WSPÓŁCZESNE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE PIONOWYCH SOND GRUNTOWYCH DLA SPRĘŻARKOWYCH POMP CIEPŁA

mgr inż. Michał WAJMAN
Wydz. Mechaniczny
Politechnika Gdańska
www.sondygruntowe.pl

W nie tak znowu odległych czasach, w których pionowe wymienniki ciepła dopiero rozpoczynały swoją walkę o zaufanie na światowym rynku odnawialnych źródeł energii, trudno byłoby rozmawiać o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Współcześnie, pomimo, że istnieje już wiele projektów sond gruntowych, które różnią się w sposób znaczny pod względem zachodzącego procesu wymiany ciepła, wciąż w rzeczywistości branżowej niepodzielnie prym wiodą sondy typu „U-rura". W szczególności można mówić tu o rzeczywistości polskiej, gdzie inne, alternatywne konstrukcje praktycznie istnieją tylko i wyłącznie w ośrodkach badawczych lub placówkach naukowych. Choć instalacji sprężarkowych pomp ciepła wykorzystujących wymiennik gruntowy w Polsce wciąż nie jest zbyt wiele, co związane jest niestety z dosyć małą popularnością tej formy uzyskiwania ciepła, wprowadzanie nowych, bardziej efektywnych konstrukcji sond gruntowych lub ulepszanie starych jest jak najbardziej uzasadnione. Szacuje się, że zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy gruntem a temperaturą parowania pompy ciepła o 3*K* spowoduje zwiększenie współczynnika efektywności grzewczej COP o 8 - 10% [1]. Przyjmując za punkt odniesienia skalę kraju, ilość energii, którą można byłoby zaoszczędzić przy ok. 20 tys. tego typu urządzeń obecnie działających w Polsce, na pewno nie byłaby mała.

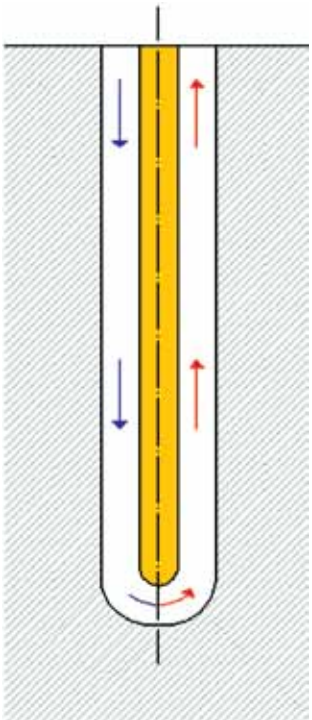
Jedną z pierwszych narodowości, która wpadła na to, jak duży potencjał drzemie w pionowych wymiennikach gruntowych byli Szwedzi. Od roku 2006 na KTH Royal Institute of Technology prowadzą oni projekt finansowany przez Szwedzką Agencję Energetyczną (The Swedish Energy Agency) i licznych parterów przemysłowych. Projekt nosi nazwę *Efficient Use of Energy Wells for Heat Pumps*, co na nasz ojczysty język w wolnym tłumaczeniu oznacza „Efektywne wykorzystywanie pionowych wymienników ciepła dla sprężarkowych pomp ciepła" [7]. Po około 6 latach trwania projektu wyniki są bardzo zadowalające – zwiększenie współczynnika COP o wcześniej wspomnianą wartość jest jak najbardziej możliwe. Przy szwedzkich realiach, gdzie zainstalowane w kraju pompy ciepła posiadają obecnie sumaryczną moc grzewczą na poziomie około 6 *TWh* energii, szacuje się, że pozwoli to na oszczędność 0,2 - 0,4 *TWh* energii elektrycznej w skali roku [1].

Ogólnie rozróżnia się dwa główne rodzaje sond. Pierwszą z nich jest wspomniana wcześniej, standardowa sonda typu „U" („U-rura"). Drugą natomiast jest sonda typu „rura w rurze" (lub inaczej nazywana współosiową). Występują w nich różnorodne pola temperatur nośnika ciepła, co ma zasadniczy wpływ na temperaturę wyjściową płynu pośredniczącego, a tym samym na osiągany współczynnik efektywności grzewczej pompy COP. W artykule przedstawiony zostanie szereg nowoczesnych konstrukcji bazujących na opisanych dwóch głównych rodzajach pionowych wymienników, a również i ich porównanie.

PIONOWY WYMIENNIK GRUNTOWY TYPU „ U - -RURA"

Wymiennik pionowy typu „U-rura" (w języku ang. *U-pipe* lub *U-loop*) jest podstawowym typem konstrukcyjnym spotykanych wymienników na całym świecie, głównie z powodu swojej bardzo prostej budowy i niskiej ceny. Jest on zazwyczaj wykonywany z dwóch rur polietylenowych, połączonych na dnie za pomocą dwóch kolanek, sumarycznie przypominając literę „U". Nośnik ciepła przepływa przez rury w dół i w górę, przejmując po drodze ciepło od otaczającego gruntu (Rys. 1). Normalną wartością jego strumienia objętościowego jest liczba, która zapewnia 3 *K* różnicy temperatur pomiędzy wlotem a wylotem płynu z sondy [9]. Jest to ściśle związane z rodzajem przepływu, tzn. np. dla wartości 0,5 *l/s* w pionowym wymienniku mamy do czynienia z przepływem turbulentnym, który zapewnia zmniejszenie oporu cieplnego sondy R_{bh}. W przypadku, dla którego zostałby zastosowany mniejszy przepływ dla „U-rury", opór cieplny byłby większy, co w efekcie spowodowałoby obniżenie wyjściowej temperatury cyrkulującego płynu.

