

EKONOMIKA ZASTOSOWANIA SYSTEMÓW GEOTERMALNYCH POMP CIEPŁA DLA BUDYNKÓW KOMERCYJNYCH I UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

THE ECONOMICS OF GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS FOR COMMERCIAL AND INSTITUTIONAL BUILDINGS

STRESZCZENIE

Chociaż w latach 1950-tych wprowadzono z wielkimi fanfarami i wczesnym rozgłosem geotermalne pompy ciepła, to nie uzyskały one dotąd statusu głównego nurtu wśród inżynierów mechaników i przedsiębiorców o specjalności ogrzewanie - wentylacja - klimatyzacja (OWK). Obecnie stanowią one jedynie mały procent nowych instalacji pomimo agresywnych programów komercjalizacji technologii, prowadzonych przez agencje i zakłady państwowe. Najpowszechniej podawanymi powodami braku akceptacji tej technologii są wysoki koszt inwestycyjny, troska o niezawodność i wysokie koszty konserwacji.

Do tego poglądu znacząco przyczynia się brak dobrze udokumentowanej informacji odnośnie rzeczywistych kosztów cyklu życia i wymagań co do konserwacji systemów geotermalnych pomp ciepła. Jednakże, ostatnio zakończone badania i wzrastająca liczba opracowań dla poszczególnych przypadków zaczęły rzucać nowe światło na prawdziwe koszty systemów geotermalnych pomp ciepła w porównaniu z innymi alternatywnymi systemami OWK. Ten ostatnio stworzony zbiór prac wskazuje na niższe koszty cyklu życia dla systemów geotermalnych pomp ciepła niż dla jakiegokolwiek z alternatywnych systemów, a faktycznie, systemy geotermalnych pomp ciepła okazały się mieć niższy koszt pierwszych nakładów niż kilka popularnych alternatywnych rozwiązań. Na szeroką akceptację tej technologii może jednak trzeba będzie poczekać, aż dodatkowe badania, realizowane we współpracy, zostaną opracowane i opublikowane przez dobrze znane organizacje takie, jak ASHRAE (Amerykańskie Towarzystwo Inżynierów Ciepłownictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji).

* * *

WSTĘP

Systemy geotermalnych pomp ciepła (GPC) po raz pierwszy stały się popularne w latach 1950-tych po wstępnym wprowadzeniu technologii w Commonwealth Building w Portland, w stanie Oregon w USA. Liczne repliki tego systemu, z tego mniej więcej okresu, służące szeregu budynków i kompleksów użyteczności publicznej i komercyjnym, można spotkać w zachodnich stanach USA. Jeszcze jedno wznowienie udostępniania systemów GPC nastąpiło po kryzysie naftowym w latach 1970-tych, kiedy strach o wzrost kosztów i dostępność energii popchnął przedsiębiorców ku

ABSTRACT

Although introduced in the 1950s with a great deal of fanfare and early publicity, geothermal heat pumps have yet to obtain mainstream status among mechanical engineers and heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) contractors. At the present time, they make up only a small percentage of new installations despite aggressive programs by government agencies and utilities to commercialize the technology. The most common reasons given for this lack of acceptance are high capital cost and concerns over reliability and high maintenance costs.

A lack of well-documented information relative to the real life-cycle costs and maintenance requirements of geothermal heat pump systems has contributed significantly to this view. However, recently-completed research and a growing number of case studies has begun to shed new light on the true costs of geothermal heat pump systems versus other HVAC alternatives. This recently-completed body of work points to lower life-cycle costs for geothermal heat pump systems than any of the alternatives, and, in fact, geothermal heat pump systems were found to have lower first cost than several popular alternatives. Broad acceptance of the technology may, however, have to wait until additional collaborating studies can be completed and published by well-recognized organizations such as ASHRAE.

* * *

INTRODUCTION

Geothermal heat pump (GHP) systems first became popular in the 1950s after the initial introduction of the technology at the Commonwealth Building in Portland, Oregon, in the U.S. Numerous replications of that system, dating from about the same time, can be found throughout the western United States, serving a number of commercial and institutional buildings and complexes. Another resurgence in the development of GHP systems came following the oil crises of the 1970s when fears over rising costs and the availability of energy drove developers to look to systems that used

poszukiwaniu systemów wykorzystujących miejscowe zasoby. Koszt pierwszych nakładów, aczkolwiek wciąż ważny, miał drugorzędne znaczenie w porównaniu do wielu innych czynników. Jednakże, po prawie 50. latach stosowania, geotermalne pompy ciepła ciągle stanowią tylko mały procent instalacji grzewczych, wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Okazało się, że brak informacji i zrozumienia dotyczących kosztów inwestycyjnych, eksploatacyjnych i konserwacji stanął na drodze do bardziej uniwersalnej akceptacji tej technologii. Szereg nowych analiz i studiów badawczych, jak również szereg analiz poszczególnych przypadków, zaczął teraz rzucać nowe światło na ekonomikę systemów geotermalnych pomp ciepła w stosunku do alternatywnych systemów OWK. Niniejszy artykuł czerpie w dużej mierze z pracy przygotowanej dla Lockheed Martin Idaho Technologies Company (Moore, 1999), analiz przypadków wykonanych przez autora (Bloomquist, 1999), oraz z szeregu sprawozdań wykonanych dla, i przez U.S. Department of Energy (Departament Energii USA).

CZYNNIKI SKŁADOWE KOSZTÓW

Aby porównać ekonomikę systemów geotermalnych pomp ciepła i innych systemów OWK, należy dokonać bezpośredniego porównania między ich kosztami inwestycyjnymi, eksploatacyjnymi i konserwacji (ryc. 1A

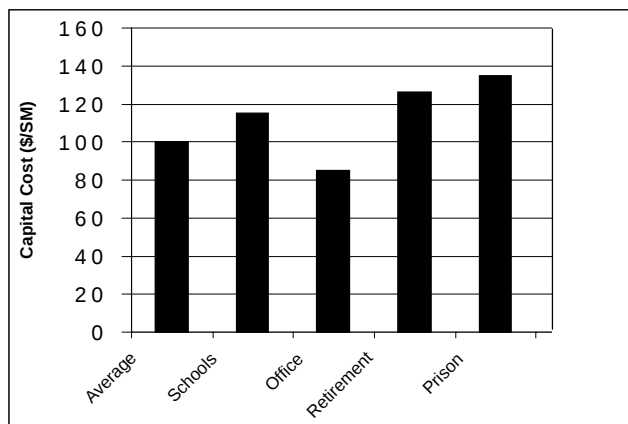
indigenous resources. First cost, although still important, took a back seat in comparison to many other factors. However, after nearly 50 years of use, geothermal heat pumps still make up only a small percentage of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) installations. A lack of information and understanding relative to capital, operating, and maintenance costs, appear to stand in the way of more universal acceptance of the technology. A number of recent analyses and research studies as well as a number of case studies have now begun to shed light on the economics of geothermal heat pump systems versus various other HVAC system alternatives. This paper draws heavily from work prepared for Lockheed Martin Idaho Technologies Company (Moore, 1999), case studies completed by the author (Bloomquist, 1999), and a number of reports for and by the U.S. Department of Energy.

COST FACTORS

In order to compare the economics of geothermal heat pump systems to other HVAC alternatives, a direct comparison must be made between capital costs, operating costs, and maintenance costs (Fig. 1A & 1B). Once a clear understanding of the relative costs associated with the various alternatives is established, it is then possible to use the information to conduct a simplified

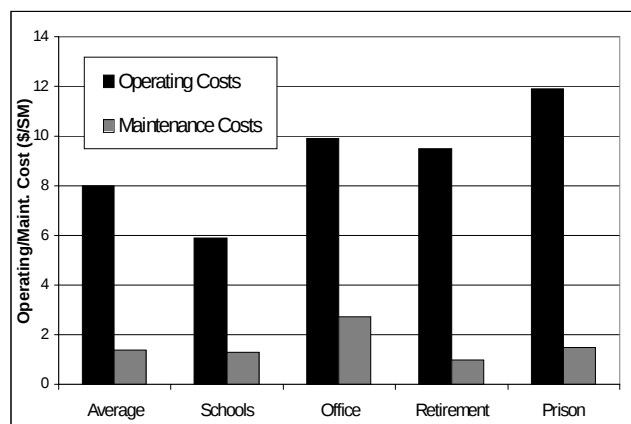
Tabela 1. Koszty inwestycyjne geotermalnych pomp ciepła (GPC) dla różnych typów budynków i systemów instalacji w gruncie
Table 1. GHP System Capital Costs by Building and Ground Loop Type

Average of: Średnia dla:		GHP HVAC Capital Cost, \$/m ² (# of data points) GPC OWK Koszt inwest., \$/m ² (liczba obiektów)	GHP HVAC Capital Cost, \$/m ² /kW (# of data points) GPC OWK Koszt inwest., \$/m ² /kW (liczba obiektów)
All Case Studies and References Wszystkie przypadki analizy i odniesień		\$100.10 (72)	\$1,026.6 (55)
Building Type Typ budynku			
Schools	Szkoły	\$115.40 (32)	\$1,020.6 (24)
Office Buildings	Biurowce	\$85.00 (13)	\$1,005.1 (11)
Retail	Handel detaliczny	\$35.90 (5)	\$1,097.4 (3)
Medical Centers	Centra medyczne	\$84.10 (2)	\$811.1 (2)
Retirement	Domy emerytów	\$126.20 (3)	\$1,119.1 (2)
Apartment/Multi-Residential	Mieszkanie/Bud. wielorodzinne	\$100.00 (2)	\$1,059.1 (2)
Prisons (correctional facility)	Więzienia (zakłady poprawcze)	\$134.90 (3)	\$1,320.6 (2)
Gas Station/Convenience Store	Stacja benzynowa/tradycyjny sklep	\$232.40 (1)	\$1,952.3 (1)
Ground Loop Type Typ instalacji obiegu w gruncie			
Vertical Closed Loop Obwód zamknięty pionowy		\$117.90 (50)	\$1,106.9 (39)
Horizontal Closed Loop Obwód zamknięty poziomy		\$55.10 (8)	\$717.7 (6)
Vertical Open/Groundwater otwarty pionowy/woda gruntowa		\$55.00 (7)	\$853.4 (5)
Hybrid (Vertical closed loop and cooling tower) Mieszany (Obwód zamknięty pionowy i chłodnia kominowa)		\$112.70 (1)	\$1,472.0 (1)



Ryc. 1A. Koszt inwestycyjny GeoExchange (tu: geotermalnej pompy ciepła) wg rodzajów budynków (średnio, szkoły, biura, domy opieki, więzienia)

Fig. 1A. GeoExchange Capital Cost by Building Type



Ryc. 1B. Koszty eksploatacji i konserwacji wg rodzajów budynków

Fig. 1B. Operating and Maintenance Costs by Building Type

i 1B). Skoro tylko zostaną w pełni zrozumiane względne koszty, związane z różnymi rodzajami systemów, będzie możliwe użycie tej informacji do przeprowadzenia uproszczonej analizy kosztów cyklu życia w celu porównania względnych kosztów alternatywnych systemów.

