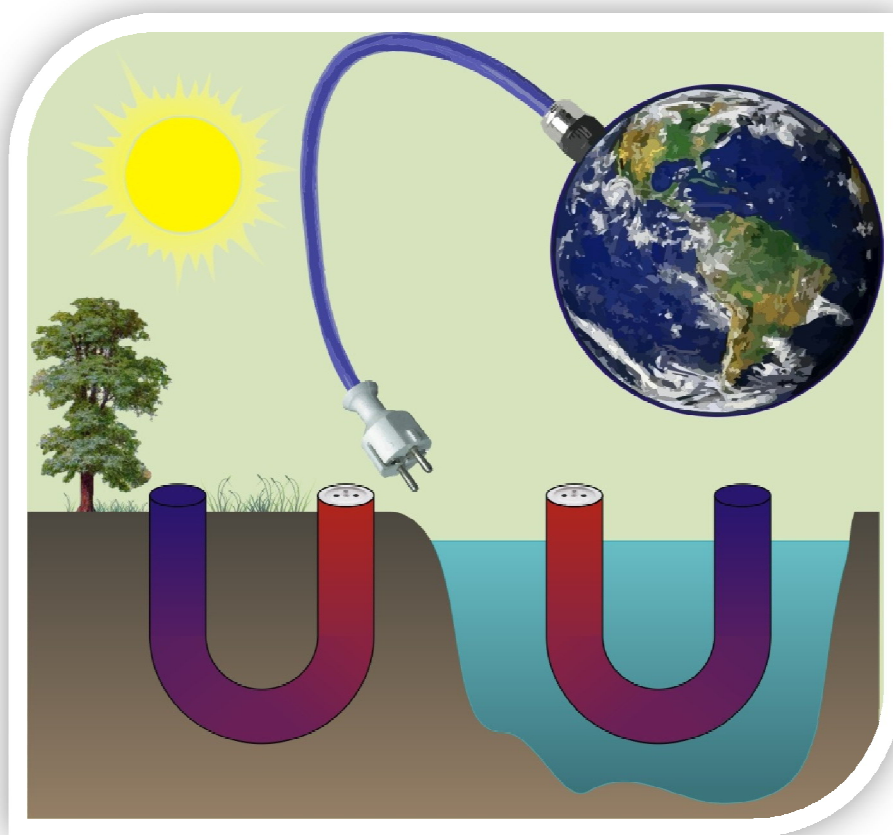


# Rozdział 2

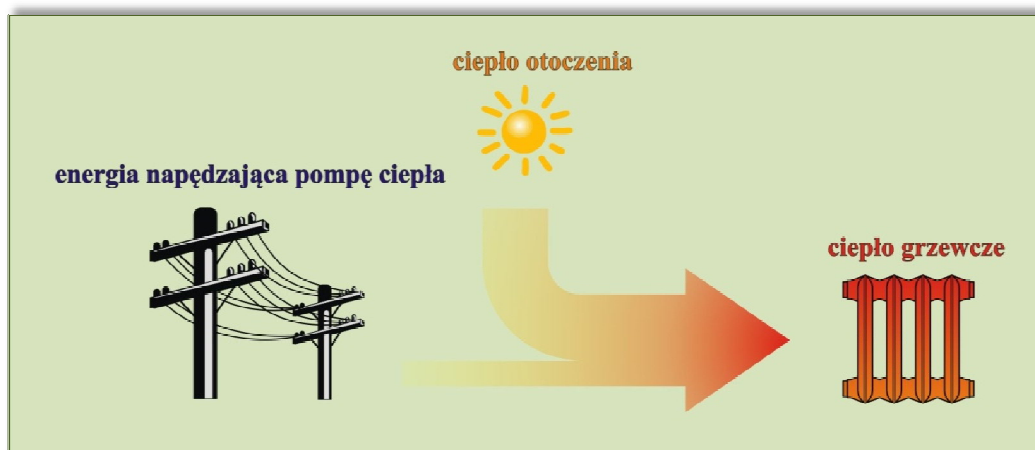
## Pompa ciepła





## 2 POMPY CIEPŁA

Niezależnie od typu konstrukcyjnego, każdą pompę ciepła można traktować jako urządzenie, które przy pomocy energii dodatkowej podnosi temperaturę czynnika roboczego z niskiego na wysoki poziom temperaturowy, umożliwiając praktyczne wykorzystanie ciepła zawartego w czynnik roboczym.



Rys.2.1. Zasada działania pompy ciepła

Pompy ciepła mają zastosowanie w klimatyzacji, systemach centralnego ogrzewania, ogrzewania podłogowego oraz służą do podgrzewania wody użytkowej. Umożliwiają wykorzystanie zasobów energii naturalnej, której źródłem może być powietrze atmosferyczne, grunt, woda powierzchniowa lub podziemna.

### 2.1 ZASADA DZIAŁANIA

W pompie ciepła zachodzi proces podnoszenia potencjału cieplnego, tj. proces pobierania ciepła ze źródła o temperaturze niższej i przekazywania go do źródła o temperaturze wyższej. Samoczynny przepływ ciepła od ciała zimniejszego do cieplejszego nie jest możliwy, dlatego do pompy ciepła trzeba dostarczyć energię napędową. Zależnie od typu konstrukcyjnego względnie zasady pracy można podzielić pompy ciepła na:

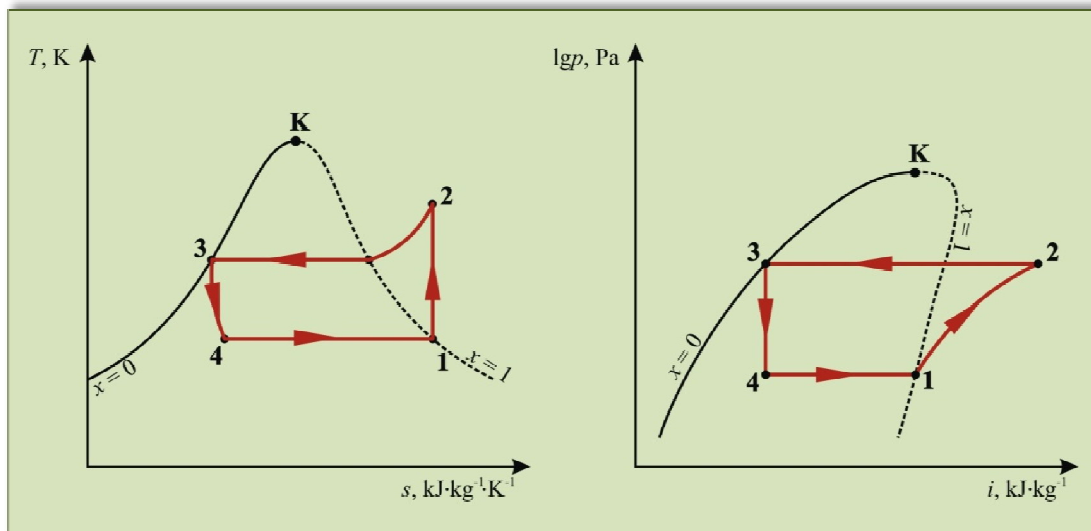
- sprężarkowe,
- sorpcyjne (z podziałem na pompy ciepła absorpcyjne i adsorpcyjne),
- pompy ciepła Vuilleumiera,
- termoelektryczne.

Poniżej zostaną omówione jedynie sprężarkowe i sorpcyjne pompy ciepła (pozostałe są rzadko spotykane).

### 2.1.1 POMPA SPRĘŻARKOWA

Sprężarkowe pompy ciepła są uważane za najdojrzalsze technicznie rozwiązanie i dlatego są najbardziej rozpowszechnione. Ich sposób pracy jest identyczny ze sposobem pracy zwykłej chłodziarki domowej – tylko ze zmienionym celem pracy (grzanie zamiast chłodzenia).

Podstawowe zadanie pompy ciepła, w przypadku pomp sprężarkowych, może być realizowane różnymi sposobami, jednakże najczęściej wykorzystywany jest do tego celu lewobieżny obieg parowy – obieg Lindego (rys.2.2).

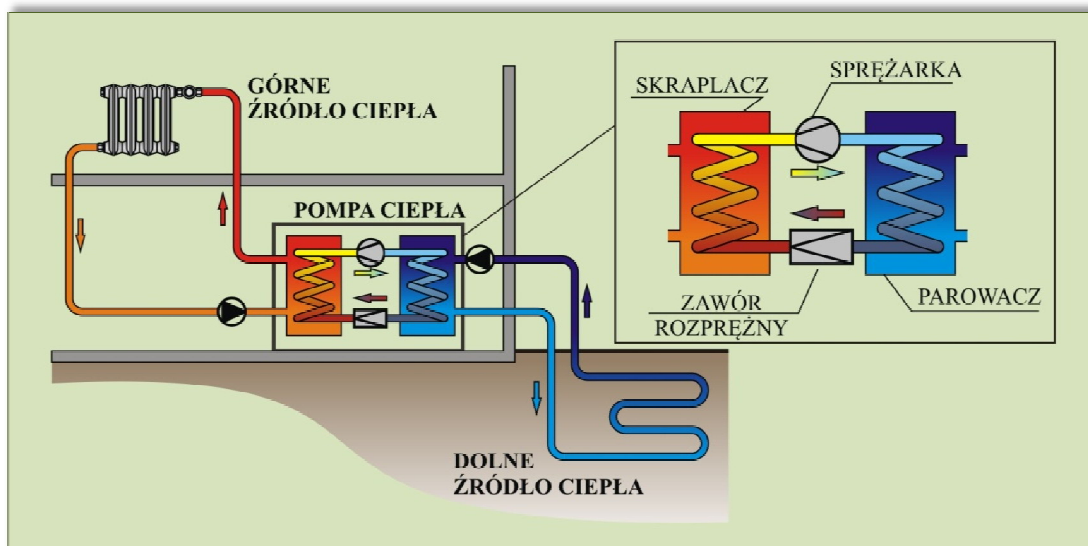


Rys.2.2. Obieg Lindego

W obiegu termodynamicznym pompy ciepła zachodzą w sposób ciągły cztery procesy:

- 1) Czynnik obiegu dolnego źródła, płynąc w wężownicy, odbiera energię cieplną z gruntu, powietrza lub wody.
- 2) W parowaczu (parowniku) pompy podgrzany czynnik obiegu dolnego źródła oddaje ciepło zimnemu czynnikowi chłodniczemu obiegu wewnętrznego pompy ciepła. Czynnik chłodniczy podgrzewa się i odparowuje, stając się gazem.
- 3) Gaz zostaje sprężony przez sprężarkę. Wytworzone w tym procesie ciepło jest przekazywane w skraplaczu do systemu instalacji centralnego ogrzewania budynku.
- 4) Skroplony gaz po przejściu przez zawór rozprężny obniża swoje ciśnienie oraz temperaturę i przepływa do parowacza, gdzie ponownie odbiera ciepło od czynnika obiegu dolnego źródła i proces zaczyna się ponownie.

