości parametrów u-rury ($T_{\acute{s}r_num}$)	83
Rysunek 41 Porównanie wartości temperatur zasilania i powrotu czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (warunki 1): wyniki pomiarów (T_1) oraz symulacji numerycznej T_{num} dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu	85

Rysunek 42 Porównanie wartości średnich temperatur czynnika roboczego w trakcie TESTU 1 (wariant 1): wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu _____	85
Rysunek 43 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 1 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 119 h: wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej dla skorygowanej wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu (T_{sr_num}) _____	86
Rysunek 44 Porównanie mocy grzewczej dostarczanej do odwiertu w trakcie TESTU 2 (warunki 1): wyniki pomiarów (Q_1) oraz symulacji numerycznej (Q_{num}) _____	88
Rysunek 45 Porównanie wartości temperatur zasilania i powrotu czynnika roboczego w trakcie TESTU 2 (warunki 1): wyniki pomiarów (T_1) oraz symulacji numerycznej T_{num} _____	88
Rysunek 46 Porównanie wartości średnich temperatur czynnika roboczego w trakcie TESTU 2 (wariant 1): wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej T_{sr_num} _____	89
Rysunek 47 Średnia temperatura płynu w trakcie TESTU 2 (wariant 1) w funkcji $\ln(t)$ wraz z linią trendu dla okresu czasu testu 2,5 – 61 h: wyniki pomiarów (T_{sr_1}) oraz symulacji numerycznej T_{sr_num} _____	90
Rysunek 48 Zestawienie procentowego błędu estymacji (PE) w zależności od stosunku λ_g/λ_b dla wszystkich 33 symulacji numerycznych _____	100
Rysunek 49 Procentowe błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła dla danych z przedziałów czasu o zmiennym początku (t_p) i stałym końcu $t_k = 72$ h; $Q = 6$ kW, $V = 1$ m ³ /h, $\lambda_r = 0,5$ W/(mK) _____	105
Rysunek 50 Zależność błędów procentowych (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS od stosunku λ_g/λ_b dla wybranych z serii 1 przedziałów czasowych; $Q = 6$ kW, $V = 1$ m ³ /h, $\lambda_r = 0,5$ W/(mK) _____	106
Rysunek 51 Procentowe błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła dla danych z przedziałów czasu o stałym początku $t_p = 2,5$ h i zmiennym końcu (t_k); $Q = 6$ kW, $V = 1$ m ³ /h, $\lambda_r = 0,5$ W/(mK) _____	107
Rysunek 52 Zależność błędów procentowych (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS od stosunku λ_g/λ_b dla wybranych z serii 2 przedziałów czasowych; $Q = 6$ kW, $V = 1$ m ³ /h, $\lambda_r = 0,5$ W/(mK) _____	108
Rysunek 53 Procentowe błędy estymacji współczynnika przewodzenia ciepła dla danych z przedziałów czasu o stałym początku $t_p = 5$ h i zmiennym końcu (t_k); $Q = 6$ kW, $V = 1$ m ³ /h, $\lambda_r = 0,5$ W/(mK) _____	109
Rysunek 54 Zależność błędów procentowych (PE) estymacji współczynnika przewodzenia ciepła metodą ILS od stosunku λ_g/λ_b dla wybranych z serii 3 przedziałów czasowych; $Q = 6$ kW, $V = 1$ m ³ /h, $\lambda_r = 0,5$ W/(mK) _____	110
Rysunek 55 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b); korelacja między zmiennymi 0,9910; liczba przypadków 428 _____	114
Rysunek 56 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b) z podziałem na przedziały czasowe; analiza danych dla początku przedziału 2,5 h i zmiennej wartości końca przedziału czasu od 10 do 72h _____	115
Rysunek 57 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b) z podziałem na przedziały czasowe; analiza danych dla stałego początku przedziału czasu 2,5 h i zmiennej wartości końca przedziału czasu od 10 do 72 h _____	115
Rysunek 58 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b) z podziałem na przedziały czasowe; analiza danych dla stałego początku przedziału czasu 5 h i zmiennej wartości końca przedziału czasu od 10 do 72 h _____	116
Rysunek 59 Wykres rozrzutu zmiennej zależnej (λ_g/λ_b) względem niezależnej (λ_{ILS}/λ_b); korelacja między zmiennymi 0,9968; liczba przypadków 365 _____	117