KOSZTY INWESTYCYJNE

Zazwyczaj uważa się, że koszty inwestycyjne systemów geotermalnych pomp ciepła są większe niż odpowiadające im koszty większości, o ile nie wszystkich, innych systemów OWK. Jednakże, co wynika z tabeli 1 (Moore, 1999), istnieje duża rozpiętość kosztów inwestycyjnych w zależności od rodzaju budynku i typu instalacji obiegu w gruncie. Inne fluktuacje kosztów mogą być przypisane skali trudności wiercenia (skała czy zwykły grunt), szczególnie w powiązaniu z umiejętnościami oraz doświadczeniem wykonawców wierceń i instalacji otworowych. Innymi ważniejszymi

life cycle cost analysis in order to compare the relative costs of the alternatives.

CAPITAL COSTS

Capital costs for geothermal heat pump systems are normally thought to exceed the cost of most, if not all, of the alternative HVAC systems. However, as can be seen from Table 1 (Moore, 1999), there is considerable variability in the capital costs associated with installation in various building types and as much variability in capital cost dependent upon ground loop type. Other variations in capital cost can be attributed to the degree of difficulty in drilling (rock or soil type), and especially due to availability and experience of drilling contractors in drilling bores and installing downhole loops. Another major factor is ground or water temperature. In the case of the use of vertical loops, the thermal conductivity of grouting material can also play a major role as significant reductions in bore length may be achievable through the use of high-conductivity grouts.

Tabela 2. Koszty inwestycyjne tradycyjnych systemów ogrzewanie-wentylacja-klimatyzacja (OWK)
Table 2. Capital Costs of Conventional HVA Systems

HVAC System Type Typ systemu OWK	Capital Cost, \$/m ² (# of data pts) Koszt inwest., \$/m ² (liczba obiektów)
Rooftop DX (direct expansion) with electric heating Dachowy bezp. rozprężania z ogrzewaniem elektrycznym	\$52.00 (2)
Rooftop DX with gas heating Dachowy bezp. rozprężania z ogrzewaniem gazowym	\$61.00 (5)
Air-source heat pump Pompa ciepła ze źródłem powietrznym	\$74.70 (3)
Rooftop variable air volume (VAV) Dachowy o zmiennym przepływie powietrza	\$86.10 (4)
Water-source heat pump with gas boiler & cooling tower Pompa ciepła ze źródłem wodnym z kotłem gazowym & chłodnia kominowa	\$133.40 (11)
Central VAV with chiller, cooling tower, & gas perimeter heat Centralny o zmiennym przepływie powietrza z agregatem chłodniczym, chłodnia kominowa & gazowe obwodowe ogrzewanie powietrzem	\$161.60 (8)
Four-pipe fan coil unit with electric chiller & gas boiler 4-rurowy klimakonwektor wentylatorowy z elektrycznym elektrycznym agregatem & kocioł gazowy	\$170.70 (8)

czynnikami są temperatury gruntu i wody. W przypadku zastosowania pionowego obiegu, przewodność cieplna materiału cementacyjnego może grać większą rolę, ponieważ dzięki użyciu zaprawy o wysokiej przewodności znacząca redukcja głębokości odwiertu może być osiągalna.

Koszt inwestycyjny GPC, wyrażony w USD na metr kwadratowy podstawy, wynosi średnio $\$100 \pm /m^2$, wahając się od niskich $\$35,9/m^2$ dla pomieszczeń o charakterze komercyjnym, do tak dużych jak $\$134,90/m^2$ dla zakładów poprawczych (Moore, 1999). Niskie i wysokie koszty GPC odpowiadają całkiem nietypowym zastosowaniom. Moore (1999) odkrył, że koszt inwestycyjny dla obiektów handlowych był zafałszowany przez kilka budynków, które także obejmowały względnie duże powierzchnie magazynów i pomieszczeń obsługi, nieklimatyzowanych lub nie w pełni klimatyzowanych. To oczywiście dawało w wyniku bardzo niski koszt inwestycyjny na metr kwadratowy. Na drugim końcu spektrum kosztów, zakłady poprawcze, stacje benzynowe lub tradycyjne sklepy miały koszty inwestycyjne wyższe niż średnie. W przypadku zakładów poprawczych jest to przypisywane złożoności spowodowanej względami bezpieczeństwa, natomiast w przypadku stacji benzynowych lub tradycyjnych sklepów, powierzchnia podłogi jest mała w stosunku do obciążenia mocy. Obciążenie to może obejmować myjnię, chłodzenie (żywności) itp. (Moore, 1999). Dane dotyczące kosztów inwestycyjnych GPC występujące w tabeli 1 zostały nieco złagodzone przez informacje dostarczone projektem GPC, jak i tradycyjnych systemów OWK. Phil Schoen z Geo-Enterprises stwierdził, że w Oklahoma City School District (Rejon Szkół miasta Oklahoma), terenie z dobrze rozwiniętym zapleczem wiertniczym i instalacyjnym, koszty instalacyjne mieściły się w zakresie od $\$120$ do $\$150$ na metr kwadratowy, włączając pełne bezpośrednie sterowanie cyfrowe (DDC). Jednakże, sterując system GPC za pomocą prostego, programowanego termostatu zamiast pełnego DDC, można obniżyć koszt do około $\$100/m^2$. Robert Dooley z R. J. Dooley and Associates stwierdził, że systemy GPC dla szkół kosztują $\$120/m^2$ (Dooley, 1998).

Najbardziej kosztowne są systemy sprzężone z gruntem o pionowym zamkniętym obwodzie (tab. 1) ze względu na wysoki koszt wiercenia. Jednakże, jeśli łączna liczba odwiercanych stóp bieżących zostanie zredukowana przez zastosowanie materiału cementacyjnego o podwyższonej przewodności cieplnej, koszt wiercenia może się znacząco zmniejszyć (Allen and Kavanaugh, 1999). Systemy mieszane, składające się z zamkniętego pionowego obwodu połączonego z tradycyjną chłodnią kominową również znalazły się wśród największych wielkości na skali kosztów inwestycyjnych.

Koszty inwestycyjne dla systemów o poziomych o zamkniętych obwodach stanowią średnio mniej niż 50% kosztów systemów o pionowych, zamkniętych obwodach. Aczkolwiek, dla dużych instalacji, może okazać się niemożliwym znalezienie adekwatnej powierzchni dla zainstalowania systemu o poziomym

On a US\$ per square meter basis, GHP capital costs average $\$100 \pm /m^2$, ranging from a low of $35.9/m^2$ for commercial space to as much as $\$134.90/m^2$ for correctional facilities (Moore, 1999). The low and high GHP costs represent fairly atypical applications (Moore, 1999) found that the capital cost for retail space was skewed by several buildings that also included relatively large areas of warehouse or service spaces that were either unconditioned or under-conditioned. This, of course, tended to result in a very low capital cost per square meter. At the other end of the spectrum, correctional facilities and gas station/convenience stores have capital costs higher than average; with correctional facilities, this is attributable to the complexity brought about by security concerns and with gas stations/convenience stores, the floor area is small compared to the load. This load can include car wash, refrigeration, etc. (Moore, 1999). The GHP capital cost information found in Table 1 was somewhat tempered by information providing designs of GHP as well as conventional HVAC systems. Phil Schoen of Geo-Enterprises found that in the Oklahoma City School District, an area with a well-developed infrastructure of drillers and system installers, that installed costs ranged from $\$120$ to $\$150$ per square meter, including full direct digital control (DDC). However, by controlling the GHP system with simple, programmable thermostats instead of full DDC, that the cost could be lowered to about $\$100/m^2$. Robert Dooley of R. J. Dooley and Associates found that GHP systems for schools ran about $\$120/m^2$ (Dooley, 1998).

Vertical, closed-loop, ground loop systems are the most expensive (Table 1) due to the high cost of drilling. However, if the total number of vertical feet can be reduced through the use of enhanced thermal conductivity grouts, then the cost of drilling can be significantly reduced (Allen and Kavanaugh, 1999). Hybrid systems consisting of a vertical closed-loop combined with a conventional cooling tower were also found to be on the high end of the capital cost scale.

Capital costs for horizontal, closed-loop systems averaged less than 50 percent of the cost of the vertical, closed-loop systems. However, for large installations, it may be impossible to find adequate areas for the installation of a horizontal closed-loop system, and for retrofit applications, this is nearly always the case. One exception to this may be schools whose sport or play fields may provide the required open areas for horizontal systems.

An example of a system built without adequate area for a horizontal loop can be found in Walla Walla, Washington. The local Public Utility District decided to go with GHP and a horizontal loop layout for the heat exchanger. However, due to space limitations, the loop was installed in layers with approximately one vertical meter separating each of the loops. Unfortunately, due to soil conditions and the inadequate loop separation, the system did not achieve the heat exchange capacity necessary to operate the system efficiently and

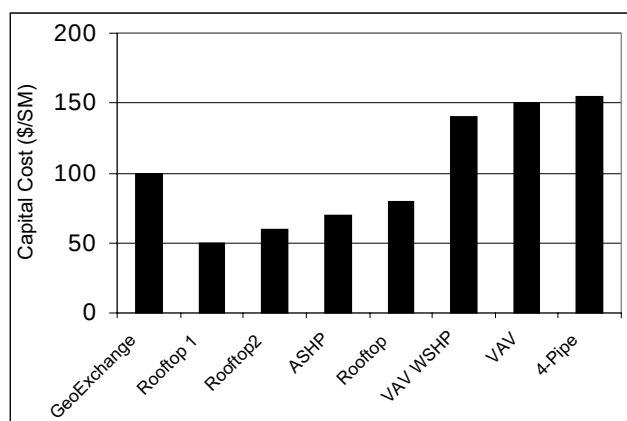
zamkniętym obwodzie, a tak się zdarza prawie zawsze w przypadku zastosowań, które dotyczą modernizacji obiektu. Jedynie wyjątkiem mogą być szkoły, których boiska sportowe i place do gier mogą stwarzać wystarczającą niezabudowaną powierzchnię do instalacji systemów poziomych.