Jest oczywiste, że w normalnej „U-rurze" przepływ ciepła występuje nie tylko pomiędzy „nogami" wymiennika a gruntem, ale również pomiędzy samymi jego rurami. Zjawisko to nazywane



Rys. 1 Wymiennik typu „U-rura" podczas procesu przejmowania ciepła z ziemi [11]

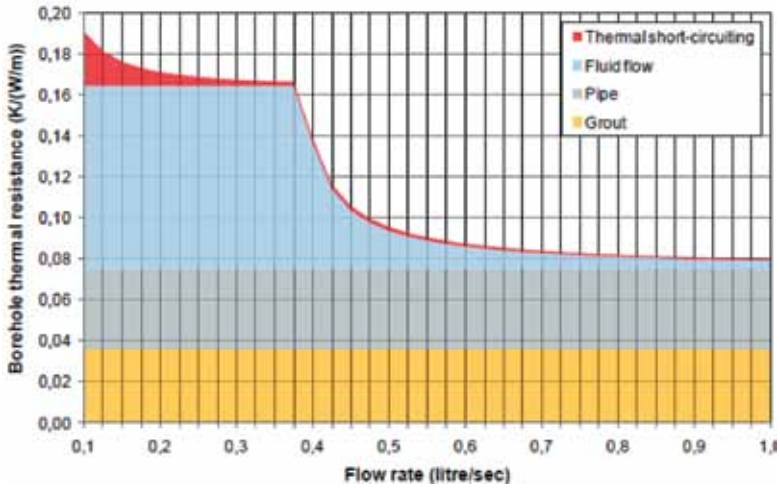
jest **bocznym efektem cieplnym** (w jęz. ang. „thermal shunt effect") i jest ono zdecydowanie niepożądane, w szczególności kiedy ma miejsce sytuacja gdy płyn zmierzający rurą w dół odbiera ciepło od płynu zmierzającego rurą do wyjścia z instalacji gruntowej. Efekt ten jest powodem prowadzonych licznych symulacji i doświadczeń, między innymi oceniających wpływ zachowania odległości pomiędzy poszczególnymi rurami, różnymi pozycjami rur w odwiercie oraz różnymi pozycjami rur względem siebie. Niektóre studia teoretyczne już zaowocowały w zaleceniach, w jaki sposób zjawisko to może zostać ograniczone (między innymi [2]), niestety wciąż sprawą trudną jest zastosowanie wszystkich pomysłów w praktyce, szczególnie tych najbardziej korzystnych. Jest tak z tego względu, że bardzo trudno jest utrzymać tą samą, wymaganą pozycję „nóg" wymiennika pionowego w głąb otworu na całej jego długości.

Na podstawie badań „U-rurowego" wymiennika ciepła Claesson [5] w 1987 roku stwierdził, że przepływ ma bardzo ważne znaczenie i duży wpływ na wartość oporu cieplnego sondy R_{bh}. Na rysunku 2 przedstawiono zależność oporu cieplnego odwiertu i objętościowego natężenia przepływu płynu pośredniczącego. Wartości oporu R_{bh} odnoszące się do standartowych wartości stosowanych w praktyce przepływów nośnika ciepła są równe 0,06 do 0,09 *mK/K* [3].

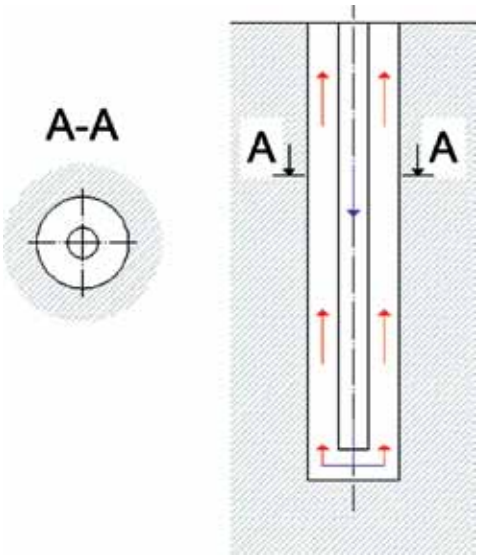
Praca Claesson'a pokazuje, że dla tych samych warunków przepływ turbulentny wykazuje niższą wartość oporu cieplnego, podczas gdy przepływ laminarny – wyższą. Tak więc przepływ turbulentny umożliwia osiągnięcie większej wydajności przez system gruntowej pompy ciepła, jeżeli zapewnia on bardziej efektywną wymianę ciepła pomiędzy płynem a otaczającym gruntem. Jednak w związku z tym, że przepływ turbulentny zachodzi przy wyższych strumieniach przepływającego płynu, oznacza to większe zużycie energii przez pompę cyrkulacyjną oraz większe straty energetyczne. Problem ten stał się przyczyną wynalezienia konstrukcji współosiowej, czyli tzw. wymiennika „rura w rurze".