Schematycznie sprężarkową pompę ciepła przedstawić można tak jak na rys.2.3.



Rys.2.3. Schemat działania systemu z pompą ciepła

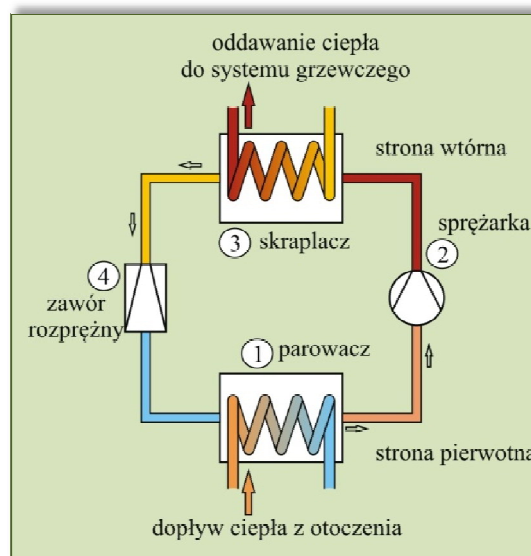
### Elektryczna sprężarkowa pompa ciepła

Przy pobieraniu ciepła ze środowiska czynnik chłodniczy znajduje się pod niskim ciśnieniem po stronie pierwotnej (zimnej) w parowaczu 1 (rys.2.4). Temperatura w parowaczu przekracza temperaturę wrzenia czynnika roboczego przy panującym ciśnieniu (temperatura ta może być nawet niższa od 0°C), wskutek czego czynnik roboczy paruje kosztem ciepła pobranego z otoczenia.

Sprężarka 2 zasysa odparowany czynnik roboczy z parowacza i spręża go; przy tym wzrasta ciśnienie i temperatura par czynnika.

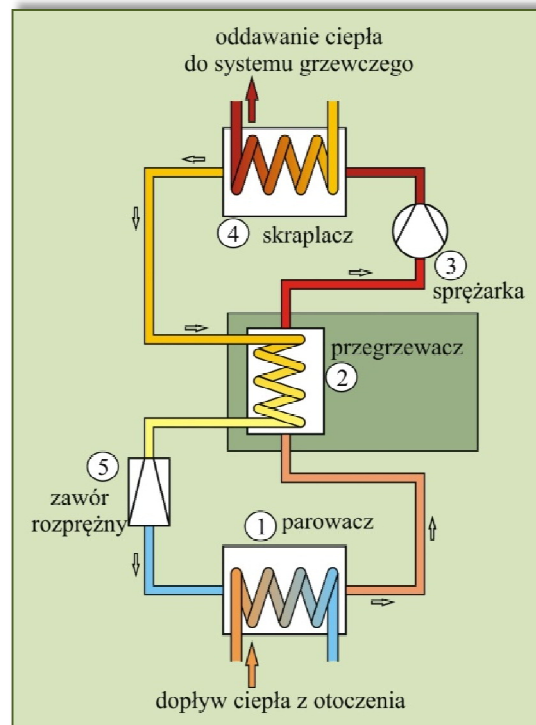
Sprężarka przetłacza pary czynnika na stronę wtórną (gorącą) systemu, do skraplacza 3, który jest omywany wodą grzewczą. Temperatura skraplania czynnika roboczego w stanie gazowym jest jednak wyższa od temperatury wody grzewczej, wskutek czego pary te schładzają się i ponownie skraplają. Ciepło pobrane w parowaczu i dodatkowa energia doprowadzona podczas sprężania zostają przy tym oddane wodzie grzewczej.

Następnie skroplony czynnik poprzez zawór rozprężny 4 wraca do parowacza. Na zaworze rozprężnym czynnik roboczy rozpręża się z wysokiego ciśnienia w skraplaczu do niskiego ciśnienia panującego w parowaczu i obniża swoją temperaturę. W ten sposób obieg zamyka się.



Rys.2.4. Schemat działania pompy ciepła [2]

Pewne czynniki robocze (chłodnicze) np. R 407C są mieszkami trójskładnikowymi. Każdy z tych składników ma własną temperaturę parowania. Aby zagwarantować stuprocentowe odparowanie każdego składnika stosuje się przegrzewacze zasysanego gazu (rys.2.5). Dzięki temu eliminuje się zasysanie cieczy do sprężarki i poprawia się współczynnik efektywności obiegu termodynamicznego. W rozwiązaniu tym ciepło posiadane jeszcze przez czynnik roboczy za skraplaczem wykorzystywane jest w dodatkowym wymienniku ciepła do ostatecznego odparowania czynnika przed sprężarką. Takie przekazanie ciepła powoduje po stronie zimnej wzrost, a po stronie gorącej spadek ciśnienia. Zmniejszenie różnicy ciśnień między stronami powoduje zmniejszenie pracy, jaką musi wykonać sprężarka.



Rys.2.5 Pompa ciepła z wymiennikiem ciepła gazu zasysanego dla przegrzewania czynnika chłodniczego [2]

### Spalinowa sprężarkowa pompa ciepła

Sprężarkowe pompy ciepła mogą być zasadniczo napędzane także gazem ziemnym, olejem napędowym lub biomasą (olej rzepakowy, biogaz). Do napędu sprężarki stosowany jest wtedy silnik spalinowy. Oprócz dodatkowych nakładów, potrzebnych na izolację akustyczną silnika i odprowadzenie spalin konieczna jest w tym wypadku także instalacja zasilania paliwem.

Sprężarkowe pompy ciepła napędzane silnikiem na gaz wykorzystują energię pierwotną lepiej niż elektryczne pompy ciepła, ponieważ ciepło odpadowe z procesu spalania można również wykorzystać jako ciepło grzewcze, podczas gdy w elektrowniach jest ono z reguły oddawane nieużytecznie otoczeniu.

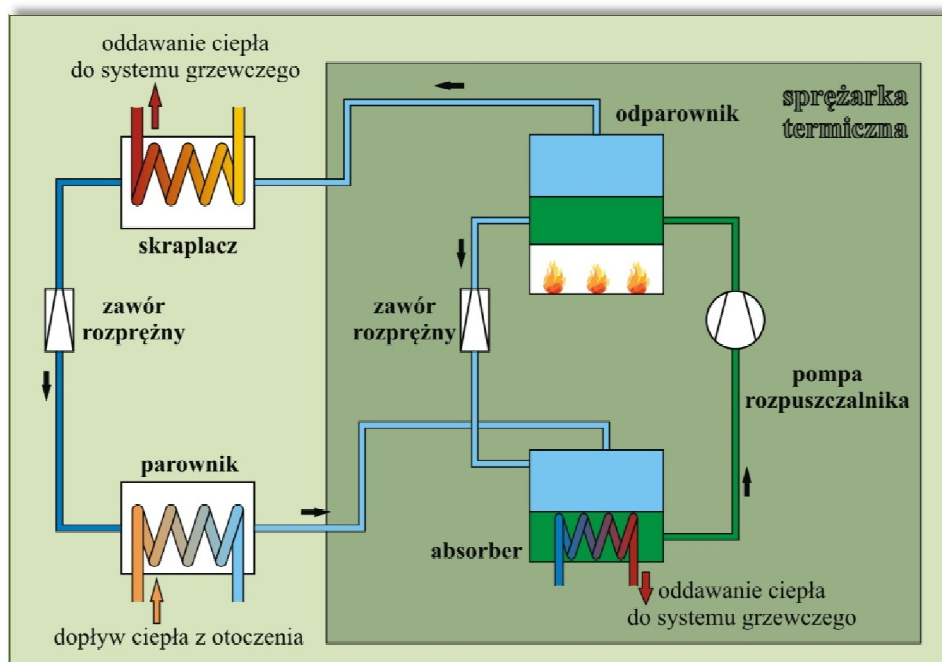
### 2.1.2 POMPA SORPCYJNA

Sorpcja jest to proces fizykochemiczny, w którym określona ciecz lub gaz są wchłaniane przez inną ciecz (absorpcja) lub też zatrzymywane na powierzchni ciała stałego (adsorpcja). Procesy te następują w określonych warunkach w wyniku oddziaływań fizycznych (ciśnienie, temperatura) i są odwracalne. Przykładami takich procesów są np.:

- zaabsorbowany (rozpuszczony) w wodzie mineralnej kwas węglowy, który po otwarciu butelki (zmniejszenie ciśnienia) ponownie się uwalnia,
- odfiltrowywanie zapachów i szkodliwych gazów z powietrza przez węgiel aktywny (adsorpcja).