Przykład systemu, który został zbudowany bez zapewnienia odpowiedniej powierzchni dla poziomego obwodu, można znaleźć w Walla Walla w stanie Waszyngton. Miejskowy Public Utility District (Rejon publicznych zakładów zaopatrzenia w media energetyczne) zdecydował się zainstalować GPC, z poziomym układem obwodu jako wymiennik ciepła. Jednak, ze względu na ograniczenia przestrzenne, zainstalowano obwody warstwami, z odstępem między nimi wynoszącym około 1 m w pionie. Niestety, ze względu na istniejące warunki gruntowe i nieodpowiednie rozdzielanie obwodów, system nie osiągnął wydajności wymiany ciepła, niezbędnej dla efektywnej pracy; temperatury w obwodzie osiągały w lecie 126°F, a w zimie spadały do 18°F (Bloomquist, 1999).

Jak zauważono powyżej, koszt inwestycyjny na metr kwadratowy dla stacji benzynowych lub tradycyjnych sklepów jest znacząco wyższy od średniego dla systemów GPC. Mimo to, takie instalacje są bardzo obiecującym i gwałtownie rozrastającym się segmentem przemysłu. Takie obiekty usługowe integrowały nie tylko ogrzewanie i chłodzenie (klimatyzację), ale też robienie lodu, chłodzenie żywności, topienie śniegu, i często ogrzewanie wody dla towarzyszących im myjni samochodowych. Koszty instalacji na metr kwadratowy były względnie wysokie dlatego, że potrzebny był rozbudowany system obiegu w gruncie, aby sprostać różnorodnym obciążeniom. Spośród ważniejszych kompanii naftowych, Phillips 66, Texaco, i Conoco przetarły drogę przez zainstalowanie GPC w wielorakich obiektach usługowych.

W tabeli 2 i na ryc. 2 (Moore, 1999), w celu porównania przedłożono koszt inwestycyjny tradycyjnych systemów OWK. Przy średniej tylko \$52/m², zespoły dachowe z elektrycznym opornościowym ogrzewaniem i elektrycznym chłodzeniem mają najniższe koszty inwestycyjne. Kiedy ogrzewanie elektryczne zostanie zastąpione przez ogrzewanie gazowe, koszt wzrasta do \$61/m². System z 4-rurowym klimakonwektorem wentylatorowym okazał się być najdroższym przy koszcie \$170,70/m². Koszty systemu o zmiennym przepływie powietrza (VAV) z elektrycznym agregatem chłodniczym, chłodnią kominową i kotłem gazowym dochodzą do \$161,60/m², a pomp ciepła ze źródłem wodnym (często przytaczane jako system California) z kotłem gazowym i chłodnią kominową do odpuszczania obwodu cyrkulacyjnego do \$133,40/m².

Moore (1999) stwierdził, że koszt inwestycyjny dla tradycyjnych systemów OWK, jaki przedstawia tabela 2, potwierdzony został przez praktyczną wiedzę projektantów OWK, z którymi przeprowadził wywiad. Na przykład, w Oklahoma City w stanie Oklahoma, system złożony z dachowego zespołu z elektrycznym



Ryc. 2. Koszt inwestycyjny wg typu systemu ogrzewanie-wentylacja-klimatyzacja

Rooftop1 - dachowy - bezpośrednie rozprężanie z ogrzewaniem elektrycznym, Rooftop2 - dachowy - bezpośrednie rozprężanie z ogrzewaniem gazowym, ASHP - pompa ciepła ze źródłem powietrznym, VAV - system ze zmiennym przepływem powietrza, WSHP - pompa ciepła ze źródłem wodnym

Figure 2. Capital Cost by HVAC System Type

NOTE: Rooftop1 = Rooftop DX with electric heat, Rooftop 2 = Rooftop DX with gas heat, ASHP = Air-source heat pump, VAV = Variable air volume, WSHP = Water-source heat pump

temperatures in the loop reached a summer high of 126°F and a winter low of 18°F (Bloomquist, 1999).

As was noted above, the capital cost per meter associated with gas stations/convenience stores is significantly above the average for GHP systems. However, such installations are a very promising and rapidly-growing segment of the industry. These facilities integrated not only heating and cooling, but ice making, refrigeration, snow melting, and often the heating of water for an associated car wash. While the installed costs per square meter were relatively high due to the need for an extensive ground-loop system to handle the various loads. GHP systems have been found to be both cost effective and easily adapted to the needs of the particular installation. Among the major oil companies, Phillips 66, Texaco, and Conoco have led the way by installing GHP systems at multiple facilities.

For comparison purposes, the capital cost of conventional HVAC systems are provided in Table 2 and Figure 2 (Moore, 1999). With an average cost of only \$52/m², rooftop units with electric resistance heating and electric cooling have the lowest capital costs. When the electric resistance heating unit is replaced with gas heating, the cost increases to \$61/m². The four-pipe fan coil system was found to be the most expensive at \$170.70/m². Variable air volume (VAV) systems with electric chiller, cooling tower, and gas boiler come in at \$161.60/m², and water-source (often referred to as a California heat pump system) with a gas boiler and cooling tower to temper the circulating loop come in at \$133.40/m².

The capital cost for conventional HVAC systems, as seen in Table 2, was found by Moore (1999) to agree with the experience of HVAC designers he interviewed. For example, a rooftop unit system with electric cooling and gas heating runs about \$70.00/m² in Oklahoma City,

chłodzeniem i gazowym ogrzewaniem sprzedaje się za około \$70,00/m², zależnie od złożoności instalacji i wybranego sposobu sterowania. Stwierdzono, że standardowy system pompy ciepła ze źródłem powietrznym sprzedaje się za w przybliżeniu \$80 - \$90/m², a 2-rurowy lub 4-rurowy system z agregatem chłodniczym, chłodnią kominową i centralnym kotłem kosztuje od \$150 - \$180/m².

Jeszcze jednym źródłem danych o kosztach wyposażenia jest Mechanical Cost Data opublikowane przez R. S. Means Company, Inc., Kingston, Massachusetts. Dane Means są regionalizowane i publikowane corocznie oraz traktowane jako standardowe do obliczania kosztów. Tabela 3 przedstawia typowe dane Means dla prostych systemów dachowych, obejmujące koszt materiałów, pracy, ogólnozakładowy wykonawcy oraz zysk. Koszty jakie pokazano dotyczą jednostrefowych systemów dachowych w zakresach większej pojemności i dobrze się korelują z kosztami w tabeli 2.

KOSZTY EKSPLOATACJI

Dane, dotyczące kosztów eksploatacji zestawione w tabeli 4 i na ryc.3, mają mieszany charakter. Oparte są o rzeczywiste faktury usług i szacunki inżynierskie. Większość kosztów eksploatacji GPC, zebranych przez Moore'a (1999) pochodzi z analiz przypadków i reprezentuje koszty rzeczywiste. Z kolei, większość kosztów dla tradycyjnych systemów OWK to szacunki inżynierskie wykonane w czasie analizy przed wyborem alternatywy z GPC. Niektóre z analiz jednakże opierały się na przypadkach modernizacji już istniejących systemów, więc stworzyło to okazję porównania systemu GPC z tym, który został zastąpiony.

Oklahoma, depending upon complexity of the installation and controls selected. A standard air-source heat pump system was found to run approximately \$80 - \$90/m², and a two-pipe or four-pipe system with a chiller, cooling tower, and central boiler cost from \$150 - \$180/m².

Another source of data on equipment cost is the Mechanical Cost Data published by the R. S. Means Company, Inc., of Kingston, Massachusetts. The Means data is regionalized and published yearly, and is the accepted standard for cost estimating. Table 3 presents typical Means data for simple rooftop systems and includes material, labor and contractor overhead, and profit. The costs as shown are for single-zone rooftop systems in the larger capacity ranges and correlates well with the costs in Table 2.

OPERATING COSTS

Operating costs summarized in Table 4 and Figure 3 are a mixture of actual utility bills and engineering estimates. Most of the GHP operating cost data gathered by Moore (1999) was gathered from case studies and represents actual costs. Most of the operating costs for conventional HVAC systems, on the other hand, are engineering estimates developed during the analysis prior to selection of the GHP alternative. Some of the case studies, however, were based on retrofits of existing systems, thus providing the opportunity to compare the GHP system to the system that was replaced.

Unfortunately, Moore (1999) was unable to obtain operating cost data for each and every building type for which capital cost data was available.

Tabela 3. Koszty inwestycyjne zespołów dachowych (źródło: RS Means)
Table 3. Capital Costs of Rooftop Units from RS Means

Rooftop Unit and Building Type Zespół dachowy Rodzaj budynku	Capacity Range (tons) Zakres pojemności	kW	Small Capacity (\$/m ²) Mała pojemność	Large Capacity (\$/m ²) Duża pojemność
SINGLEZONE jednostrefowy				
Offices Biura	1.58 to 31.67	5.53 to 110.85	\$113.60	\$72.90
Schools and Colleges Szkoły i uczelnie	1.92 to 38.33	6.72 to 134.16	\$137.90	\$87.50
Medical Centers Centra medyczne	1.17 to 23.33	4.10 to 81.66	\$83.70	\$55.40
Department Stores Domy towarowe	1.46 to 29.17	5.11 to 102.10	\$104.60	\$67.20
MULTIZONE Wielostrefowy				
Offices Biura	9.5 to 79.16	33.25 to 277.061	\$185.50	\$118.50
Schools and Colleges Szkoły i uczelnie	11.5 to 95.83	40.25 to 335.41	\$198.00	\$144.00
Medical Centers Centra medyczne	7 to 58.33	24.50 to 204.16	\$136.60	\$87.30
Department Stores Domy towarowe	8.75 to 72.9	30.63 to 255.15	\$170.50	\$109.00

Niestety, Moore (1999) nie był w stanie uzyskać danych odnośnie kosztów eksploatacji dla każdego bez wyjątku typu budynku, dla którego koszty inwestycyjne były dostępne.

Koszty eksploatacyjne energii dla wszystkich ocenianych systemów GPC wyniosły średnio $\$8.0/\text{m}^2/\text{rok}$, podczas gdy dla mieszanych rodzajów tradycyjnych systemów OWK - $\$11,20/\text{m}^2/\text{rok}$. Daje to średnio 29%, biorąc pod uwagę wszystkie oszczędności w kosztach eksploatacyjnych. Zastosowane GPC w szkołach i obiektach handlowych miały najniższe średnie koszty eksploatacyjne energii ($\$5,90$ i $\$5,80/\text{m}^2/\text{rok}$ odpowiednio).