2 WSPÓŁOSIOWY WYMIENNIK GRUNTOWY („RURA W RURZE")

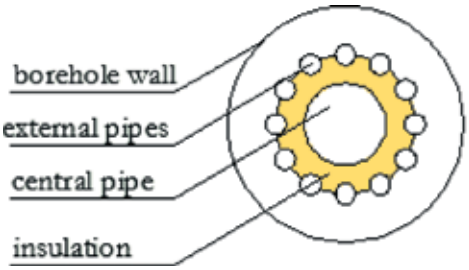
W wymienniku współosiowym zimny lub ciepły płyn pośredniczący przepływa w dół przez jeden lub większą ilość zewnętrznych kanałów pierścieniowych, odbierając lub oddając ciepło z/do gruntu. Na dnie wymiennika płyn przechodzi do kanału wewnętrznego, od tego momentu poruszając się w górę w kierunku parownika pompy ciepła (lub skraplacza). Omawiana konstrukcja umożliwia bezpośredni kontakt ze ścianą odwiertu, a w związku z tym zachodząca



Rys. 2 Zależność oporu cieplnego odwiertu R_{bh} od objętościowego natężenia przepływu płynu pośredniczącego V ˙ [6]. Wykres oparty na badaniach przykładowej „U-rury" o następujących cechach: długość 100 m, rury ϕ 40 x 2,4 mm wykonane z PE, materiał cementujący ulepszony cieplnie, 28 % rozwór wodny etanolu. Odpowiednimi kolorami zaznaczone są wartości poszczególnych oporów: czerwonym – opór cieplny powstały w wyniku zjawiska bocznikowej wymiany ciepła, jasnoniebieskim – opór cieplny pomiędzy płynem a wewnętrzną ścianą rury, fioletowym - opór rury wymiennika, żółtym – opór materiału wypełniającego



Rys. 3 Wymiennik typu współosiowego podczas procesu przejmowania ciepła z ziemi [11]



Rys. 4 Wymiennik typu TIL Thermal Insulated Leg G12 w przekroju [12]; borehole wall – ściana odwiertu, external pipes – kanały (rurki) zewnętrzne, central pipe – rura centralna, insulation – izolacja eliminująca przepływ ciepła między poszczególnymi kanałami przepływowymi

wymiana ciepła jest bardziej intensywna (Rys. 3).

Konstrukcja współosiowa jest próbą zmiany charakteru przepływu z turbulentnego na przepływ laminarny, co umożliwiłoby zmniejszenie zużycia energii i obniżenie strat ciśnienia mających miejsce podczas przepływu. Dzięki temu w wymienniku tego typu następuje lepsze wykorzystanie energii (dla niektórych konstrukcji wymienników współosiowych zużycie energii do zasilania pompy cyrkulacyjnej jest nawet 10 krotnie mniejsze niż dla zwykłej

„U-rury” [9]).

W związku z tym, że efekt bocznej wymiany ciepła w wymienniku współosiowym również występuje, normalnie nawet na większą skalę niż w „U--rurze”, istnieje konieczność zaizolowania rur. Problem ten został skutecznie rozwiązany przez Platella [9], który w 2006 roku zaprojektował wymiennik współosiowy nazywany **„Zaizolowaną Cieplnie Sondą Pionową”** (w jęz. ang. *Thermal Insulated Leg*, tzw. **„TIL”**).

2.1 Wymiennik typu „TIL” (*Thermal Insulated Leg*)

Wymiennik typu „TIL” zbudowany jest z centralnej zaizolowanej rury i kilku do kilkunastu kanałów zewnętrznych, których liczba może być bardzo różna, jednak można dostrzec podstawową zasadę, że im więcej jest tych kanałów, tym korzystniejsza wymiana ciepła zachodzi w wymienniku, oczywiście do pewnego poziomu krytycznego. W sondach typu TIL przenoszenie ciepła pomiędzy ich rurami jest równe zero, zatem efekt bocznej wymiany ciepła został w nich całkowicie wyeliminowany. W „U-rurze” podobna sytuacja zastosowania izolacji, ze względów konstrukcyjnych jest po prostu niemożliwa, ponieważ zaizolowanie jednej z rur spowodowałoby sytuację, w której tylko druga z nich wymieniałaby ciepło z otaczającym gruntem. Rysunek 4 przedstawia prototyp TIL-G12 opisywanego wymiennika współosiowego w przekroju, który w punkcie 3 artykułu zostanie użyty do uproszczonej analizy porównawczej.