### 2.1.2.1 POMPA ABSORPCJNA

Absorpcyjne pompy ciepła pracują zazwyczaj wykorzystując energię ze spalania gazu, energię elektryczną oraz energię cieplną z instalacji konwencjonalnej z zastosowaniem sprężarki termicznej. Stosowany jest w nich czynnik roboczy wrzący już w niskich temperaturach i parujący przy niskim poziomie temperatury i ciśnienia z poborem potrzebnej energii z otoczenia. Absorpcyjna pompa ciepła jest to dwuobiegowe urządzenie gdzie oprócz obiegu właściwego dochodzi jeszcze układ sprężarki termicznej. Schemat absorpcyjnej pompy ciepła pokazany jest na rys. 2.6.



Rys.2.6. Schemat absorpcyjnej pompy ciepła [2]

Proces absorpcji (pochłaniania) jest procesem chemicznym. Podstawą dla jego zaistnienia w tego typu układach jest zastosowanie odpowiedniego roztworu dwóch składników. Jeden z nich pełni rolę czynnika chłodniczego, drugi pochłaniacza (absorbenta). Najczęściej stosowany jest roztwór amoniaku  $\text{NH}_3$  (temperatura wrzenia  $33,4^\circ\text{C}$ ) i wody, gdyż amoniak jest dobrym czynnikiem chłodniczym natomiast woda jest znakomitym pochłaniaczem.

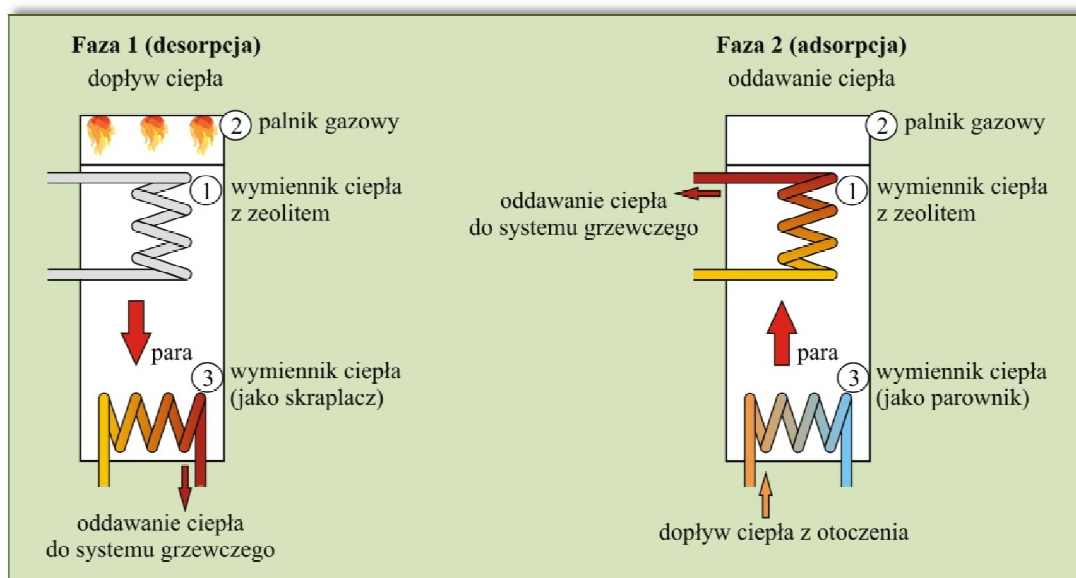
Pary czynnika chłodniczego przepływają do absorbera, gdzie zostają zaabsorbowane (rozpuszczone) przez rozpuszczalnik, oddając przy tym ciepło rozpuszczania. Powstające ciepło zostaje przekazane przez wymiennik ciepła do instalacji grzewczej.

Pompa rozpuszczalnika transportuje roztwór odparownika. Składniki roztworu cechują się przy tym różnymi temperaturami wrzenia i poprzez doprowadzenie ciepła, np. przez palnik gazowy, rozpuszczony czynnik chłodniczy, mający w tym roztworze niższą temperaturę wrzenia, zostanie „wypędzony” tzn. odparowany z roztworu.

Posiadające teraz wysoki poziom ciśnienia i temperatury pary czynnika chłodniczego przepływają do skraplacza i skraplają się, oddając ciepło kondensacji, które przekazywane jest instalacji grzewczej. Ciekły czynnik chłodniczy rozpręża się w zaworze rozprężnym, wracając do pierwotnego poziomu temperatury i ciśnienia. W „obiegu sprężarkowym” podobnie dzieje się z rozpuszczalnikiem.

### 2.1.2.2 POMPA ADSORPCYJNA

Adsorpcyjna pompa ciepła pracuje z zastosowaniem ciał stałych, np. węgla aktywnego, żelu krzemionkowego lub zeolitu. Mineral zeolit – ma właściwość wsysania pary wodnej, wiązania jej z sobą (adsorpcji) z oddawaniem przy tym ciepła na poziomie temperaturowym do ok. 300°C. Mówi się w takich wypadkach o reakcji egzotermicznej.



Rys.2.7. Sposób działania adsorpcyjnej pompy ciepła [2]

Pompa ta pracuje okresowo. Warunkiem działania adsorpcyjnej pompy ciepła jest system próżniowy. W pierwszej fazie (tzw. fazie desorpcji) do wymiennika ciepła 1 (rys.2.7), pokrytego żelem krzemionkowym lub zeolitem, doprowadza się ciepło, np. z palnika gazowego 2. Wskutek tego woda związana z tym ciałem stałym zostaje uwolniona jako para i przepływa do drugiego wymiennika ciepła 3. Ten wymiennik ciepła pełni podwójną funkcję ale w pierwszej fazie oddaje systemowi grzewczemu ciepło powstające przy kondensacji pary wodnej. Faza ta kończy się z chwilą gdy zeolit nie zawiera już wody i został osuszony do pożądanego stopnia, a para została skroplona w drugim wymienniku ciepła. W tym momencie palnik zostaje wyłączony.



W fazie drugiej wymiennik ciepła 3 działa już jako parowacz, przekazujący wodzie ciepło ze środowiska. Ponieważ w tej fazie panują w systemie ciśnienia bezwzględne ok. 6 bar, czynnik roboczy czyli woda pod wpływem ciepła ze środowiska paruje. Para wodna przepływa z powrotem do wymiennika ciepła 1 i zostaje tam znowu wchłonięta (zaadsorbowana) przez żel krzemionkowy lub zeolit. Ciepło, oddawane przy tym przez żel krzemionkowy lub zeolit jest przekazywane poprzez wymiennik ciepła 1 do systemu grzewczego. Po całkowitym zaadsorbowaniu pary wodnej pełny cykl pracy adsorpcyjnej pompy ciepła zostaje zakończony.

## 2.2 ŹRÓDŁA CIEPŁA NISKOTEMPERATUROWEGO

Źródło dostarczające ciepło niskotemperaturowe potrzebne do odparowania czynnika roboczego w parowaczu pompy ciepła powinno charakteryzować się następującymi cechami:

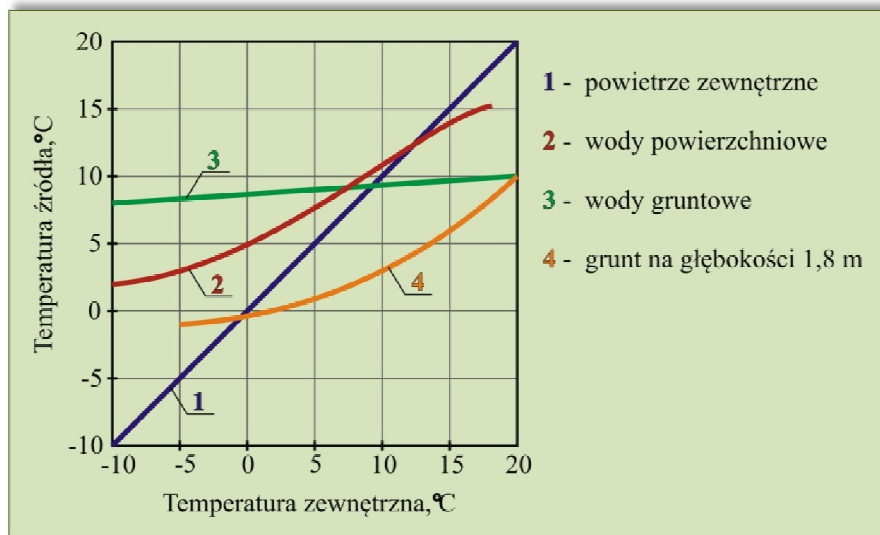
- dużą pojemnością cieplną,
- możliwie wysoką stałą temperaturą
- brakami zanieczyszczeń powodujących korozję elementów instalacji oraz powstawanie osadów,
- łatwą dostępnością i niskimi kosztami instalacji służącej do pozyskiwania i transportu ciepła.



Rys.2.8. Klasyfikacja źródeł ciepła niskotemperaturowego do zasilania parowaczy pomp ciepła

Ogólny podział źródeł ciepła niskotemperaturowego, które mogą być wykorzystane do zasilania parowaczy pomp ciepła pokazano na rysunku 2.8. Źródła te mogą być wykorzystywane pojedynczo (układy monowalentne) lub mogą być tworzone układy zasilane z wielu, choć przeważnie dwóch źródeł (układy biwalentne). Układy biwalentne stosowane są w warunkach gdy jedno źródło ma niewystarczającą moc lub jego temperatura ulega zbyt dużym zmianom w czasie.