Technologia GPC pozwoliła zaoszczędzić szkołom 36% w kosztach eksploatacji energii. Ponieważ większość szkół jest całkowicie lub częściowo nieczynna w letnich miesiącach, koszty energii zarówno GPC, jak i tradycyjnych systemów OWK znalazły się na niskim poziomie kosztów, w dużej mierze z powodu braku potrzeby klimatyzacji w lecie.

Tak jak w przypadku kosztów inwestycyjnych, koszty eksploatacyjne GPC dla obiektów handlowych są także zniekształcone przez budynki obejmujące magazyny i pomieszczenia obsługi, które albo nie są chłodzone albo tylko częściowo klimatyzowane. To obniża koszt eksploatacji na metr kwadratowy. Jednakże nawet w tych nietypowych sytuacjach okazało się, że system GPC dał oszczędności rzędu 39%.

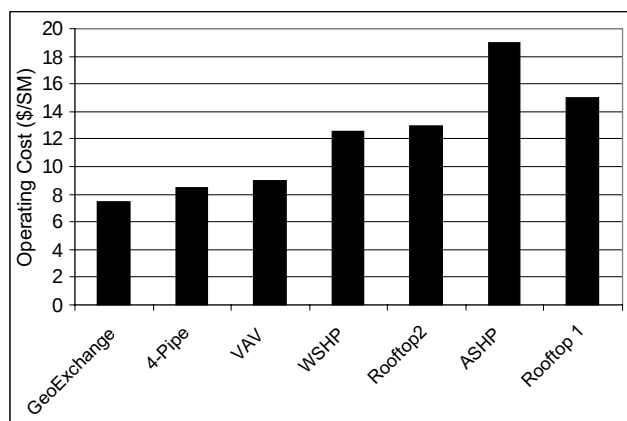
Moore (1999) stwierdził, że w zakładach poprawczych, systemy GPC dały tylko 2% oszczędności kosztów w stosunku do tradycyjnych systemów OWK. Niestety, porównanie wykonano tylko dla trzech systemów i może nie być reprezentatywne.

Podobnie, jak w przypadku kosztów inwestycyjnych, koszty eksploatacyjne na metr kwadratowy zintegrowanych zastosowań GPC dla stacji benzynowych lub tradycyjnych sklepów są bardzo wysokie w porównaniu z kosztami systemów, które dostarczają tylko ogrzewanie, chłodzenie i ciepłą wodę użytkową. Te wysokie koszty eksploatacyjne są przypisywane dodatkowemu obciążeniu na rzecz wytwarzania lodu, chłodzenia żywności, topienia śniegu, dostarczenia gorącej wody dla myjni samochodowych.

Tabela 5 porównuje koszty eksploatacji energii opracowane przez Moore'a (1999) dla systemów GPC z kosztami tradycyjnych systemów OWK. Załączył on tylko te koszty, które były dostępne dla obu rodzajów systemów GPC i tradycyjnych OWK.

KOSZTY KONSERWACJI

Dane dotyczące kosztów konserwacji były o wiele trudniejsze do zdobycia i Moore'owi (1999) udało się to tylko dla ograniczonej liczby systemów (tab. 6 i ryc. 4). Aczkolwiek od zakończenia jego badań, większy wysiłek w celu zgromadzenia takich danych został podjęty przez Geothermal Heat Pump Consortium (Konsorcjum Geotermalnych Pomp Ciepła) i przez United States Department of Energy (Departament Energii USA).



Ryc. 3. Koszty eksploatacji wg typu systemu ogrzewania-wentylacja-klimatyzacja

Rooftop1 - dachowy - bezpośrednie rozprężanie z ogrzewaniem elektrycznym, Rooftop2 - dachowy - bezpośrednie rozprężanie z ogrzewaniem gazowym, ASHP - pompa ciepła ze źródłem powietrznym, VAV - system ze zmiennym przepływem powietrza, WSHP - pompa ciepła ze źródłem wodnym

Figure 3. Operating Costs by HVAC System Type

NOTE: Rooftop1 = Rooftop DX with electric heat, Rooftop 2 = Rooftop DX with gas heat, ASHP = Air-source heat pump, VAV = Variable air volume, WSHP = Water-source heat pump

For all GHP systems evaluated, energy operating costs averaged $8.0/\text{m}^2/\text{year}$, while the mixture of conventional HVAC system types averaged $\$11.20/\text{m}^2/\text{year}$. This is an average across the board savings in operating costs of 29 percent. GHP applications in schools and retail space were found to have the lowest energy operating cost on average ($\$5.90$ and $\$5.80/\text{m}^2/\text{year}$, respectively).

GHP technology saved schools 36 percent in energy operating costs. Since most schools are unused or underutilized during the summer months, both GHP and conventional HVAC energy costs are on the low end of the spectrum, largely because of the lack of summer air conditioning requirements.

As was the case with capital costs for retail space, GHP operating costs are also skewed by buildings that include warehouse and service areas that are either not cooled or under conditioned. This drives down the operating cost per square meter. However, even in these atypical situations, GHP systems were found to provide a cost savings of 39 percent.

Moore (1999) found that in correctional facilities, GHP systems resulted in only a 2 percent cost savings as compared to the conventional HVAC systems. Unfortunately, the comparison involved only three systems and may not be representative.

As was the case with capital costs, operating costs per square meter for integrated CHP applications in gas stations/convenience stores is very high compared to systems that provided only heating, cooling, and domestic hot water. The high operating cost is attributed to additional loads for ice making, refrigeration, snow melting, and provision of hot water for car washes.

Tabela 4. Koszty energii GeoExchange (tu: geotermalnych pomp ciepła) i tradycyjnych systemów OWK wg typów budynków i systemów instalacji w gruncie
 Table 4. GeoExchange and Conventional HVAC System Energy Costs by Building and Ground-Loop Type

	Building Energy Costs, \$/m ² /YR (# of data points)		
Weighted Average of: Średnia dla:	GeoExchange	Conventional HVAC Tradycyjne OWK	Savings Oszczędności
Building Type Typ budynku			
All Sites and References Wszystkie umiejscowienia i odniesienia	\$8.00 (52)	\$11.20 (42)	29%
Schools Szkoły	\$5.90 (22)	\$9.20 (19)	36%
Office Buildings Biurowce	\$9.90 (10)	\$13.90 (8)	29%
Retail Handel detaliczny	\$5.80 (4)	\$9.50 (3)	39%
Retirement Domy emerytów	\$9.50 (2)	\$13.30 (3)	26%
Prisons Więzienia	\$11.90 (2)	\$12.20 (1)	2%
Gas Station/Conv. Store Stacja benzynowa/Supermarket	\$89.90 (1)	\$122.30 (1)	26%
Ground Loop Type Typ wymiennika w gruncie			
Horizontal Sites Poziomy wymiennik	\$4.70 (6)	\$8.90 (3)	47%
Vertical Sites Pionowy wymiennik	\$8.20 (34)	\$11.30 (33)	27%
Groundwater Sites Wymiennik w wodach gruntowych	\$8.10 (6)	\$10.50 (3)	23%

Tabela 5. Koszty energii geo-wymiany (tu: geotermalnych pomp ciepła) i tradycyjnych systemów OWK wg typów tradycyjnych systemów OWK
 Table 5. GeoExchange and Conventional HVAC System Energy Costs by Conventional HVAC System Type

	Building Energy Costs, \$/m ² /YR (# of data points) Koszt energii dla budynku, \$/m ² /rok (liczba obiektów)		
Conventional HVAC System Type Tradycyjny typ systemu OWK	GeoExchange	Conventional HVAC Tradycyjne OWK	Savings Oszczędności
Rooftop DX with gas heating Dachowy DX z ogrzewaniem gazowym	\$9.70 (4)	\$12.50 (4)	22%
Rooftop DX with electric heating Dachowy DX z ogrzewaniem elektrycznym	\$12.10 (2)	\$17.50 (2)	31%
Air-source heat pump Pompa ciepła ze źródłem powietrznym	\$8.70 (3)	\$14.80 (3)	41%
Water-source heat pump Pompa ciepła ze źródłem wodnym	\$7.30 (3)	\$9.00 (3)	30%
Four-pipe fan coil unit 4-rurowy klimakonwektor wentylatorowy	\$6.30 (6)	\$8.60 (6)	27%
Two-pipe fan coil unit 2-rurowy klimakonwektor wentylatorowy	\$4.90 (4)	\$6.00 (4)	18%

- 1) DX = direct expansion / bezpośrednie rozprężanie
- 2) The water-source heat pump system includes a cooling tower and gas boiler / pompa ciepła ze źródłem wodnym obejmuje chłodnię kominową i kocioł gazowy
- 3) The central VAV system includes an electric chiller, cooling tower, and gas-fired perimeter heating or hot water reheat / centralny system o zmiennym przepływie powietrza obejmuje elektryczny agregat chłodniczy, chłodnię kominową, ogrzewanie powietrzne obwodowe gazowe
- 4) Four-pipe and two-pipe systems have an electric chiller and gas boiler / system 4-rurowego i 2-rurowego klimakonwektora posiada elektryczny agregat chłodniczy i kocioł gazowy

Tabela 6. Porównanie całkowitych kosztów konserwacji wg typu systemu
Table 6. Comparison of Total Maintenance Costs by System Type

Equipment Type Typ wyposażenia	No. Of Bldgs. Liczba bud.	Avg. Age Średni wiek	Mean Maint. Cost (\$/SM/YR) Średni koszt kons. (\$/m ² /rok)	Maint. Cost Range (\$/SM/YR) Zakres kosztów (\$/m ² /rok)	Mean Maint. Cost, 97\$ (\$/SM/YR) Średni koszt kons. 97\$ (\$/m ² /rok)
Geothermal Heat Pump ^a Geotermalna pompa ciepła	25	5.0	10.0 ^c	.50 - 34.70 ^c	10.00
Water-Source Heat Pump ^b Pompa ciepła ze źródłem wodnym	17	17.5	21.80 ^d	2.00 - 75.00 ^d	33.30
Packaged Air-to-Air Heat Pump ^b Obudowana pompa ciepła powietrze-powietrze	10	1.51	33.00 ^d	11.00 - 62.00 ^d	50.30
Split System Air-to-Air Heat Pump ^b Wieloczęściowy system pompy ciepła powietrze-powietrze	6	23.7	26.40 ^d	9.60 - 49.30 ^d	40.20
Reciprocating Chiller ^b Tłokowy agregat chłodniczy	76	22.2	28.80 ^d	5.90 - 140.30 ^d	43.90
Centrifugal Chiller ^b Wirówkowy agregat chłodniczy	207	20.7	36.30 ^d	1.60 - 266.00 ^d	55.30
Absorption Chiller ^b Absorpcyjny agregat chłodniczy	27	29.3	52.20 ^d	6.20 - 126.20 ^d	79.60

Uwagi:

1. Average of in-house (incl. overhead and benefits) and contractor (incl. overhead and profit) total maintenance costs for most recent year of Caneta Research study / średnia kosztów konserwacji własnej (k. ogólne i korzyści) i wykonawcy zewnętrznego (k. ogólne i zysk) z ostatnich lat z opracowania korporacji Caneta Research
2. Data for conventional HVAC systems in Caneta Research Study come from Analysis of Survey Data on HVC Maintenance Costs, ADM Associates, Inc., prepared for ASHRAE Technical Committee 1.8, December 1985 / dane dla tradycyjnych systemów OWK w opracowaniu korporacji Caneta Research pochodzą z: „Analiza danych ankietowych kosztów konserwacji systemów OWK”, ADM Associates, Inc., przygotowanej dla ASHRAE Technical Committee 1 – 8 grudnia 1985
3. 1997 r. - dollars
4. 1983 r. - dollars

Źródło: *Survey and Analysis of Maintenance and Service Costs in Commercial Building Geothermal Systems*, D. Cane, A. Morrison, B. Clemes, C. Ireland, Caneta Research Inc., for the Geothermal Heat Pump Consortium, RP-024, Revised Oct. 97.
Source: *Survey and Analysis of Maintenance and Service Costs in Commercial Building Geothermal Systems*, D. Cane, A. Morrison, B. Clemes, C. Ireland, Caneta Research Inc., for the Geothermal Heat Pump Consortium, RP-024, Revised Oct. 97.