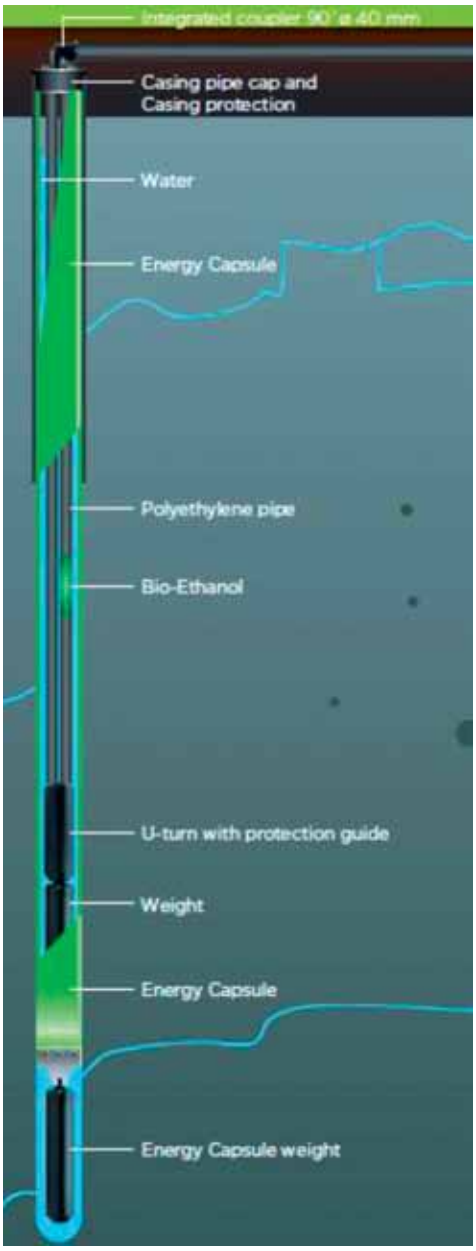
Można zauważyć, że przepływ laminarny płynu pośredniczącego osiągnięty w Zaizolowanej Cieplnie Sondzie ogranicza jego objętościowe natężenie przepływu. W związku z tym, że opór cieplny sondy R_{bh} jest mniejszy w tym typie wymiennika, niż dla standardowej „U-rury” (zazwyczaj wartości osiągane przez TIL'a kształtują się na poziomie 0,01 do 0,03 *K m/W* [3]) i przepływ płynu jest wolniejszy, w związku z tym przejmuje on więcej ciepła od otaczającego gruntu, a zatem system ziemny wykazuje większe różnice temperatur pomiędzy wlotem a wylotem płynu z wymiennika pionowego. Jak zostało to przedstawione przez Platella [9], różnica temperatur może osiągnąć $\Delta T = 6$ *K*, a wszystkie pozytywne czynniki i zalety konstrukcyjne takiego wymiennika w efekcie mogą zapewnić o 70% wyższą wydajność cieplną gruntowej pompy ciepła.

2.2 Współosiowy wymiennik gruntowy w postaci kapsuły energii („Energy Capsule”)

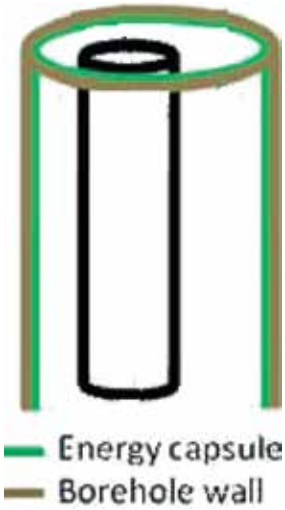
Stosunkowo niedawno na szwedzkim rynku pojawiała się nowoczesna metoda zabezpieczania odwiertu zwana **kapsułami energii** (z języka angielskiego „Energy Capsule”). Kapsuły energii, to plastikowy wąż wykonany z tworzywa sztucznego będący pierwszą zainstalowaną częścią w otworze, przed wprowadzeniem wymiennika. Po wywierceniu otworu, specjalnej konstrukcji ciężar balastowy (oznaczony jako „Energy Capsule Weight” na rysunku 5) przytwierdzony do kapsuły energii w formie złożonej (płaskiej) zostaje umieszczony w odwiercie, wcześniej zabezpieczonym dodatkowym szkieletem wzmacniającym („Casing pipe cap and Casing protection”). Następnie opisywana plastikowa „torebka” jest krok po kroku rozwijana, gdy ciężar stopniowo opuszczany jest w dół otworu. Po zakończeniu tej operacji kapsuła energii jest wypełniana wodą i wymiennik ciepła jest wkładany do jej wnętrza przy pomocy kolejnego ciężaru, tym razem przytwierdzonego do rur wymiennika. Kapsuła po wykonanych zabiegach dokładnie dopasowuje się do otaczającej ją ściany odwiertu (która zwykle ma średnicę 140 *mm*) lub do szkieletu wzmacniającego, dzięki nadciśnieniu hydraulicznemu panującemu w jej wnętrzu.

Choć powyższy opis dotyczy zastosowania kapsuły jako metody uszczelniającej wymiennik pionowy typu „U-rura”, łatwo można wyobrazić sobie sytuację, w której plastikowa torebka nie tylko pełni rolę zabezpieczenia, ale również i kanału zewnętrznego. Taka konstrukcja została po raz pierwszy zaproponowana i przetestowana w Szwecji, co w sposób rozległy opisuje praca J. Acuñy [2]. Instalację wymiennika współosiowego przeprowadzono praktycznie identycznie jak dla przypadku wymiennika typu „U”, z tym, że wewnątrz zamiast dwóch połączonych ze sobą kształtką rur, umieszczono jedną, prostą rurę (Rys. 6).