Ogólnie można stwierdzić, że temperatura źródła i jej zmiany są istotną cechą wpływającą na współczynnik wydajności grzejnej pompy ciepła. Im temperatura źródła wyższa, tym większa jest spraw



Rys.2.9. Zmienność temperatury źródeł ciepła niskotemperaturowego w zależności od temperatury zewnętrznej [1].

Temperatura źródeł naturalnych zależy zarówno od ich rodzaju, jak i pory roku. Natomiast temperatura ciepła odpadowego (źródło sztuczne) charakteryzuje się wartością wynikającą z przebiegu procesu technologicznego i na ogół nie zależy ona od pory roku. Zmienność temperatury dolnego źródła ciepła w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego przedstawia rys. 2.9.

W przypadku pomp ciepła zasilających instalacje centralnego ogrzewania istotna jest kompatybilność temperatury źródła z konieczną mocą grzejną pompy ciepła. W sezonie grzewczym występuje zmienne zapotrzebowanie na ciepło, przy czym temperatura większości naturalnych źródeł ciepła niskotemperaturowego nie jest kompatybilna, tzn. przy szczytowym zapotrzebowaniu na moc cieplną do ogrzewania jest ona najniższa, co powoduje zmniejszenie efektywnej mocy pompy ciepła. Najbardziej kompatybilnymi są wody podziemne, mniej grunt i wody powierzchniowe, a najmniej powietrze zewnętrzne.

Moc cieplną  $Q_o$ , którą należy pozyskać ze źródła ciepła niskotemperaturowego, oblicza się ze wzoru:

$$Q_o = Q_g \cdot \frac{\varphi - 1}{\varphi} \quad [\text{kW}]; \quad (2.1)$$

gdzie:

$Q_g$  – moc grzejna pompy ciepła (moc oddawana w skraplaczu), [kW];

$\varphi$  – współczynnik wydajności grzejnej pompy ciepła podawany przez jej producenta, [-].

### 2.2.1 POWIETRZE ATMOSFERYCZNE

Powietrze atmosferyczne jest najłatwiej dostępnym źródłem energii odnawialnej i dlatego jest ono często stosowane do zasilania parowaczy pomp o małej i średniej mocy przeznaczonych do ogrzewania budynków jednorodzinnych lub przygotowania c.w.u. Do niekorzystnych cech powietrza jako

źródła ciepła niskotemperaturowego należą małe wartości współczynników przejmowania ciepła, a zatem i współczynników przenikania ciepła w parowaczach pomp ciepła oraz duża zmienność temperatur powietrza w przekroju dobowym i sezonowym. Średnia wartość współczynników przenikania ciepła w wężownicowych, ożebrowanych parowaczach freonowych pomp ciepła wynosi  $35 \div 50 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ . W przypadku ograniczonej możliwości powiększania pola powierzchni wymiany ciepła, a zatem i wymiarów parowacza, gęstość wymienianej mocy cieplnej zwiększana jest przez obniżenie temperatury parowania czynnika roboczego. Powoduje to z kolei zwiększenie koniecznego spiętrzenia temperatury czynnika roboczego (różnica między temperaturą skraplania i parowania), a tym samym zmniejszenie współczynnika wydajności grzejnej pompy ciepła.

Kolejną niekorzystną cechą jest powstawanie szronu na powierzchni parowacza w warunkach, gdy jej temperatura jest niższa niż  $0^\circ\text{C}$ . Warstwa szronu stanowi nie tylko dodatkowy opór cieplny, lecz w skrajnych warunkach może całkowicie uniemożliwić przepływ powietrza przez parowacz.

Aby zapobiec temu zjawisku stosowane są urządzenia do odszraniania parowacza. Parowacz może być okresowo odszraniany za pomocą gorącej pary czynnika roboczego tłoczonego do parowacza zamiast do skraplacza, za pomocą elektrycznej nagrzewnicy powietrza lub powietrza zewnętrznego podczas postoju pompy ciepła. Najczęściej proces odszraniania sterowany jest automatycznie.

Powietrze ma również małą pojemność cieplną, co jest to przyczyną przetłaczania przez parowacz dużego strumienia masy powietrza i związanego z tym dodatkowego zużycia energii do napędu wentylatora. Wtórny skutkiem tej cechy jest zwiększenie poziomu hałasu towarzyszącego pracy pompy ciepła.

Obniżenie temperatury powietrza zewnętrznego powoduje zwiększenie zapotrzebowania na moc cieplną do ogrzewania pomieszczeń. Występują zatem dwa przeciwstawne zjawiska: moc grzejna pompy ciepła zmniejsza się w warunkach, gdy rośnie zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania. Aby ograniczyć wpływ tego zjawiska w systemach ogrzewczych stosowane są dodatkowe źródła ciepła (układy biwalentne). Powietrze zewnętrzne jako źródło ciepła niskotemperaturowego dla parowacza pompy ciepła charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- użyteczny przedział temperatury  $4 \div 15^\circ\text{C}$  (produkowane są pompy ciepła przystosowane do eksploatacji przy temp. powietrza zewnętrznego do  $-15^\circ\text{C}$ , lecz praca ich w tych warunkach nie jest ekonomiczna);
- spadek temperatury w parowaczu  $4 \div 6 \text{ K}$ ;
- jednostkowa ilość uzyskiwanego ciepła  $1,4 \div 2,2 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3}$ .

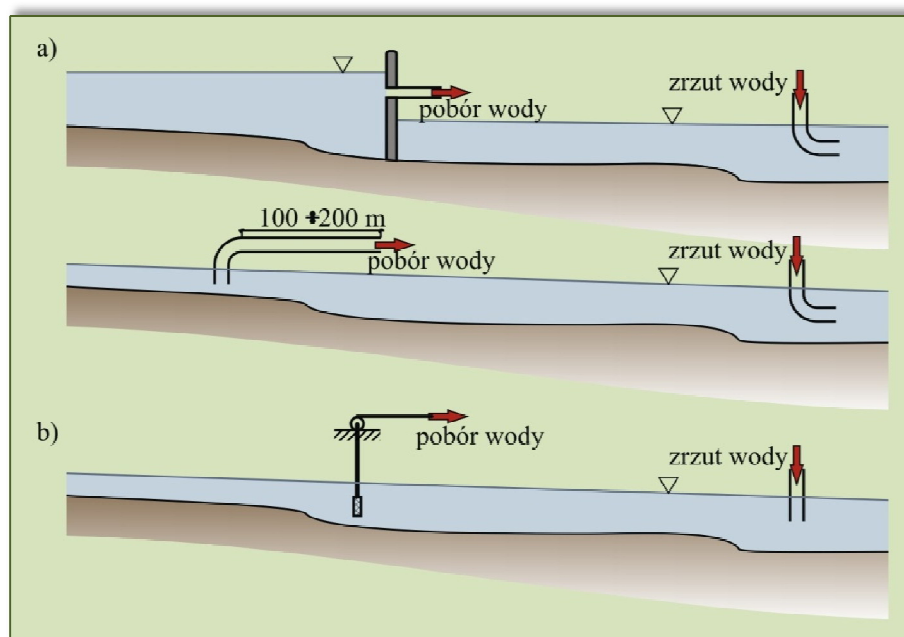
Średnioroczny współczynnik wydajności grzejnej sprężarkowej pompy ciepła z parowaczem zasilanym powietrzem atmosferycznym stosowanej w systemach ogrzewania niskotemperaturowego wynosi  $\varphi = 2,0 \div 2,5$ .

## 2.2.2 WODA

Woda jako źródło ciepła niskotemperaturowego ma szczególnie korzystne właściwości, a duże współczynniki przejmowania ciepła umożliwiają budowę wymienników ciepła o zwartej konstrukcji.

### 2.2.2.1 WODY POWIERZCHNIOWE

Wody powierzchniowe (cieki lub wody stojące – stawy, jeziora) są najczęściej zasysane przez pompę i tłoczone przez parowacz pompy ciepła. Strumień masy przetłaczanej wody jest stosunkowo duży z powodu niewielkiego spadku temperatury wody wynoszącego  $4 \div 5$  K, a jednostkowa ilość uzyskiwanego ciepła  $4500 \div 5900 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3}$ . Wody powierzchniowe mogą być źródłem ciepła niskotemperaturowego w instalacjach pomp ciepła o średniej i dużej mocy. Schematy ujęć wód powierzchniowych do zasilania parowaczy pomp ciepła pokazano na rys. 2.10, przy czym ponieważ temperaturę wody w rzece kształtuje wymiana ciepła z otoczeniem, to jej poboru można dokonywać wielokrotnie na długości rzeki.