Autor podjął się wykonania dużej części pracy w imieniu obu organizacji (Bloomquist, 1999) (Tabela 7). Dodatkowo ASHRAE obecnie sponsoruje projekt uaktualnienia danych odnośnie konserwacji, przedstawionych w wydaniach ASHRAE Application Handbook w 1991 i 1995 r. Dane te pochodziły z badań przeprowadzonych w latach 1985-1986 przez Dohrmanna i Alerezę z ADM Associates, Inc. Wydanie nowej publikacji na temat wymogów i kosztów konserwacji przez ASHRAE spodziewane jest w 2001 lub na początku 2002 r.

Pierwotnie Moore (1999) opierał się na kosztach konserwacji systemów GPC opracowanych w badaniach wykonanych przez Caneta Research w 1997 r., a sponsorowanych przez Geothermal Heat Pump Consortium. Przy porównaniu do tradycyjnych systemów, opracowanie Caneta Research odwoływało się do kosztów konserwacji podanych w opracowaniu z 1985-86 przez Dohrmanna i Alerezę.

W opracowaniu Caneta stwierdzono, że dane ASHRAE cytowane za Dohrmannem i Alerezą są przestarzałe i odzwierciedlają koszty konserwacji dla starszego wyposażenia zbliżającego się do kresu użytkowania. Jak się można spodziewać, wyposażenie bliskie końca jego użytkowania wymaga o wiele więcej zabie-

Table 5 compares the energy operating cost developed by Moore (1999) for GHP systems to conventional HVAC system types. He included only data for those applications for which energy costs were available for both GHP and conventional HVAC system.

MAINTENANCE COSTS

Maintenance cost data has been the most difficult to obtain and was available to Moore (1999) for only a limited number of systems (Table 6 and Fig. 4). However, since completion of his research, a major effort to gather such information was initiated by the Geothermal Heat Pump Consortium and by the United States Department of Energy. A great deal of this work was undertaken on behalf of both organizations by the author (Bloomquist, 1999) (Table 7). In addition, ASHRAE is currently sponsoring a project to update the maintenance data presented in the 1991 and 1995 editions of the ASHRAE Application Handbook. That information was originally gathered during the 1985-86 study by Dohrmann and Alereza of ADM Associates, Inc. A new publication on GHP maintenance requirements and cost is expected to be released by ASHRAE in 2001 or early in 2002.

Tabela 7. Konserwacja systemów geotermalnych pomp ciepła
Table 7. Geothermal Heat Pump System Maintenance

Site Nazwa obiektu	Date GSHP Installed Rok instalacji	Square Meter Powierzchnia m ²	kW	kW/10m ² Square Meter Powierz.	Maintenance Cost \$0.00/m ² /Year Koszt konserw. \$0.00/m ² /rok
Beaver Lake Middle School	1994	10,900	879	2.29	2.3 – 3.5
Bryant College	1996	4,139	281	1.94	0.1
Clark County PUD Administration	1957 1989*****	3,200	352	3.13	5.0
Exchange Building	1971	26,500	3,848	3.98	1.6
Grant County Courthouse	1982	5,200	1,055	5.77***	1.1
Haverhill Public Library	1994	4,400	378	2.43	0.9 – 1.4
Heritage College Library	1991	1,740	171	2.66	6.4 ¹
Inn of the Seventh Mountain	1992	22,880	1,759	1.79	1.6
Kittitas Middle School	1991	3,900	295	2.15	2.0
LDS Office Tower	1972	68,300	7,913	3.30	1.3 – 1.5
Lane Community College	1981	5,800	387	1.55	1.2 ²
North Bonneville City Hall	1995	4,600	35	2.17	0.5
Parkview Apartments	1965	20,740	1,407	1.93	1.2 – 1.5
Squaw Valley Day Care	1993	2,300	141	1.66	.2 – 0.3
Sundown M Ranch	1985	6,180	700	3.22	1.2 – 1.5 total square footage
	1990	2,065	197	3.71	
	1992	3,973	524	3.75	
	1995	750	102	3.87	
Tacoma City Light	1954	13,000	1,231	2.69	5.1
Tower Building	1980	133,000	1,055	2.25	1.1
Walla Walla Community College	1974	10,000	2,110	6.00****	1.0 - 1.5
Walla Walla Corps of Engineers	1995	9,143	2,110	3.13	5.7*
Whitman College Science Building	1964	8,800	422	1.36	0.5
Whitman College Administration Building	1988	3,000	352	3.33	>1.0
Yakima County Correctional Facility	1983	18,000	1,055	1.66	0.6 – 0.8

* Umowa konserwacji

** zawiera \$0,025 na stopę kw./rok za obróbkę chemiczną

*** system zaprojektowany dla zasilania centrum prawa i sprawiedliwości, które nigdy nie podłączono do niego. 150 ton lub 2,88 ton/stopę kw. zaspokaja zapotrzebowanie budynków podłączonych do systemu

**** System zaprojektowany na wypadek rozbudowania kampusu uczelni, która jeszcze nie nastąpiła

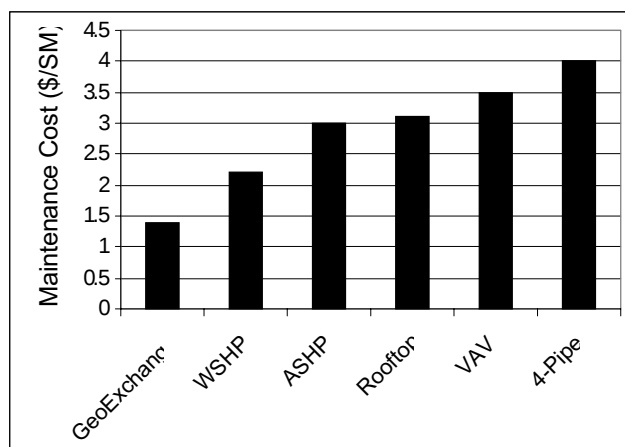
***** Pierwotny układ zawierał 100-tonowy wirówkowy agregat chłodniczy wynajęty w 1989 r. z 30-tonowym i 20-tonowym, kompresorami tłokowymi.

total square footage – całkowita liczba stóp kwadratowych

gów konserwacyjnych i napraw niż, na przykład średnio 5-letnie wyposażenie, które stanowi większą część systemów GPC ocenionych przez Caneta. Jeśli nawet przyjąć z grubsza, że średni koszt konserwacji GPC wynoszący \$1.01/m² byłby dwa razy większy ze względu na wiek wyposażenia, to byłby on ciągle 39% mniejszy niż dla systemu pompy ciepła ze źródłem wodnym (system California), zgodnie z danymi ASHRAE. Autor stwierdził, że koszt konserwacji systemów nawet 20-letnich i starszych wynosił średnio \$1.3/m² (tab. 7). Koszty konserwacji GPC mogą być potrojone i jeszcze zaoszczędzi się 45% w zestawieniu z danymi ASHRAE dla wirówkowego agregatu chłodniczego (Moore, 1999).

Koszty konserwacji systemów GPC i tradycyjnych, przeanalizowane przez Moore'a (1999) pokazano w tabeli 8. Moore'a (1999) kompletując dane dla ustalenia kosztów konserwacji opierał się o ograniczoną liczbę systemów i obiektów dla ich instalacji.

Jednakże Moore (1999) musiał stwierdzić, że chociaż systemy GPC wydają się oferować znaczące korzyści, zmienne danych kosztów konserwacji zarówno literaturowe, jak i informacje zestawione przez autora



Ryc. 4. Koszty konserwacji wg typu systemu ogrzewanie- wentylacja-klimatyzacja

Rooftop - dachowy - bezpośrednie rozprężanie z ogrzewaniem gazowym, ASHP - pompa ciepła ze źródłem powietrznym, VAV - system ze zmiennym przepływem powietrza, WSHP - pompa ciepła ze źródłem wodnym

Figure 4. Maintenance Costs by HVAC System Type

NOTE: Rooftop = Rooftop DX with gas heat, ASHP = Air-source heat pump, VAV = Variable air volume, WSHP = Water-source heat pump

Tabela 8. Koszty konserwacji geotermalnych pomp ciepła i tradycyjnych systemów OWK wg typów budynków i typów systemów

Table 8. GeoExchange and Conventional HVAC System Maintenance Costs by Building and System Type

	Maintenance Costs, \$/m ² /Yr (# of data points) Koszt konserwacji, \$/m ² /Yr (liczba obiektów)		
Weighted Average of: Średnia ważona	GeoExchange	Conventional HVAC Tradycyjny system OWK	Savings Oszczędności
All Sites and References Wszystkie umiejscowienia i odniesienia	\$1.40 (13)	\$3.60 (15)	61%
Building Type Typ budynku			
Schools Szkoły	\$1.30 (10)	\$3.70 (11)	65%
Office Buildings Biurowce	\$2.70 (1)	\$3.40 (1)	21%
Retirement Domy emerytów	\$1.00 (1)	\$2.50 (2)	60%
Prisons Więzienia	\$1.50 (1)	\$4.80 (1)	69%
Conventional HVAC System Tradycyjne systemy OWK			
Rooftop DX with gas heating Dachowy DX z ogrzewaniem gazowym	\$1.10 (1)	\$3.30 (1)	67%
Air-source heat pump pompa ciepła ze źródłem pow.	\$1.10 (1)	\$3.00 (1)	63%
Water-source heat pump pompa ciepła ze źródłem wodnym	\$1.50 (4)	\$2.30 (4)	35%
Central variable air volume (VAV) centralne o zmiennym przepływie pow.	\$1.10 (1)	\$3.50 (1)	69%
Four-pipe fan coil unit 4-rurowy klimakonwektor wentylatorowy	\$1.70 (5)	\$4.00 (5)	58%
Two-pipe fan coil unit 2-rurowy klimakonwektor wentylatorowy	\$.80 (1)	\$3.10 (1)	74%

w jego badaniach, nie są wystarczająco silne aby mieć moc perswazyjną. Jednak, kiedy dane zebrane przez autora (tab. 7) zostaną wzięte pod uwagę, okazuje się, że początkowy wniosek Moore'a może być uzasadniony. Niestety, nie można oczekiwać, że ogół społeczności projektantów systemów OWK w pełni uzna przewagę kosztów konserwacji systemów GPC, dopóki ASHRAE nie zakończy swoich starań i nie opublikuje nowelizację Applications Handbook z 1999 r.