Niewielka grubość kapsuły (0,4 *mm*) w porównaniu do standardowych ilości stosowanych materiałów uszczelniających i grubości zwykłej rury PE ma



Rys. 5 Sonda typu „U-rura” zabezpieczona kapsułą energii [8]



Rys. 6 Współosiowa sonda w postaci kapsuły energii [2]

widoczny wpływ na wielkości oporu cieplnego uzyskiwanego przez ten typ sondy pionowej. Praktyczne wartości zostaną zaprezentowane w punkcie 3 tego artykułu. W miejscu tym należałoby wspomnieć, że grubość kapsuły niestety nie jest tylko jej zaletą, ale również i wadą. Wpływa ona na ograniczenie zastosowania danej konstrukcji, gdy w miejscu jej zainstalowania wystąpi różnica ciśnień pomiędzy poszczególnymi sekcjami wymiennika wyższa od 1 *bar* [4]. W warunkach Polski, dodatkowym problem może być również zjawisko „puchnięcia" iłów, zachodzące w wymienionym rodzaju gruntu pod wpływem obecności wody, które może spowodować wzrost ciśnienia powyżej wartości, z którą kapsuła energii może sobie poradzić.

3 PRAKTYCZNE PORÓWNANIE WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH PIONOWYCH SOND GRUNTOWYCH

W celu podkreślenia, jak ważny wpływ na parametry pracy sprężarkowej pompy ciepła posiada konstrukcja wymiennika pionowego, poniżej wykonano analizę dla wybranych typów sond. Porównanie zostało wykonane w programie symulacyjnym **EED** (**Earth Energy Designer**) i jest ono częścią pracy magisterskiej wykonanej na KTH Royal Institute of Technology w Szwecji [12]. Symulacje przeprowadzono w oparciu o dane rzeczywistych wartości oporu cieplnego sond R_{bh}, uzyskane z miejsc, gdzie analizowane konstrukcje faktycznie mają swój udział w pobieraniu/oddawaniu ciepła. Do analizy posłużył wybrany budynek (Rys. 7) i jego profil zapotrzebowania na ciepło oraz chłód (tabela 1 i 2) dla danej jego lokalizacji, którą w tym przypadku był Gdańsk.

Tabela 1 Zapotrzebowanie na ciepło i chłód dla przyjętego do analizy budynku [11]

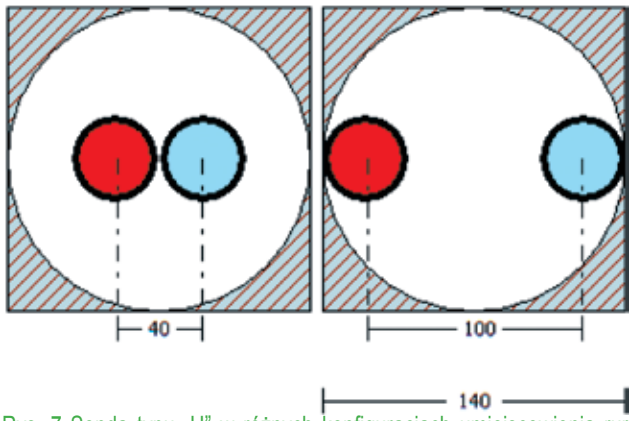
Rodzaj zapotrzebowania:	Ilość [kW]	Roczne zapotrzebowanie energii [MWh]
ciepło (zima)	410	925
ciepło (lato)	160	50
chłód (zima)	90	190
chłód (lato)	330	305

3.1 Konstrukcje bazujące na wymienniku typu „U-rura"

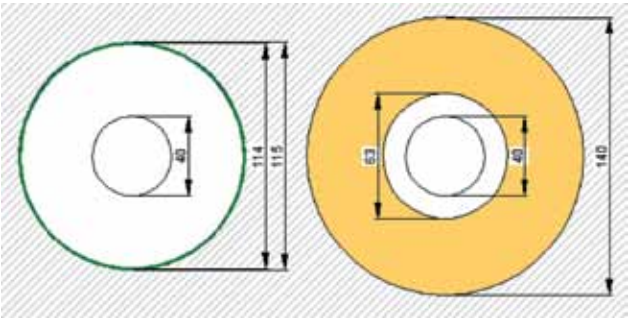
W związku z faktem, że „U-rura" jest dominującym typem wymiennika, metody jej instalacji zostały właściwie perfekcyjnie opanowane. Uzasadnione wydają się więc pomysły bazujące na tej koncepcji i to właśnie ją rozwijające. Przykładami są np. różne umiejscowienia konstrukcji w stosunku do ścian wykonanego odwiertu bądź też zwiększenie odległości pomiędzy obiema rurami wymiennika „U". Bliższy kontakt sondy z gruntem od którego pobiera lub do którego oddaje ona ciepło zmniejsza całkowity opór cieplny R_{bh}, zaś większa odległość pomiędzy rurami ogranicza dodatkowo efekt bocznikowej wymiany ciepła. Obie z sytuacji zostały już przytoczone i objaśnione przez autora w publikacji dotyczącej wymiany ciepła w pionowych sondach gruntowych [10].