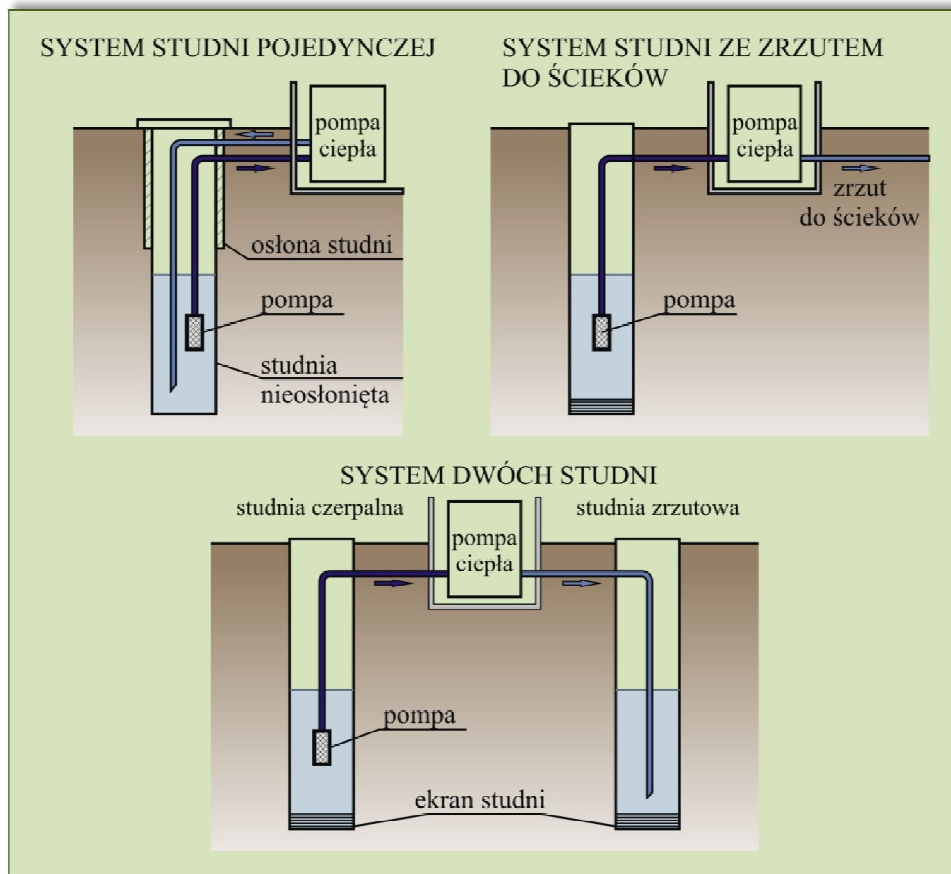
Rys.2.10. Ideowe schematy ujęć wody powierzchniowej: a) ujęcie wody rzecznej bez pompy, b) pompowe ujęcie wody rzecznej [1]

### 2.2.2.2 WODY GRUNTOWE

Wody gruntowe o stałej średniorocznej temperaturze  $5 \div 12^\circ\text{C}$  stanowią szczególnie dogodne źródło ciepła niskotemperaturowego. Woda czerpana ze studni płytkich ochładzana jest w parowaczu o  $4 \div 5$  K i za pośrednictwem studni chłonnych (zrzutowych) odprowadzana ponownie do gruntu. Studnie czerpalna i chłonna powinny być oddalone od siebie o ok.  $30 \div 50$  m w zależności od własności gruntu i poziomu wody gruntowej. Jednostkowa ilość ciepła uzyskiwana w parowaczu zasilanym

wodą gruntową wynosi  $4500 \div 5900 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3}$ , a zatem z  $1 \text{ m}^3$  wody można w skraplaczu uzyskać  $6,8 \div 9,0 \text{ kWh}$  (przy współczynniku wydajności grzejnej  $\phi_r = 3$ ).

Schematy ujęć wód podziemnych pokazano na rys. 2.11, przy czym wody te mogą być tłoczone bezpośrednio do parowacza pompy ciepła, a gdy stopień ich mineralizacji jest wysoki (np. duże zasolenie), to stosowany jest pośredni wymiennik ciepła.



Rys.2.11. Ideowe schematy ujęć wód podziemnych [1]

Strumień objętości wody gruntowej zasilającej parowacz pompy ciepła (konieczną wydajność studni) oblicza się ze wzoru:

$$V = \frac{Q_o}{c_p \cdot \Delta T \cdot \rho} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]; \quad (2.2)$$

gdzie:

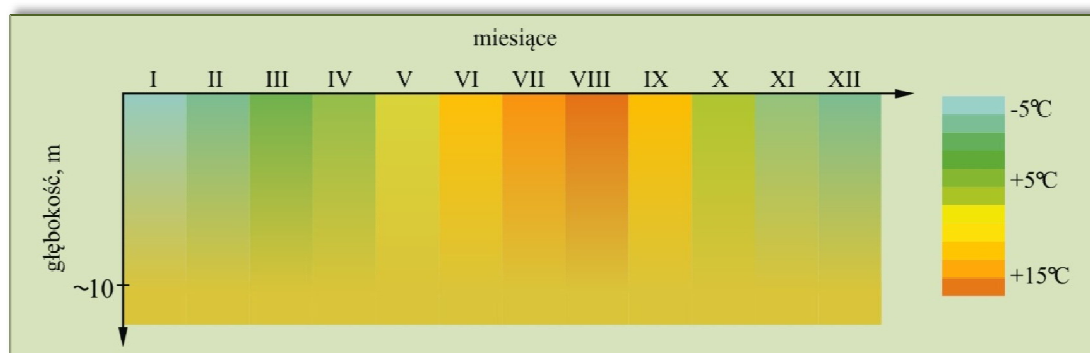
- $Q_o$  – moc cieplna pobierana z dolnego źródła, [kW],
- $c_p$  – ciepło właściwe wody, [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $\Delta T$  – spadek temperatury wody w parowaczu ( $\Delta T = 4 \div 5 \text{ K}$ ), [K],
- $\rho$  – gęstość wody, [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

W przypadku studni głębokich nie powinno dopuszczać się do swobodnego spływu wody powrotnej, gdyż powoduje to wydzielanie się dwutlenku węgla i tworzenie węglanu wapnia na ściankach studni.

Najczęściej spotykane problemy eksploatacyjne to: narastanie szlamu na ściankach studni, wytrącanie się żelaza, zanieczyszczenia biologiczne, ograniczenie dopływu świeżej wody, zamulenie (kolmatacja) oraz uszkodzenie obramowania studni. Niektóre studnie wymagają czyszczenia roztworem kwasu solnego, np. studnie aluwialne wymagają konserwacji co 2 do 5 lat.

### 2.2.3 GRUNT

Ciepło zawarte w gruncie wykorzystywane jest do zasilania parowaczy pompy ciepła najczęściej za pomocą wtórnego nośnika ciepła, który krąży w obiegu zamkniętym przez tzw. wymiennik grunto-  
wy (poziomy lub pionowy) ułożony w gruncie. Nośnikiem jest woda lub ciecze ekologiczne o niskiej temperaturze krzepnięcia (np. wodny roztwór glikolu etylenowego). W zależności od pory roku i głębokości temperatury gruntu mogą się wahać w przedziale od 4 do 8°C (rys.2.12). Przy głębokościach powyżej 10 ÷ 15m ustają ruchy termiczne gruntu zależne od pory roku, a temperatura jest stała w granicach 8 ÷ 10°C.



Rys.2.12. Zmienność temperatur gruntu w zależności od głębokości i pory roku

Wartość odchyleń temperatury od wartości średniej rocznej zależy od właściwości gruntu i głębokości (rys.2.13).

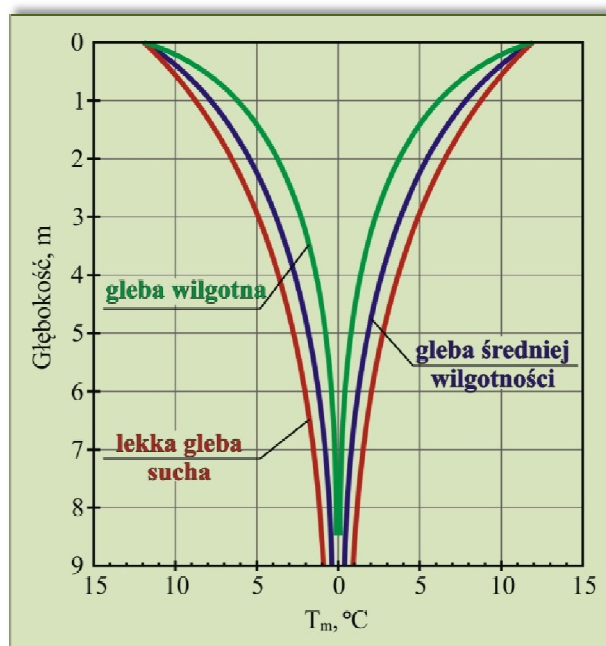
Z kolektora gruntowego najintensywniej pobierane jest ciepło w okresie zimowym, natomiast regeneruje się on przede wszystkim w okresach cieplejszych, tj. wiosną i latem. Regeneracja gruntu następuje przede wszystkim dzięki promieniowaniu słonecznemu oraz opadom atmosferycznym, co zapewnia że grunt ponownie zakumuluje ciepło na następny sezon grzewczy.

Właściwości akumulacyjne i przewodność cieplna są tym większe im bardziej grunt jest nasycony wodą, im więcej jest składników mineralnych i im mniejsza jest jego porowatość.