Geothermal Heat Pump Consortium sponsorowało opracowanie oprogramowania, które potencjalni projektanci lub użytkownicy GPC mogą używać do oszacowania i porównania kosztów inwestycyjnych, eksploatacyjnych i konserwacyjnych GPC z tradycyjnymi systemami OWK dla zastosowań w szkołach i hotelach. Moore (1999) użył oprogramowania przeznaczonego dla szkół w celu sprawdzenia zasadności kosztów konserwacji zestawionych dla jego pracy badawczej w 1999 (tab. 9). Porównując tabele 8 i 9, można stwierdzić, że zestawione koszty konserwacji zarówno dla GPC, jak i tradycyjnych systemów OWK zgadzają się całkiem dobrze z obliczonymi przy użyciu oprogramowania dla zastosowań w szkołach opracowanego przez R. J. Dooley and Associates.

ANALIZA EKONOMICZNA

Moore (1999) zebrał koszty inwestycyjne, eksploatacyjne i konserwacji dla systemów geotermalnych pomp

Moore (1999) relied primarily on maintenance costs for GHP systems developed during a 1997 Caneta Research study sponsored by the Geothermal Heat Pump Consortium. For comparison to conventional HVAC systems, the Caneta Research study relied on maintenance costs from the 1985-86 study by Dohrmann and Alereza.

The Caneta study concluded that the ASHRAE data from Dohrmann and Alereza are dated and reflected the maintenance costs for older equipment approaching the end of its useful life. As would be expected, equipment nearing the end of its useful life would require much more maintenance and repair than, for example, the average five-year-old equipment that made up the bulk of the GHP system evaluated by Caneta. However, even if the mean GHP maintenance cost of \$1.01/m² were doubled in a crude attempt to account for equipment age, maintenance costs would still be 39 percent less than for a water source (California system) heat pump system according to the ASHRAE data. This author found that even systems 20 or more years old had maintenance costs that average ca \$1.3/m² (Table 7). The GHP maintenance costs could be tripled and still save 45 percent compared to ASHRAE's data for a centrifugal chiller system (Moore, 1999).

Maintenance costs for the GHP and conventional system looked at by Moore (1999) are shown in Table 8. The cost data completed by Moore (1999) for

Tabela 9. Koszty konserwacji GPC i tradycyjnych systemów OWK oszacowane przez GeoSchool Software
Table 9. GeoExchange and Conventional HVAC System Maintenance Costs Estimated by GeoSchool Software

HVAC System Type Typ systemu OWK	Maintenance Costs, \$/m ² /YR Koszt konserwacji	Savings with GeoExchange Oszczędność
GeoExchange tu: geotermalna pompa ciepła	\$1.10	n/a
Water-source heat pump pompa ciepła ze źródłem wodnym	\$2.50	56%
Air-source heat pump Pompa ciepła ze źródłem powietrznym	\$3.00	63%
Rooftop DX with gas heating Dachowy DX z ogrzewaniem gazowym	\$3.30	67%
Central variable air volume (VAV) Centralny o zmiennym przepływie powietrza	\$3.50	69%
Four-pipe fan coil unit 4-rurowy klimakonwektor wentylatorowy	\$3.60	69%

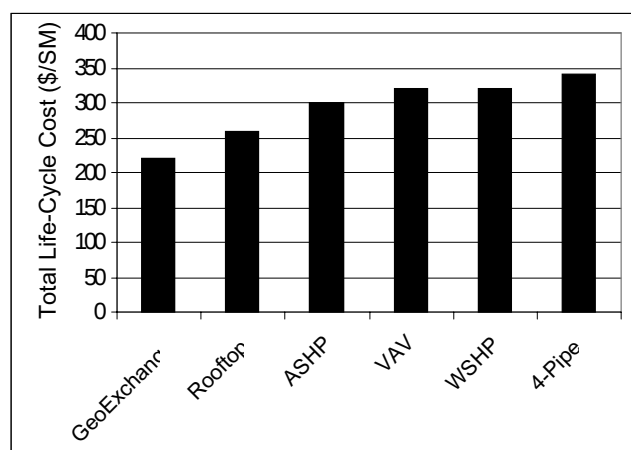
Źródło: GeoSchool software dostarczone przez R.J. Dooley & Associates. Opracowanie Software było sponsorowane przez Geothermal Heat Pump Consortium.

Source: GeoSchool software was provided by R.J. Dooley & Associates. Software development was sponsored by the Geothermal Heat Pump Consortium.

ciepła (GPC) i różnych typów tradycyjnych systemów ogrzewania -wentylacji - klimatyzacji (OWK). Na podstawie tych danych mógł przeprowadzić uproszczoną analizę kosztów cyklu życia dla sześciu systemów OWK (ryc. 5). Były to:

1. geotermalna pompa ciepła
2. system dachowy o bezpośrednim rozprężaniu z ogrzewaniem gazowym
3. pompa ciepła ze źródłem powietrznym
4. pompa ciepła ze źródłem wodnym (typ California)
5. centralny ze zmiennym przepływem powietrza
6. cztero-rurowy klimakonwektor

Wyniki analizy kosztów cyklu życia pokazano w tabeli 10. W analizie przyjęto dwie różne stopy dyskontowe (4,5% i 6%). Przy wyborze stóp Moore (1999) najpierw rozważał dwie ogólne zasady: (1) stopa podstawowa plus 1% i (2) stopa 30-letniej obligacji



Ryc. 5. Koszty całkowite cyklu życia

Rooftop - dachowy - bezpośrednie rozprężanie z ogrzewaniem gazowym, ASHP - pompa ciepła ze źródłem powietrznym, VAV - system ze zmiennym przepływem powietrza, WSHP - pompa ciepła ze źródłem wodnym

Figure 5. Total Life-Cycle Costs

NOTE: Rooftop = Rooftop DX with gas heat, ASHP = Air-source heat pump, VAV = Variable air volume, WSHP = Water-source heat pump

maintenance costs is based on a relatively limited number of systems and their data points.

Although Moore (1999) had to conclude that although GHP systems appear to offer significant advantages, the maintenance cost data variable from both the literature and the information he compiled through the course of his research was are not sufficiently robust to be persuasive. However, when that data collected by the author (Table 7) is taken into consideration, it appears that Moore's initial conclusion can be substantiated. Unfortunately, the HVAC design community at large is not expected to fully accept the maintenance cost advantage of GHP systems until ASHRAE completes its efforts and publishes a revision of the 1999 Applications Handbook.

The Geothermal Heat Pump Consortium has sponsored the development of software that potential GHP system designers or users can use to estimate and compare the capital, operation and maintenance costs of GHP, and conventional HVAC systems in schools and hotels. The software devoted to schools was used by Moore (1999) to check the reasonableness of the maintenance costs compiled for his 1999 research study (Table 9). Comparing Tables 8 and 9, the maintenance cost from data compiled of both GHP and conventional HVAC systems match fairly well with those estimates obtained through the use of the R. J. Dooley and Associates software for school application.

ECONOMIC ANALYSIS

Moore (1999) collected capital and operating and maintenance costs for GHP systems and various types of conventional HVAC systems. From this data, he was able to conduct simplified life-cycle cost analyses for six HVAC system types (Fig. 5). These systems were:

1. Geothermal heat pump,
2. Rooftop DX with gas heating,

Tabela 10. Analiza kosztów działania systemu
Table 10. Life-Cycle Cost Analysis

System Type Typ systemu	Capital Cost (\$/m ²)	Operating Cost (\$/m ² /YR)	Maintenance Cost (\$/m ² /YR)	Simple Payback (years)	20-Year Present Value of Operating Costs (\$/m ²)	20-Year Present Value of Maint. Costs (\$/m ²)	Total 20-Year Life-Cycle Cost, or LCC (\$/m ²)	Savings Oszczędności
4.5% Discount Rate, No Operating or Maintenance Cost Escalation								
GeoExchange	\$100.10	\$8.00	\$1.40	n/a	\$104.10	\$18.20	\$222.40	n/a
Rooftop DX w/ gas	\$61.00	\$12.50	\$3.30	6.11	\$162.60	\$42.90	\$266.50	22%
ASHP	\$74.70	\$14.80	\$3.00	3.02	\$192.50	\$39.00	\$306.20	32%
WSHP	\$133.40	\$12.40	\$2.30	immed.	\$161.30	\$29.90	\$324.60	36%
VAV	\$161.60	\$9.00	\$3.50	immed.	\$117.10	\$45.50	\$324.20	36%
Four-Pipe	\$170.70	\$8.60	\$4.00	immed.	\$111.90	\$52.00	\$334.60	38%
6.0% Discount Rate, No Operating or Maintenance Cost Escalation								
GeoExchange	\$100.10	\$8.00	\$1.40	n/a	\$91/8	\$16.1	\$207.90	n/a
Rooftop DX w/gas	\$61.00	\$12.50	\$3.30	6.11	\$143.40	\$37.90	\$242.20	14%
ASHP	\$74.70	\$14.80	\$3.00	3.02	\$16.98	\$34.40	\$278.90	14%
WSHP	\$133.40	\$12.40	\$2.30	immed.	\$142.20	\$26.40	\$302.00	31%
VAV	\$161.60	\$9.00	\$3.50	immed.	\$103.20	\$30.10	\$305.00	32%
Four-Pipe	\$170.70	\$8.60	\$4.00	immed.	\$98.60	\$45.90	\$315.20	34%
4.5% Discount Rate, 2.0% Operating and Maintenance Cost Escalation								
GeoExchange	\$100.10	\$8.00	\$1.40	n/a	\$125.30	\$21.9	\$247.30	n/a
Rooftop DX x/ gas	\$61.00	\$12.50	\$3.30	6.11	\$195.80	\$51.70	\$308.50	33%
ASHP	\$74.70	\$14.80	\$3.00	3.02	\$231.80	\$47.00	\$353.50	41%
WSHP	\$133.40	\$12.40	\$2.30	immed.	\$194.20	\$36.00	\$363.60	43%
VAV	\$161.60	\$9.00	\$3.50	immed.	\$141.00	\$54.80	\$357.40	42%
Four-Pipe	\$170.70	\$8.6	\$4.00	immed.	\$134.70	\$62.60	\$368.00	44%
6.0% Discount Rate, 2.0% Operating and Maintenance Cost Escalation								
GeoExchange	\$100.10	\$8.00	\$1.40	n/a	\$109.50	\$1.92	\$22.87	n/a
Rooftop DX w/ gas	\$61.00	\$12.50	\$3.30	6.11	\$171.10	\$45.20	\$277.20	25%
ASHP	\$74.70	\$14.80	\$3.00	3.02	\$202.50	\$41.10	\$318.30	35%
WSHP	\$133.40	\$12.40	\$2.30	immed.	\$169.70	\$31.50	\$334.60	38%
VAV	\$161.60	\$9.00	\$3.50	immed.	\$123.20	\$47.90	\$332.70	37%
Four-Pipe	\$170.70	\$8.60	\$4.00	immed.	\$117.70	\$54.70	\$343.10	39%