W punkcie 3.1 przeanalizowane zostaną dwa różne przypadki dla wymiennika typu „U-rura". Pierwszy z nich dotyczy sytuacji, w której rury są złączone ze sobą i znajdują się w centrum otworu w ziemi, druga natomiast odnosi się do przypad-

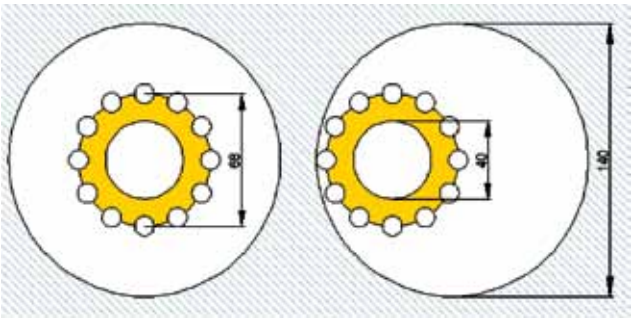
Rys. 7 Widok budynku obranego do analizy [3]



Rys. 7 Sonda typu „U" w różnych konfiguracjach umiejscowienia rur w jej wnętrzu [EED]. Po lewej stronie rury złączone razem w środku, po prawej rury osobno



Rys. 8 Sonda pierścieniowa typu kapsuła energii (z lewej strony) oraz sonda pierścieniowa zapieczętowana zwykłym materiałem cementującym (z prawej), [12]. Kapsuła energii (kolor zielony) ma średnicę 114 mm, podczas gdy średnica odwiertu jest równa 115 mm. Zewnętrza rura wymiennika w jego drugiej konstrukcji, to PE 63 x 2,4 mm



Rys. 9 Sonda współosiowa typu „TIL" w różnych położeniach wewnątrz odwiertu [12]. Po lewej stronie „TIL" w środku otworu, po prawej – „TIL" w pozycji bocznej

Chłodna kalkulacja. Czynniki chłodnicze w ofercie Linde.

Czynniki chłodnicze z Linde to gwarancja wysokiej jakości oraz prawidłowej pracy urządzeń i instalacji, w których je stosujesz. Oferujemy pełny asortyment czynników chłodniczych, zamienników i olejów chłodniczych . Rozbudowana sieć naszych punktów sprzedaży oraz pozycja rynkowa zapewniają stałą dostępność, terminowość dostaw, a przede wszystkim szybką reakcję na Twoje potrzeby.

Linde – ideas become solutions.

Linde Gaz Polska Sp. z o.o., al. Jana Pawła II 41a, 31-864 Kraków
Telefon: +48 12 643 92 00, Fax: +48 12 643 93 00; www.linde-gaz.pl

Tabela 2 Profil procentowego zapotrzebowania na ciepło i chłód dla przyjętego do analizy obiektu w kolejnych miesiącach roku [11]

Rodzaj zapotrzebowania	Sty	Lut	Mar	Kwi	Maj	Czer	Lip	Sie	Wrz	Paź	Lis	Gru	Rocznie
Ciepło	14,7	14	11,9	9,4	6,1	1,7	1,7	1,7	5,8	8,3	11,1	13,6	100
Chłód	6,5	6,5	6,5	6,5	8,5	11,1	12,2	12,4	9,8	7	6,5	6,5	100

ku, w którym rury wymiennika znajdują się na przeciwnych ścianach odwiertu. Obydwa rozwiązania schematycznie pokazano na rysunku 7. Opór cieplny sondy R_{bh} dla poszczególnego umiejscowienia rur jest równy 0,26 *K m/W* dla rur w środku i 0,11 *K m/W* dla rur osobno, podczas gdy odwierty wypełnione są wodą, zaś objętościowy przepływ płynu pośredniczącego jest równy 0,5 *l/s* [3]. Przewodność cieplna wody wypełniającej odwiert została przyjęta na poziomie 0,6 *W/m K*, natomiast kontaktowy opór cieplny zarówno pomiędzy rurami i wodą, a także pomiędzy wodą a ścianą odwiertu jest równy 0. Odwiert ma średnicę 140 *mm*. Sonda typu „U-rura" zbudowana jest z dwóch rur polietylenowych o wymiarach 40 x 2,4 *mm*. Płyn pośredniczący krążący w sondzie pionowej, to 16% roztwór wodny etanolu.

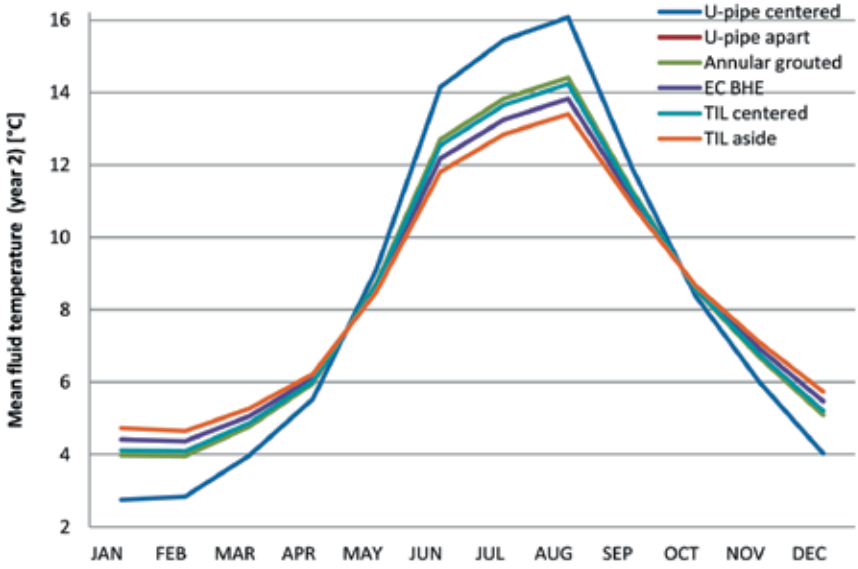
3.2 Konstrukcje bazujące na wymienniku współosiowym