Możliwe do pobrania z gruntu moce jednostkowe mieszczą się w zakresie  $10 \div 35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  powierzchni gruntu (grunt piaszczysty, suchy:  $10 \div 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; piaszczysty, wilgotny:  $15 \div 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; grunt ilasty, suchy:  $20 \div 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; ilasty, wilgotny:  $25 \div 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ; grunt wodonośny:  $30 \div 35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

### 2.2.3.1 POZIOME GRUNTOWE WYMIENNIKI CIEPŁA

Gruntowe poziome wymienniki ciepła mogą być wykonywane w różnych konfiguracjach: jako układy szeregowe lub wężownicowe (rys.2.14 i 2.15). Wymienniki wykonywane są przeważnie z rur tworzywowych (PVC, polietylenowych, polipropylenowych lub polibutylenowych) układanych na głębokości  $1,2 \div 2,0 \text{ m}$ , przy czym podziałka rur w wężownicy wynosi  $0,8 \div 1,0 \text{ m}$ . Przyrost temperatury nośnika ciepła w gruncie wynosi  $3 \div 4 \text{ K}$ , a gęstość strumienia ciepła przejmowanego z gruntu zależy od jego rodzaju, a przede wszystkim wilgotności. W glebach wilgotnych gęstość strumienia pobieranego ciepła wynosi  $q = 40 \div 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , a w gruntach suchych  $q = 10 \div 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Orientacyjnie można przyjąć, że za pomocą rury o długości  $100 \text{ m}$  można odebrać z gruntu ok.  $3 \div 5 \text{ kW}$  ciepła w czasie jednej godziny. Średnia temperatura nośnika ciepła zależy od głębokości ułożenia rur oraz rodzaju gruntu. Niezbędną długość rur gruntowego poziomego wymiennika ciepła obliczyć można ze wzoru:



Rys.2.13. Wykres odchyleń temperatury gruntu od temperatury średniorocznej

$$l = \frac{Q_o \cdot (R_p + \tau_h \cdot R_s)}{\Delta T_g} \quad [\text{m}]; \quad (2.3)$$

gdzie:

- $Q_o$  – moc cieplna pobierana z gruntu obliczona wg wzoru [1], [W],
- $R_p$  – jednostkowy opór cieplny rury, [ $\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ],
- $R_s$  – opór cieplny gruntu, [ $\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ],
- $\tau_h$  – poprawka uwzględniająca okresowość pracy pompy ciepła; jest to stosunek czasu pracy pompy w sezonie ogrzewania do czasu trwania sezonu ogrzewania,
- $\Delta T_g$  – różnica między temperaturą gruntu o nienaruszonej strukturze (na głębokości ułożenia rury), a temperaturą nośnika ciepła na dopływie do parowacza pompy ciepła, [K].

Jednostkowy opór cieplny rury  $R_p$  wyznaczyć można za pomocą wzoru:

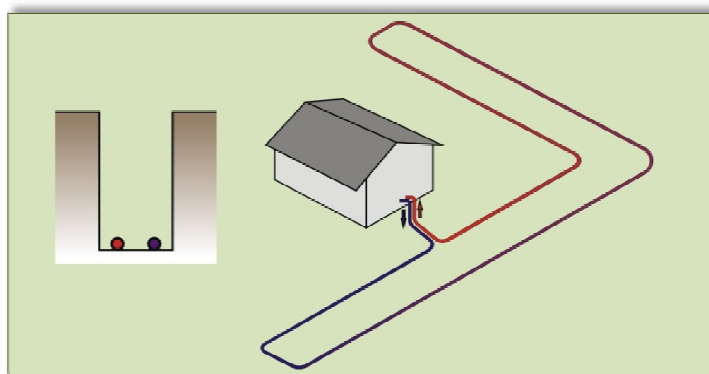
$$R_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} \cdot \ln \frac{D_z}{D_w} \quad [\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]; \quad (2.4)$$

gdzie:

- $\lambda_p$  – współczynnik przewodności cieplnej materiału rury, [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $D_z$  – zewnętrzna średnica rury, [m],
- $D_w$  – wewnętrzna średnica rury, [m].

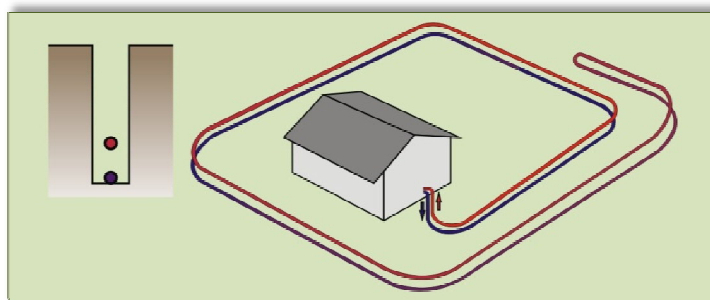
Obliczeniowy opór cieplny gruntu  $R_s$  zależy zarówno od jego właściwości fizycznych (wilgotność, struktury, składu itp.), jak i głębokości ułożenia rur oraz ich konfiguracji. Wartości te wyznacza się rozwiązując równania przewodnictwa cieplnego; można je znaleźć w pracach źródłowych. W orientacyjnych obliczeniach można przyjmować, że  $R_s = 0,55 \div 0,80 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Dopuszczalna długość pojedynczej rury (pętli) poziomego gruntowego wymiennika z przepływem szeregowym zależy od średnicy rury i wynosi:

średnica rury	¾"	1"	1 ¼"	1 ½"	2"
długość rury(przepływu), m	150	230	275	365	750



Rys.2.14. Poziomy gruntowy wymiennik ciepła o konfiguracji szeregowej [1]



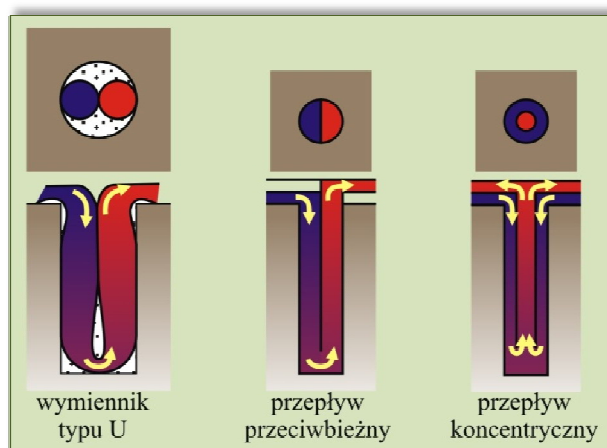


Rys.2.15. Poziomy gruntowy wymiennik ciepła o konfiguracji podwójno-szeregowej (2×1) [1]

### 2.2.3.2 PIONOWE GRUNTOWE WYMIENNIKI CIEPŁA

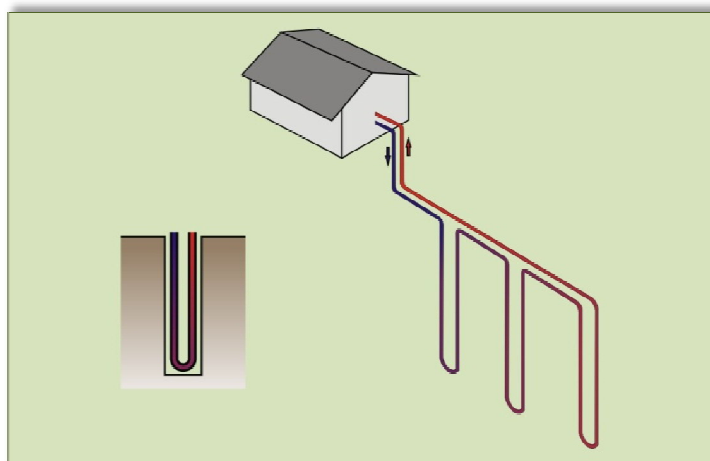
Pionowe gruntowe wymienniki ciepła można, w zależności od wykonania, podzielić na (rys.2.16):

- typu U,
- z przepływem przeciwbieżnym,
- z przepływem koncentrycznym.

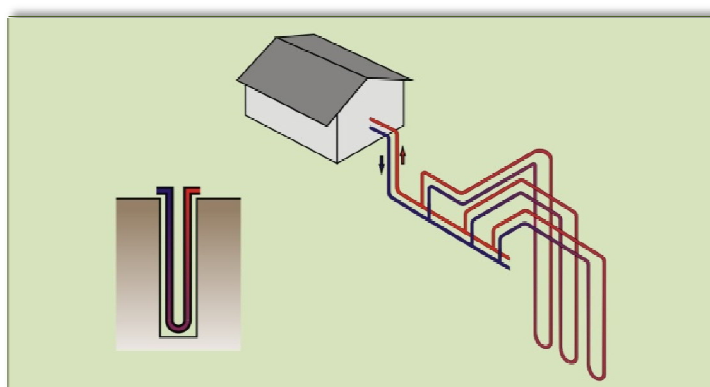


Rys.2.16. Ideowe schematy rozwiązań pionowych gruntowych wymienników ciepła [1]

Wymienniki typu U są najprostsze w wykonaniu. Są one wykonywane najczęściej z rur o średnicach od  $\frac{3}{4}$ " do 2". Typowe rozwiązania układów równoległych i szeregowych pokazano na rys.2.17 oraz 2.18.



Rys.2.17. Pionowy gruntowy wymiennik ciepła o konfiguracji szeregowej [1]



Rys.2.18. Pionowy gruntowy wymiennik ciepła o konfiguracji równoległej [1]

Obliczenia długości rur w tych wymiennikach są dość złożone i wymagają korzystania ze specjalistycznej literatury.

Różnice mocy cieplnej odbieranej z gruntu za pomocą poziomego i pionowego gruntowego wymiennika ciepła są nieznaczne. W wymienniku poziomym średnia temperatura nośnika ciepła na dopływie do parowacza jest niższa, lecz bardziej stabilna z powodu większej długości przewodów, a więc i masy nośnika ciepła. A zatem wybór rozwiązania wymiennika gruntowego zależy głównie od warunków lokalnych (wielkości działki, jej zagospodarowania, rodzaju gruntu, poziomu wód gruntowych) i powinien być poprzedzony dokładnymi analizami.

Wadą gruntu, jako źródła ciepła niskotemperaturowego, jest duże zużycie materiałów do budowy gruntowych wymienników ciepła.