Capital Cost (\$/m²) - koszt inwestycyjny

Operating Cost (\$/m²/YR) - koszt eksploatacji (\$/m²/rok)

Maintenance Cost (\$/m²/YR) - koszt konserwacji (i napraw) (\$/m²/rok)

Simple Payback - prosta opłacalność (okres zwrotu nakładów inwestycyjnych - lata)

20-Year Present Value of Operating Costs - obecna wartość kosztów 20-letniej eksploatacji (\$/m²)

20-Year Present Value of Maint.Costs - obecna wartość kosztów 20-letniej konserwacji (\$/m²)

Total 20- Year Life- Cycle Cost, or LCC - całkowity koszt 20-letniego cyklu życia lub cyklu życia(\$/m²)

Discount Rate - stopa dyskontowa

Operating or Maintenance Cost Escalation - wzrost kosztów eksploatacji i konserwacji

n/a - nie dotyczy

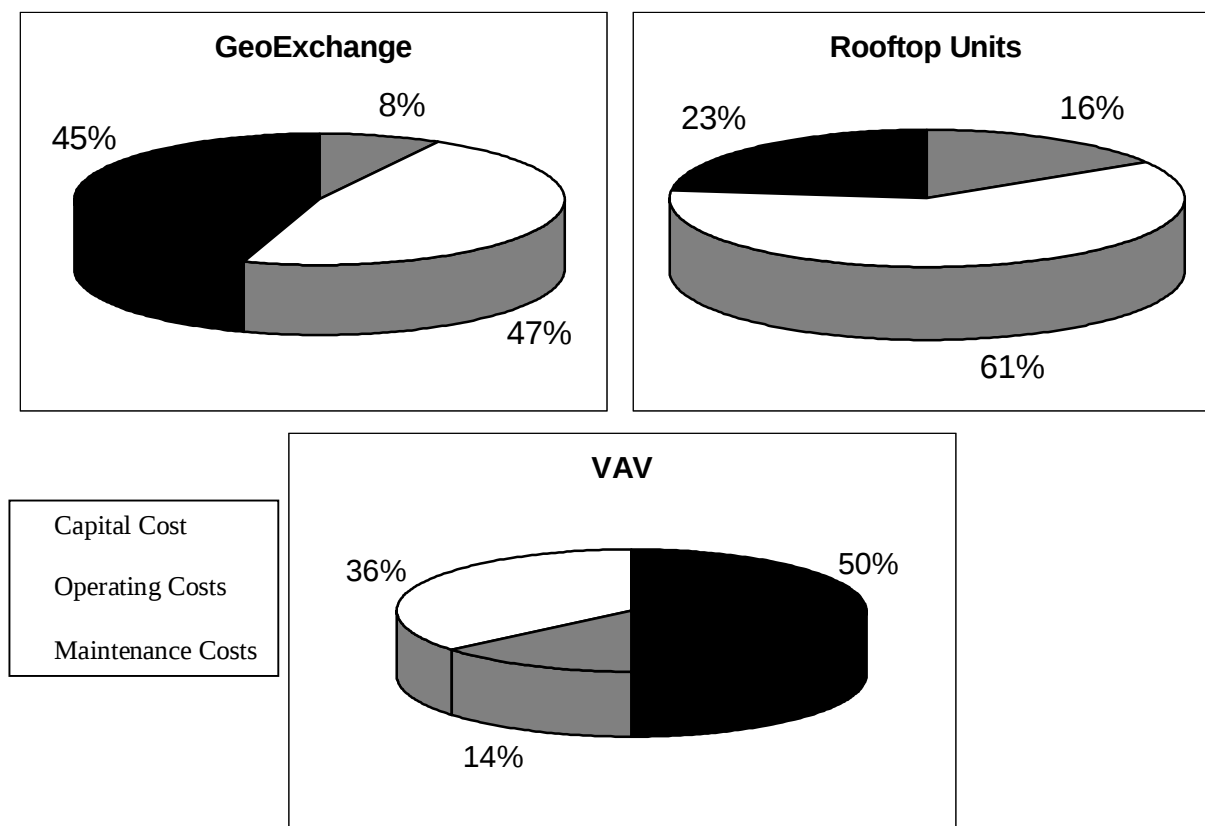
immed. - natychmiastowo

skarbowej plus 11%. Jednak obie wydawały się być wygórowane, 7,75 i 6,81% odpowiednio, podczas gdy stopa 30-letniego kredytu hipotecznego wynosiła 61%. Zdecydował się w końcu przyjąć jako graniczne wartości stóp bezpośrednich - dolną 4,5% i górną 6%, ponieważ uznał, że inwestorzy budynków komercyjnych będą mogli pożyczyć pieniądze przy oprocentowaniu niższym niż konwencjonalne stopy kredytów hipotecznych

Moore (1999) zdecydował nie zwiększać cen energii opartych o informacje z Energy Information Administration (EIA, 1998). Chociaż obecnie uświadomiliśmy sobie, że te projekcje były dalekie od prawidłowych, to uniknięto w zestawieniu kosztów eksploatacyjnych

3. Air-source heat pump,
4. Water-source (California type) heat pump,
5. Central variable air volume, and
6. Four-pipe

The results of the life-cycle cost analyses are shown in Table 10. Two different discount rates (4.5% and 6%) were chosen for the analyses. In selecting the discount rate, Moore (1999) originally considered two standard rules of thumb: (1) the prime rate plus 1 percent, and (2) the 30-year treasury bond rate plus 1 1/2 percent. However, both seemed to be excessive, 7.75 and 6.81 percent, respectively, while the 30-year mortgage rate



Rycina 6. Składowe kosztów całkowitych cyklu życia

Capital cost - koszt inwestycyjny, Operating costs - koszty eksploatacji, Maintenance Costs - koszty konserwacji, GeoExchange - tu: geotermalna pompa ciepła, Rooftop Units - dachowe systemy, VAV - system ze zmiennym przepływem powietrza

Figure 6. Total Life-Cycle Cost Components

trudnego problemu oddzielenia energii elektrycznej od gazu ziemnego.

Z danych zestawionych przez Moore'a (1999) wynika, że pierwsze koszty dla systemów GPC są przeciętnie niższe niż dla pomp ciepła ze źródłem wodnym (typ California), centralnego systemu ze zmiennym przepływem powietrza i 4-rurowego klimakonwektora, co czyni geotermalne pompy ciepła tańszymi do instalacji, posiadania i eksploatacji.

Jednak, istnieje szereg czynników do rozważenia. Po pierwsze, w rejonach bez dobrego zaplecza wykonawców GPC (wiertaczy i instalatorów) koszt GPC może poważnie przekroczyć przeciętną \$100/m², ustaloną w badaniach Moore'a (1999). Po drugie, rodzaj gruntu i skał może mieć znaczący wpływ na koszty wiercenia. Po trzecie, chociaż systemy o otwartym obwodzie, opartym o dwa lub więcej odwiertów, są często mniej kosztowne do konstrukcji niż systemy o zamkniętym obwodzie, w wielu z nich pojawiają w konserwacji istotne problemy związane z odwiertami i pompami, o ile te ostatnie nie są prawidłowo konserwowane.

Pomimo tych uwag, dobrze przemyślane, duże projekty przyciągają regionalnych, a nawet krajowych wykonawców o biegłości i doświadczeniu koniecznym do udostępnienia ekonomicznie efektywnych, dobrze zaprojektowanych systemów. I trzeba zauważyć, że jeśli nawet koszt inwestycyjny GPC wyniósłby nawet \$120 do \$150/m², to systemy GPC prawie niezmiennie wygrywają pod względem kosztów cyklu życia, dzięki

was at 6 1/2 percent. Since he believed that developers of commercial buildings could borrow money at rates below conventional mortgage rates, he finally decided on the low and high cases represented by the 4.5 and 6 percent direct rates.

Moore (1999) made the decision to not escalate energy prices based on information from the Energy Information Administration (EIA, 1998). Although we now realize that these projections were far from correct, it did avoid a difficult problem of separating electricity and natural gas for the operating costs completed.

From the data compiled by Moore (1999), GHP systems averaged lower in first costs than water-source (California type) heat pumps, central variable air-volume and four-pipe systems, thus making GHP cheaper to install, own, and to operate.

However, there are a number of factors to consider. First, in areas without a well-established infrastructure of CHP drillers and installers, GHP can substantially exceed the \$100/m² average found in Moore's (1999) research. Second, soil and rock type can have a significant impact on drilling cost. Third, although open loop systems based on two or multiple wells are often less costly than closed loop systems to construct, many have significant maintenance problems associated with wells and pumps if not maintained properly.

Despite the cautions, well-conceived, large projects will attract regional and even national

zyskom pochodzącym z oszczędności w eksploatacji i konserwacji.