- **Sonda pionowa typu pierścieniowego**

Przez sondę pierścieniową rozumie się tu podstawowy typ konstrukcji współosiowej, tzn. wymiennik, w którym jeden z jego kanałów przepływowych umiejscowiony jest w drugim, większym (Rys. 8). Zostanie przeanalizowana podstawowa koncepcja tego typu sondy, tzn. sytuacja, w której dwie rury PE, jedna w drugiej są zacementowane za pomocą zwykłego materiału cementującego. Następnie zostanie zaprezentowana koncepcja wymiennika pierścieniowego, który składa się z **kapsuły energii** (rozwiązanie przedstawione w punkcie 2.2.). Opory cieplne sond są równe odpowiednio 0,11 *K m/W* [25] i 0,03 *K m/W* [3], podczas gdy przepływ objętościowy nośnika ciepła jest równy 0,5 *l/s*. Oba rozwiązania i ich wymiary zostały przedstawione na rysunku 8. Rura wewnętrzna wymiennika dla obu analizowanych sytuacji, to standardowo rura wykonana z PE o wymiarze 40 x 2,4 *mm*. Dla tych przykładów sond współosiowych woda jest płynem pośredniczącym, odbierającym/oddającym ciepło z/do gruntu.

- **Zaizolowana Cieplnie Sonda Pionowa („TIL")**

Rozważone zostaną dwa możliwe ulokowania wymiennika typu Thermal Insulated Leg. Pierwsze w centrum otworu, natomiast drugie przy jego ścianie. Obydwa przypadki zostały pokazane na rysunku 9. Dla pierwszej rozważanej sytuacji R_{bh} = 0,093 *K m/W*, zaś dla drugiej R_{bh} = 0,018 *K m/W*, gdy natężenie przepływu objętościowego płynu kształtuje się na



Rys. 10 Średnia temperatura płynu pośredniczącego w sondzie pionowej w drugim roku działania gruntowej pompy ciepła w zależności od miesiąca [12]. Kolor niebieski – „U-rura" w centrum, kolor brązowy – „U-rura" osobno, kolor zielony – sonda pierścieniowa zacementowana, kolor fioletowy – sonda pierścieniowa w formie kapsuły energii, kolor jasnoniebieski – „TIL" w centrum, kolor pomarańczowy – „TIL" z boku

poziomie 0,5 *l/s*, a odwiert wypełniony jest wodą gruntową [3]. Średnica otworu w ziemi równa jest 140 *mm*, średnica wewnętrzna rury zaizolowanej jest równa 40 *mm*, zaś średnica zewnętrzna, na której obwodzie umieszczonych jest 12 rurek, każda o średnicy wewnętrznej 12 *mm*, to wartość 68 *mm*. W związku z tym, że sonda pionowa jest wypełniona wodą, sumaryczny kontaktowy opór cieplny przyjęto jako równy zeru. 16% roztwór wodny etanolu jest płynem cyrkulującym w analizowanych typach wymienników.

3.3 Wyniki symulacji i podsumowanie

Po wprowadzeniu wszystkich koniecznych parametrów, program symulacyjny oblicza przebieg średniej temperatury płynu pośredniczącego w okresie zadanych 25 lat. Ponieważ ilość ciepła, która do zespołu sond zostaje oddana z budynku jest większa, od ciepła, które zostaje z gruntu pobrane, po drugim roku pracy pompy ciepła następuje powolny wzrost temperatury płynu. Aby uniezależnić wyniki symulacji od opisanego zjawiska, zostaną one przedstawione tylko dla roku drugiego użytkowania urządzenia.

Jak można zauważyć na rys. 10, zmiana umiejscowienia „U-rury" z pozycji centralnej na pozycję rozdzieloną zapewnia znaczne zyski w osiąganych parametrach. Niestety, w praktyce jest bardzo trudno uzyskać sytuację, w której rury są idealnie oddzielone od siebie w ten sposób, że pozostają w bezpośrednim kontakcie ze ścianą odwiertu. Pomimo tego, jest oczywiste, że każda przestrzeń pomiędzy poszczególnymi „nogami" wymiennika umożliwiająca zredukowanie bocznego efektu cieplnego jest pożądana i powinna być wykonana w maksymalnie możliwym stopniu, odkąd istnieje możliwość, że ulepszona „U-rura" jest w stanie osiągnąć niższy opór cieplny R_{bh}, a więc i korzystniejszą temperaturę płynu pośredniczącego w wymienniku, praktycznie taką samą jak bardziej nowoczesny projekt współosiowy, którym jest typ pierścieniowy.