Natomiast zaletą tego rozwiązania jest możliwość wykorzystania gruntu jako zasobnika ciepła w instalacjach współpracujących z kolektorami słonecznymi. Współczynniki wydajności grzejnej pomp ciepła z gruntowymi wymiennikami osiągają wartość  $\phi_r = 2,2 \div 3,2$  w zależności od meteorologicznych warunków okresu ogrzewania.

## 2.2.4 CIEPŁO ODPADOWE

W budownictwie mieszkaniowym istnieje teoretyczna możliwość odzyskania części ciepła odprowadzanego z mieszkania w postaci zużytego powietrza wentylacyjnego i ścieków. Jednak wykorzystanie tego ciepła wymaga zmodyfikowania rozwiązań instalacji wentylacyjnych i wod.-kan. stosowanych w Polsce.

W kraju, w budynkach jedno- i wielorodzinnych stosowana jest prawie wyłącznie grawitacyjna wentylacja wywiewna. Niewielkie i zmienne ciśnienie czynne w tego rodzaju wentylacji uniemożliwia w praktyce zastosowanie jakichkolwiek urządzeń do odzyskiwania ciepła z powietrza odpływającego z pomieszczeń. Aby uzyskać możliwość odzyskiwania ciepła z powietrza wentylacyjnego, a równocześnie poprawić warunki mikroklimatu w pomieszczeniach, należałoby wprowadzić co najmniej mechaniczną wentylację wywiewną.

Zasoby ciepła zawartego w powietrzu wentylacyjnym usuwanego z budynków wynoszą ok.  $48 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ . Natomiast zasoby ciepła usuwanego z pomieszczeń w postaci ścieków, przy zużyciu c.w.u. ok.  $80 \text{ dm}^3 \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  wynoszą ok.  $89 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ , przy czym wykorzystanie tych zasobów wymagałoby zmiany rozwiązań instalacji kanalizacyjnej, tj. oddzielenia pionów kanalizacji fekalnej od kanalizacji odprowadzającej ścieki higieniczno - bytowe (wanna, umywalka, zlewozmywak itp.).

## 2.3 WPLYW RODZAJU ŹRÓDŁA CIEPŁA NISKOTEMPERATUROWEGO NA ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE POMPY CIEPŁA

Fizyczne właściwości nośnika ciepła wywierają istotny wpływ na konstrukcję elementów i parametry pracy pompy ciepła. Konstrukcja głównego elementu sprężarkowej pompy ciepła czyli sprężarki w zasadzie nie zależy od rodzaju źródła ciepła niskotemperaturowego. Od rodzajów nośnika ciepła zależy natomiast konstrukcja wymienników ciepła – parowacza i skraplacza. W przypadku, gdy nośnikami ciepła niskotemperaturowego jest ciecz (woda, solanka lub wodny roztwór glikolu), a w skraplaczu podgrzewana jest woda, to zarówno parowacz, jak i skraplacz budowane są jako wymienniki płaszczowo – rurowe, spiralne lub płytowe. Natomiast gdy nośnikiem ciepła w parowaczu i skraplaczu jest powietrze, to najczęściej parowacz i skraplacz wykonane są jako zespoły równoległych węzownic połączonych kolektorami, przy czym węzownice od strony powietrza wyposażone są w żebra lamelowe lub nawijane.

Rodzaj nośnika ciepła nisko- i wysokotemperaturowego (podgrzewanego w skraplaczu) jest podstawą klasyfikacji rozwiązań pomp ciepła. Podział systemów pomp ciepła przedstawia tabela 2.1.

Tab.2.1. Podział systemów pomp ciepła w zależności od rodzaju dolnego i górnego źródła ciepła

Nośnik ciepła		Oznaczenie
Wymiennik dolnego źródła	Wymiennik górnego źródła	
powietrze	powietrze	A/A (P/P)
woda	powietrze	W/A (W/P)
solanka/glikol	powietrze	B/A (B/P)
powietrze	woda	A/W (P/W)
woda	woda	W/W
solanka/glikol	woda	B/W

Jest to klasyfikacja uproszczona, a określenie woda oznacza dowolny, ciekły nośnik ciepła, np. wodny roztwór glikolu pośredniczący w wymianie ciepła między gruntowym wymiennikiem ciepła a czynnikiem roboczym wrzącym w parowacu. Odnosi się to również do określenia „powietrze”, które może oznaczać ogólnie gazy, jak np. opary, gazy odlotowe, spaliny itp.

## 2.4 PARAMETRY TECHNICZNE

Po podjęciu decyzji jakiego źródła dolnego chcemy używać (woda, powietrze atmosferyczne, grunt), należy też zastanowić się na tym do jakich celów chcemy wykorzystywać energię wytworzoną przez pompę ciepła. Przy wyborze pompy ciepła należy zwrócić szczególną uwagę na to jaką temperaturę mogą one przekazać, bo od tej wartości zależy jakie wykorzystanie energii będziemy mogli zastosować w naszym budynku.

Jeżeli uzyskane ciepło, będziemy wykorzystywali w procesie produkcyjnym to temperatura uzyskiwana przez pompę ciepła do niskotemperaturowych procesów produkcyjnych powinna mieścić się w zakresie od 25 ÷ 60°C.

Jeżeli jednak ciepło uzyskane przez pompę będziemy wykorzystywali do ogrzewania naszego domu to parametry temperatur, zależą od tego jakiego rodzaju sprzętu grzewczego będziemy używali. Do podgrzewania wody użytkowej i ogrzewania grzejnikowego temperatura wynosi od 55 ÷ 60°C, natomiast w przypadku ogrzewania sufitowego i podłogowego powinna ona wynosić od 25 ÷ 45°C.

## 2.5 SPRAWNOŚĆ POMPY CIEPŁA

Dla oceny pompy ciepła lub kompletnej instalacji pomp ciepła wprowadzono następujące wskaźniki: współczynnik efektywności i roczny wskaźnik pracy.

### 2.5.1 WSPÓLCZYNNIK EFEKTYWNOŚCI COP

Współczynnik efektywności  $COP$  opisuje stosunek mocy grzewczej do włożonej mocy napędowej:

$$COP = \frac{P_p}{P_e} \quad [-]; \quad (2.5)$$

gdzie:

- $P_p$  – moc grzewcza pompy ciepła, [kW],
- $P_e$  – moc elektryczna potrzebna do napędu sprężarki, [kW].

Współczynnik efektywności pompy ciepła można również obliczyć posługując się odwróconym obiegiem Carnota

$$COP = \frac{T_g}{T_g - T_d} = \frac{T_g}{\Delta T} \quad [-]; \quad (2.6)$$

gdzie:

- $T_d$  – temperatura dolnego źródła ciepła, [K],
- $T_g$  – temperatura górnego źródła (systemu grzewczego) [K],
- $\Delta T$  – różnica temperatur pomiędzy temperaturą górnego źródła a temperaturą źródła dolnego, [K].

Współczynnik  $COP = 4$  oznacza więc, że pompa oddaje jako ciepło poczwórną wartość włożonej energii elektrycznej.

Dla wszystkich pomp ciepła obowiązuje zasada, że im niższa jest różnica temperatur wody grzewczej i dolnego źródła ciepła, tym większy jest wskaźnik efektywności i efektywność pompy ciepła. Dlatego pompy ciepła nadają się szczególnie dla systemów grzewczych niskotemperaturowych, jak np. ogrzewania podłogowe.

Nowoczesne pompy ciepła osiągają, zależnie od wybranego źródła ciepła, wskaźniki efektywności od 3,5 do 5,5 [2]. Oznacza to, że z każdej kilowatogodziny zużytej energii elektrycznej można wytworzyć 3,5 do 5,5 kWh ciepła grzewczego. Kompensuje to z nawiązką uciążliwość ekologiczną związaną z korzystaniem z prądu elektrycznego.

Spadek efektywności energetycznej nie przesądza jednak o opłacalności pompy ciepła, ponieważ wpływają na nią również inne czynniki ekonomiczne np. cena zakupu energii elektrycznej i koszty inwestycyjne.

## 2.5.2 WSKAŹNIK PRACY ROCZNEJ

Wskaźnik pracy rocznej jest wartością mierzoną dla kompletnej instalacji pompy ciepła w skali roku. Wyraża on stosunek oddanego ciepła użytecznego do użytej energii napędowej, z uwzględnieniem prądu pobieranego przez pompy obiegowe, regulator elektroniczny itp.