Jak należy się spodziewać, zwiększanie stopy dyskontowej redukuje obecną wartość przyszłych zysków w eksploatacji i konserwacji GPC, podczas gdy narastanie eskalacji kosztów eksploatacji i konserwacji zwiększa obecną wartość tych przyszłych oszczędności.

Rycina 6 ilustruje składowe koszty cyklu życia typowej geotermalnej pompy ciepła, oraz systemów, dachowego i o zmiennym przepływie powietrza. Trzy diagramy kołowe (wg Moore'a, 1999) jasno pokazują charakterystyczne różnice między trzema systemami. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, z grubszą równo sobie, obejmują razem 90% całkowitych kosztów cyklu życia systemu GPC, podczas gdy koszty konserwacji tylko 8%. Zespoły dachowe, z drugiej strony, są względnie niedrogie w instalacji, ale około 60% kosztów ich cyklu życia stanowią koszty eksploatacji. Systemy o zmiennym przepływie powietrza są atrakcyjne z punktu widzenia kosztów eksploatacji, ale nie mogą konkurować pod względem pierwszych nakładów czy kosztów konserwacji.

Urządzenia ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji degradują się z czasem w wyniku spadku ich sprawności, wzrostu kosztów konserwacji, coraz częstszych i bardziej kosztownych napraw. ASHRAE (1995) oszacowało, że koszt konserwacji wzrasta o około 1% rocznie z powodu starzenia się urządzeń. Moore (1999), w oparciu o dane z opracowania Dohrmann and Alereza (1986), jednak doszedł do 3% rocznie przeprowadzając liniową regresję kosztów konserwacji w zależności od daty budowy. Moore (1999) zdecydował się zaokrąglić tę liczbę w dół do 2% i uznał, że rzeczywisty wpływ wzrastania kosztów eksploatacji i konserwacji czy kosztów cyklu życia zawiera się gdzieś między 0 a 2% (tab. 10). Autor stwierdził (Bloomquist, 1999), że koszty eksploatacji i konserwacji nie korelują się wprost z wiekiem urządzeń, ale bardziej zależą od tego czy przeprowadzano rutynową konserwację czy też nie, czy konserwacja była przeprowadzana we własnym zakresie, czy też zlecana na zewnątrz, itp. W rzeczywistości, najwyższe koszty konserwacji były dla nowych systemów, gdzie konserwację wykonano poprzez zlecenie konserwacji, co okazało się być wygórowaną stawką.

Z tabeli 10 jasno wynika, że geotermalne pompy ciepła oferują najniższy koszt cyklu życia ze wszystkich ocenianych typów systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji. Przyjmując stopę dyskontową w wysokości 4,5%, koszt cyklu życia systemu GPC jest przeciętnie mniejszy od kosztów cyklu życia systemów: podstawowego dachowego i 4-rurowego klimakonwektora wentylatorowego o 22 do 38 %, odpowiednio. Właściwie, nadwyżka kosztów inwestycyjnych systemów GPC w stosunku do pomp ciepła ze źródłem powietrznym i zespołów dachowych zwraca się przez oszczędności w kosztach eksploatacji i konserwacji po trzech latach w pierwszym przypadku, i po niewiele ponad sześć lat w drugim.

contractors with the expertise and experience necessary to develop a cost-effective, well-designed system. And it must be noted that even if capital cost should be as high as \$120 to \$150/m², that GHP systems almost invariably win out on a life-cycle cost basis due to the cost benefits derived from operating and maintenance savings.

As would be expected, increasing the discount rate reduces the preset value of future GHP operation and maintenance cost benefits while increasing the escalation in operating and maintenance cost increases the present value of those future savings.

Figure 6 illustrates the life-cycle cost components of a typical GHP, rooftop, and variable air-volume systems. The three pie charts (taken from Moore, 1999) clearly show the characteristic differences of the three systems. Capital and operating costs share in roughly equal parts 90 percent of the total life-cycle cost of a GHP system, while maintenance represents only 8 percent of the total. Rooftop units, on the other hand, are relatively inexpensive to install, but 60 percent of the life-cycle cost is operating cost. The VAV system is attractive from an operating standpoint, but cannot compete on first cost or on maintenance costs.

HVAC equipment degrades over time resulting in a loss of efficiency, an increase in maintenance cost and more frequent and costly repairs. ASHRAE (1995) estimates that maintenance cost increases by about 1/2 percent per year due to equipment age. Moore (1999), however, in conducting a linear regressive on the maintenance cost versus date of construction based on the information from Dohrmann and Alereza (1986), came up with about 3 percent per year. Moore (1999) decided to round this number down to 2 percent and believes that the actual impact of escalating operating and maintenance costs or life-cycle cost lies somewhere between 0 percent and 2 percent (Table 10). The author (Bloomquist, 1999) found that operating and maintenance costs are not directly correlatable with age of equipment, but much more dependent upon whether or not routine maintenance was carried out, whether the maintenance is done in-house or contracted out, etc. In fact, the highest maintenance costs were for new systems where the maintenance was being done via a maintenance contract at what appeared to be exorbitant rates.

From Table 10, it is clear that GHP systems offer the lowest life-cycle cost of all HVAC system types evaluated. Based on the discount rate of 4.5 percent, the life-cycle cost of GHP systems average from 22 to 38 percent lower for basic rooftop and four-pipe fan coil systems, respectively. In fact, the capital cost premium of GHP systems versus air-source heat pumps and rooftop units is recovered with the savings in operating and maintenance costs, from three to a little over six years, respectively.

WNIOSKI

W oparciu o względnie mało badań, przeprowadzonych do dziś dla systemów geotermalnych pomp ciepła, okazało się że oferują one znaczące oszczędności zarówno w kosztach eksploatacji, jak i konserwacji w porównaniu do tradycyjnych systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji. Podczas, gdy systemy GPC wciąż wymagają znacząco wyższych pierwszych nakładów niż pewne inne typy systemów takie, jak dachowe zespoły, to mają one w rzeczywistości niższe koszty instalacji niż niektóre z bardziej skomplikowanych systemów jak np. o zmiennym przepływie powietrza, pompy ciepła ze źródłem wodnym (typ California), czy 4-rurowy klimakonwektor.

Przemysł geotermalnych pomp ciepła jest ciągle nękany brakiem szczegółowych informacji odnośnie kosztów instalacji różnych typów systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji oraz kosztów długotrwałej eksploatacji i konserwacji zarówno dla pomp ciepła, jak i innych systemów. Bez tych danych, trudno jest podać przekonywujące argumenty na rzecz geotermalnych pomp ciepła inwestorom, nie zaznajomionym z technologią czy długoterminową implikacją kosztów systemów geotermalnych pomp ciepła.

Sytuacja jest na tyle poważna, że organizacje takie, jak Geothermal Heat Pump Consortium, International Ground Source Heat Pump Association, BOMA (Building Owner and Manager Association), ASHRAE, jak również stanowe i federalne agencje energii nie ustają w opracowywaniu szerokiej bazy danych dotyczących stosownych kosztów systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji tak, aby te systemy można ocenić na podstawie realistycznego cyklu życia. Bez tej informacji decyzje dotyczące systemów OWK będą w dalszym ciągu opierać się na doświadczeniu z przeszłości, lub bardziej powszechnie, na najniższych pierwszych nakładach.

LITERATURA

- Allen, Marita and Kavanaugh, Steve, 1999. Thermal Conductivity of Cementitious Grouts and Impacts on Heat Exchange Length Design for Ground Source Heat Pumps, HVAC & R Research, Vol. 5, No. 2, 12 pp.
- Annual Energy Outlook 1998, DOE/EIA-0383(98), U.S. Department of Energy, Energy Information Administration. U.S. Department of Energy, 14 pp.
- Cane, D., Morrison, A., Clemmes, B. Ireland, C.. Survey and Analysis of Maintenance and Service Costs in Commercial Building Geothermal Systems, Caneta Research Inc., for the Geothermal Heat Pump Consortium, RP-024, Revised 1997.
- Commercial, Institutional, and Scholastic GeoExchange Case Studies posted on the website of the Geothermal Heat Pump Consortium, www.ghpc.org.
- Dohrmann, D.R. and Alereza, T., 1985-86. Analysis of Survey Data on HBVAC Maintenance Costs, ADM Associates, Inc. for ASHRAE Transactions 92(2A).
- Dooley, Robert, 1999. GeoSchool Cost Estimating Software, developed by R.J. Dooley & Associates for the Geothermal Heat Pump Consortium.
- Dooley, Robert, 1998. Personal communication, R. J. Dooley & Associates.

CONCLUSION

Based on the relatively little research that has been conducted to date on GHP systems, it appears that GHP systems can offer a significant savings in both operating and maintenance costs over conventional HVAC systems. While GHP systems continue to have a substantially higher first cost than some alternatives, such as rooftop units, they actually have lower installed costs than some of the more complex systems such as variable air-volume, water-source (California type) heat pumps, and four-pipe systems.

The GHP industry is still plagued with a lack of detailed information on the installed cost of various HVAC alternatives and long-term operation and maintenance cost for GHP as well as alternatives. Without this information, it is difficult to make a convincing argument in favor of GHP to a developer unfamiliar with the technology or the long-term cost implication of GHP systems.

It is critical that organizations such as the Geothermal Heat Pump Consortium, the International Ground Source Heat Pump Association, BOMA (Building Owner and Manager Association), ASHRAE, as well as state and federal energy agencies pursue the development of a comprehensive data base of all relevant HVAC costs so that systems can be evaluated on a realistic life-cycle basis. Without this information, decisions relative to HVAC systems will continue to be based on past experience or, more commonly, on cheapest first cost.

REFERENCES

- Energy Information Administration (EIA), 1998. United States Department of Energy.
- Hughes, P.J. and Shonder, J.A., 1998. Draft Quarterly Report, Analysis of GeoExchange Schools in Lincoln, Nebraska, Oak Ridge National Laboratory.
- Moore, Alex, 1999. Capital, Operating, and Maintenance Costs of GeoExchange and Conventional HVAC Systems, Princeton Economic Research, Inc., for Lockheed Martin Idaho Technologies Co.
- 1995 ASHRAE Application Handbook, Chapter 33: Owning and Operating Costs, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- 1995 Mechanical Cost Data, RS Means Company, Inc., Kingston, MA, 1998.
- Operating Experiences with Commercial Ground-Source Heat Pumps, ASHRAE Project 863, Caneta Research Inc., 1995.
- Schoen, Philip, 1998. Geo-Enterprises, Inc., Tulsa, OK, personal communication.
- Skouby, Allen, 1998. Proper Engineering and Thermally Enhanced Grouts: GeoExchange Savings, The Source, IGSHA Newsletter, Vol. 11, No. 6, pp4-5.