Doskonalsza konstrukcja sondy pionowej charakteryzująca się niższym oporem cieplnym R_{bh} jest nad wyraz efektywna w trybie chłodniczym pracy gruntowej pompy ciepła. W trybie tym ten sam wymiennik osiąga wyższą wydajność chłodniczą, niż wydajność grzewczą w trybie grzania.

Sonda pionowa typu Thermal Insulated Leg i typ pierścieniowy w formie kapsuły energii zapewniają najkorzystniejsze wartości średnich temperatur płynu pośredniczącego. Gruntowa pompa ciepła współpracująca z tego typu konstrukcjami sond ma najwyższą wydajność, co oznacza najniższe koszty eksploatacyjne systemu podczas pracy tych urządzeń w analizowanym okresie czasu. Dodatkową zaletą sondy typu „kapsuła energii" jest jej niska cena, w związku z tym, że składa się ona tylko z plastikowej „torby" na wymiennik, samego wymiennika w formie jednej rury i jest wypełniona zwykłą wodą. Niestety wykorzystanie wody jako medium pośredniczącego w wymianie ciepła ogranicza stosowanie tego typu konstrukcji w praktyce do obszarów geograficznych, w których temperatura płynu w wymienniku nie spadnie w pobliże temperatury zamarzania wody bądź w miejscach, w których przewidywany jest spadek temperatury płynu pośredniczącego wraz z upływem lat działania pionowego wymiennika gruntowego.

Sonda typu „TIL" jest jedynym wymiennikiem pionowym, który wykazuje bardzo dobre parametry dla swoich dwóch odmiennych lokacji w odwiercie. W rzeczywistości nie istnieje obecnie sposób na jego umiejscowienie tak, aby znajdował się on w bezpośrednim kontakcie ze ścianą otworu, w związku z czym wykonana analiza jest analizą czysto teoretyczną. Pomimo tego średnie temperatury płynu w opisywanym typie sondy gruntowej zdecydowanie będą zawierać się pomiędzy dwoma analizowanymi przypadkami, które prezentują najgorszą i najlepszą możliwą opcję. Najbardziej korzystne wartości liczbowe otrzymane dla wymiennika „TIL" ulokowanego przy ścianie odwiertu spośród wszystkich analizowanych rozwiązań, mówią o konieczność opracowania technologii jego ulokowania w pożądanej pozycji.

Podsumowując, rodzaj konstrukcji sondy pionowej ma znaczący wpływ na uzyskiwany opór cieplny danego typu sondy, co bezpośrednio przekłada się na uzyskiwane przez nią średnie wartości temperatur płynu pośredniczącego, a tym samym i na koszty eksploatacyjne sprężarkowej pompy ciepła. Od samego początku pracy systemu, sonda z mniejszym oporem cieplnym charakteryzuje się wyższą temperaturą dla okresu zimowego i niższą dla okresu letniego, bliżej związaną z temperaturą ściany odwiertu (a więc i temperaturą gruntu). Wydawałoby się więc, że pomimo małej popularności innych typów konstrukcji niż zwykła „U-rura", pożądanym jest zainteresowanie się możliwością ich produkcji na większą skalę pod szerszą dostępność.

BIBLIOGRAFIA

[1] Acuña, J. (2008). *Efficient Use of Energy Wells for Heat Pumps*. Vasa, Finland;

[2] Acuña, J. (2010). *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchanger*. Licentiate Thesis in Energy Technology. Stockholm: KTH, Sweden;

[3] Acuña, J. (2011). Personal contact: jose.acuna@energy.kth.se;

[4] Andersson, O. (2010). *Sealing Bore Holes with Green Collector in Sedimentary Rocks. Results of a Practical Trial in Helsingborg.* Geostrata HB;

[5] Claesson, J, E. P. (1987). *Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies.* Lund: University of Lund, Sweden;

[6] GEOTRAINET (2011). *Geotrainet Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems.* Brussels;

[7] KTH Research Project Database. *Efficient Use of Energy Wells for Heat Pumps.* http://researchprojects.kth.se/index.php/kb_7905/io_10298/io.html;

[8] PEMTEC (2010). *Pemtec Green Collector;*

[9] Platell, P. (2006). *Developing Work on Ground Heat Exchangers*. LOWTE R&D Corporation. Sigtuna, Sweden;

[10] Wajman, M. (2011). *„Podstawy teoretyczne wymiany ciepła w pionowych sondach gruntowych".* Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, Nr 9/2011, str. 438-444;

[11] Wajman, M. (2011). *Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania w systemach ogrzewania i chłodzenia sprężarkowych pomp ciepła, w których źródłem ciepła jest pionowy kolektor gruntowy, w warunkach Polski i Szwecji*. Praca dyplomowa magisterska. Gdańsk: Politechnika Gdańska;

[12] Wajman, M. (2011). *Technical and Economical Analysis of Ground Source Heat Pump Systems with BHE in Poland.* Master of Science Thesis in Energy Technology. Stockholm: KTH, Sweden;