## 2.6 POMPA CIEPŁA A KLIMATYZACJA

Firmy produkujące i montujące pompy ciepła w swojej ofercie dają możliwość nie tylko ogrzewania budynków, ale również ich chłodzenia. Wykorzystywany jest tu ten sam system co w przypadku ogrzewania. Można przy tym rozróżnić dwie różne metody chłodzenia pompą ciepła:

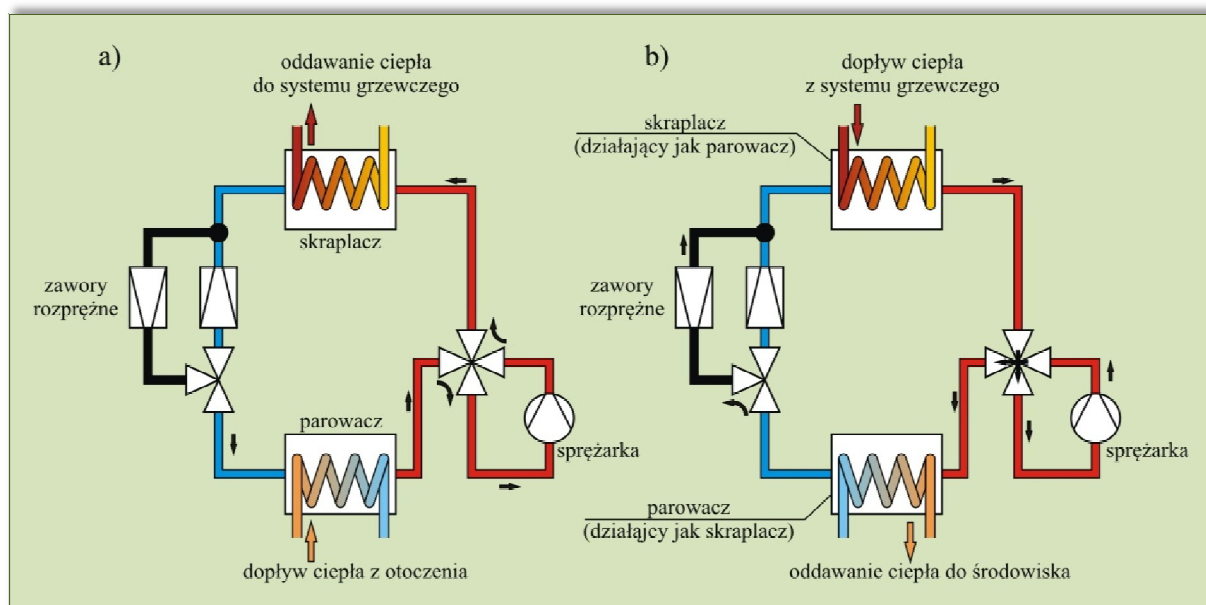
- chłodzenie aktywne (działanie odwrócone),
- chłodzenie bezpośrednie (pasywne).

### 2.6.1 CHŁODZENIE AKTYWNE

Aby wykorzystać pompę ciepła do chłodzenia pomieszczeń, wystarczyłoby w zasadzie odwrócić kierunek tłoczenia sprężarki i odwrócić zawór rozprężny, zmieniając w ten sposób kierunek przepływu czynnika chłodniczego tym samym i przepływu ciepła. Prosta technicznie realizacja polega na wbudowaniu w obieg czynnika zaworu czterodrożnego i drugiego zaworu rozprężnego. Zawór czterodrożny pozwala zachować kierunek tłoczenia sprężarki, niezależnie od wybranej funkcji systemu (ogrzewanie czy chłodzenie). W trybie ogrzewania sprężarka tłoczy gazowy czynnik chłodniczy do wymiennika ciepła systemu grzewczego. Tam czynnik skrapla się, oddając ciepło systemowi grzewczemu (centralne ogrzewanie wodne lub nagrzewnice powietrza) (rys. 2.19a).

Dla trybu chłodzenia odwraca się kierunek przepływu przy pomocy zaworu czterodrożnego. Pierwotny skraplacz staje się teraz parowaczem, który odbiera teraz ciepło z pomieszczeń i przekazuje je czynnikowi chłodniczemu. Gazowy czynnik chłodniczy dopływa poprzez zawór czterodrożny do sprężarki, a stamtąd do wymiennika ciepła, który przekazuje ciepło środowisku (rys. 2.19b).

Moc grzewcza odwracalnej pompy ciepła jest zawsze nieco większa od mocy chłodniczej. W trybie ogrzewania energia pobierana dla napędu sprężarki jest przemieniana w ciepło i wykorzystywana również do ogrzewania pomieszczeń. W trybie chłodzenia ciepło to powstaje także, gdyż sprężarka musi pracować. To powstające z konieczności ciepło pogarsza tu jednak bilans cieplny i teoretycznie możliwą moc chłodniczą. Dlatego osiągalne współczynniki efektywności (COP) odwracalnej pompy ciepła są w trybie chłodzenia zawsze nieco niższe niż w trybie ogrzewania.



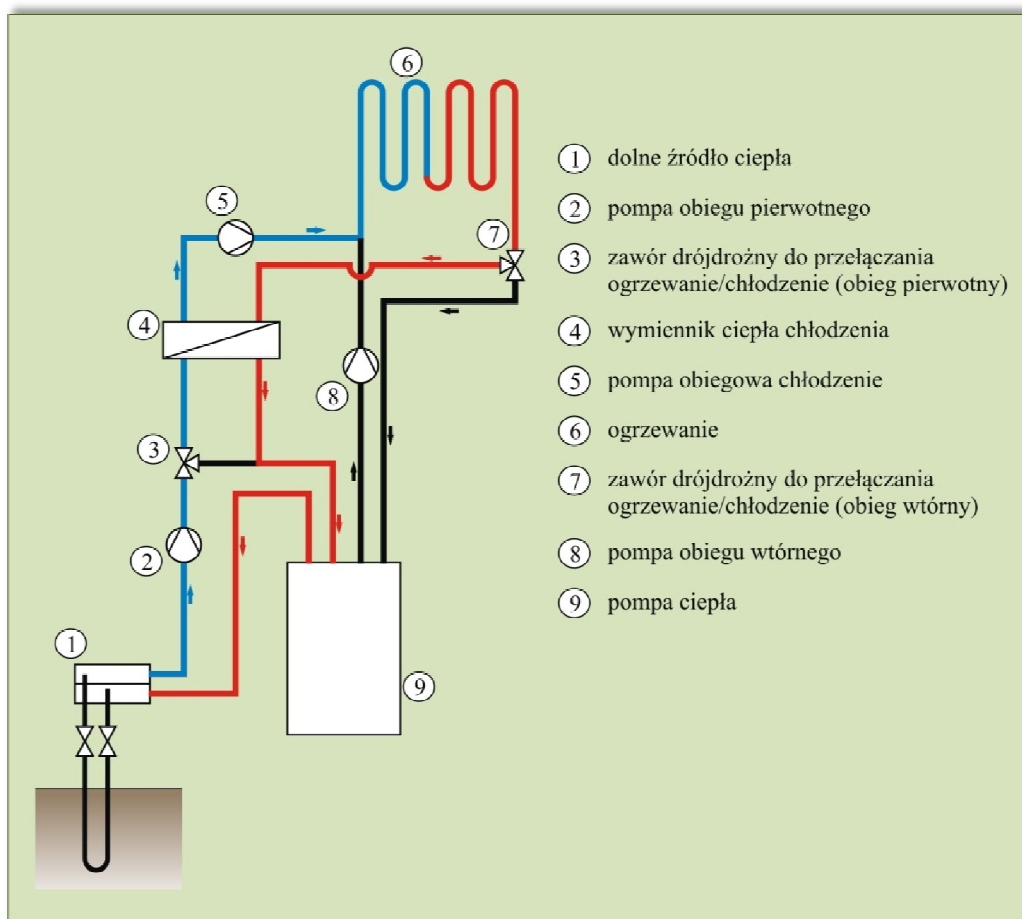
Rys.2. 19. Uproszczony schemat działania odwracalnej pompy ciepła w trybie: a) ogrzewania, b) chłodzenia

## 2.6.2 CHŁODZENIE PASYWNE

Latем temperatury we wnętrzu budynku są z reguły wyższe od temperatury w gruncie czy w wodzie gruntowej. Takie niższe temperatury w gruncie, służącym zimą jako źródło ciepła, można latem wykorzystać do naturalnego schładzania wnętrza budynku. Niektóre pompy ciepła dysponują w swoich regulatorach funkcją określaną mianem „natural cooling”. Ze względu na wysokie temperatury powietrza zewnętrznego w lecie, funkcja ta jest oczywiście niemożliwa w pompach ciepła powietrze/woda.

Funkcja „natural cooling” wymaga niewielu dodatkowych elementów (wymyennik ciepła, zawory trójdrożne i pompa obiegowa). Pod względem mocy chłodniczej funkcja ta nie daje się porównać z instalacjami klimatyzacyjnymi lub wody lodowej.

W funkcji „natural cooling” (rys.2.20) regulator uruchamia jedynie pompę obiegu pierwotnego 2 (sprężarka pompy ciepła pozostaje wyłączona), otwiera zawory trójdrożne 3 i 7 do wymyennika ciepła 4 oraz uruchamia pompę obiegu wtórnego 8. W ten sposób stosunkowo ciepła woda z ogrzewania podłogowego 6 może w wymyenniku ciepła 4 oddać swoje ciepło solance z obiegu pierwotnego.



Rys.2.20. Uproszczony schemat instalacji dla „natural cooling” poprzez ogrzewanie podłogowe [2]

W ten sposób odbierane jest ciepło z pomieszczeń. Do bezpośredniego chłodzenia pomieszczeń można zastosować następujące systemy: konwektory wentylatorowe, stropy chłodzące, ogrzewania podłogowe, elementy konstrukcyjne budynku (beton temperowany).

„Natural cooling” jest szczególnie energooszczędną i tanią metodą chłodzenia budynków, gdyż wymaga jedynie niewiele energii elektrycznej dla pomp obiegowych kolektora gruntowego lub sond wody gruntowej. Podczas tego trybu pracy pompa ciepła włącza się tylko dla podgrzewu c.w.u. Sterowaniem wszystkich potrzebnych pomp obiegowych oraz zaworów przełączających, a także pomiarem temperatur dla kontroli punktu rosy zajmuje się regulator pompy ciepła.



## LITERATURA DO ROZDZIAŁU

- [1] Rubik M.: *Pompy ciepła. Poradnik*. Ośrodek Informacji “Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 1999
- [2] Viessmann. *Zeszyty Fachowe. Pompy ciepła*.
- [3] Zawadzki M.: *Kolektory słoneczne, pompy ciepła na tak*. Polska Ekologia, Warszawa, 2003