

JAK WYKONAĆ RZETELNĄ KALKULACJĘ KOSZTÓW ENERGII DO CHŁODZENIA I OGRZEWANIA BUDYNKU NA ETAPIE PROJEKTU CZ. II

# Nie wierz żeberku na metr

W poprzednim wydaniu „Biuletynu” zaczęliśmy analizować koszty energii wykorzystywanej do chłodzenia i ogrzewania budynków w kontekście różnych technologii. Przypomnę, iż temat przerwaliśmy na określonym bilansie i wybranych do porównania rozwiązaniach technicznych. Czas na wyłonienie faworytów.

Jakość analizy zależy tak naprawdę od rzetelności czegoś, czego wykonać dokładnie na etapie koncepcji a nawet projektu budowlanego po prostu nie można – od kosztów inwestycji. Koszty poszczególnych wariantów były szacowane różnorako: wszystkie „grube” urządzenia zostały dobrane na podstawie obliczeń, dokładnych lub szacunkowych – jak to było możliwe na tym etapie szczegółowości. Korzystałem również z doborów dostawców urządzeń. Do kalkulacji przyjmowałem ceny z katalogów lub ofert producentów bez upustów. Koszt robót był przyjęty wskaźnikowo na podstawie wykonanych w naszym biurze kosztorysów podobnych prac instalacyjnych w innych obiektach.

Najtańszym źródłem ciepła jest kotłownia i jej cena stanowi 14% ceny najdroższego źródła jakim jest pompa ciepła z dolnym źródłem w postaci sond. Dolne źródło pompy ciepła w postaci studni jest ok. 12-krotnie tańsze od źródła w postaci sond pionowych. Koszty obu źródeł zależą mocno od warunków geologicznych, które należy rozpoznać przed zaprojektowaniem źródła. Koszt dolnego źródła w postaci sond jest zbliżony do kosztu samej pompy, w związku z czym komplet dolnego źródła i pompy ciepła w przypadku studni stanowi tylko 60% kompletu pompy ciepła z sondami. Przyjęcie wyższej temperatury wody lodowej czyli 14/18°C w stosunku do klasycznej 7/14°C nie powoduje wykraplania wilgoci w klimakonwektorach i umożliwia zastosowanie źródła chłodu o mniejszej mocy i cenie, ale wymaga zastosowania większych klimakonwektorów. Instalacja jest droższa o 30%, ale łączny koszt agregatu i klimakonwektorów w obu wypadkach jest ten sam! Rozpatrując łączne ceny źródeł ciepła, chłodu i instalacje z nimi związane można stwierdzić, że najdroższy wariant VRV, wyprzedził nawet pompę ciepła z sondami gruntowymi,

a najtańszy, klasyczny w postaci kotłowni i agregatu wody lodowej, stanowi 40% ceny najdroższego. Ceny instalacji pompy ciepła opartej na studniach i kotła uzupełnionego instalacją VRV są sobie równe i plasują się dokładnie pośrodku pomiędzy najdroższym i najtańszym wariantem.

Wiemy już jak wygląda ranking pod względem kosztów inwestycyjnych, jest kilka niespodzianek, a kilka przewidywań potwierdziło się. Jednak podstawą wyboru jest łączny koszt inwestycji i eksploatacji.

Kolejne zadanie to kolejne wyzwanie. Jak poprawnie policzyć sezonową konsumpcję energii do napędu pompy ciepła, jeśli jej sprawność zależy od temperatur dolnego i górnego źródła ciepła, a obie te temperatury zmieniają się w sposób naturalny. Dolewając oliwy do ognia dodam, że sprawności pomp ciepła podawane w katalogach określone są w jednej konkretnej temperaturze dolnego źródła, np. w przypadku pomp powietrze/freon w funkcji chłodzenia przy 35°C, a w funkcji grzania przy (nikt nie zgadnie) +7°C. Producenci nie ukrywają, że w innych temperaturach sprawności

są inne (mniejsze). Niestety zmienność sprawności jest parametrem nie do pominięcia przy obliczaniu sezonowego kosztu eksploatacji i niestety jej uwzględnienie wykracza poza standardowy zakres obliczeń inżynierskich. Ale powróćmy do łobbingu natury w moich obliczeniach. Dane meteo służące do obliczenia sezonowego zapotrzebowania ciepła ograniczają się do zestawienia ilości stopniodni sezonu grzewczego w danych regionach kraju. W przypadku klasycznych generatorów ciepła (kocioł) sprawność wytwarzania ciepła jest zależna od mocy urządzenia więc pośrednio temperatury zewnętrznej, ale jej zmienność to kilka, może kilkanaście procent, więc jest pomijalnie mała w zestawieniu ze zmiennością sprawności pompy ciepła. Ponadto przebieg sprawności pompy ciepła nie jest liniowy.

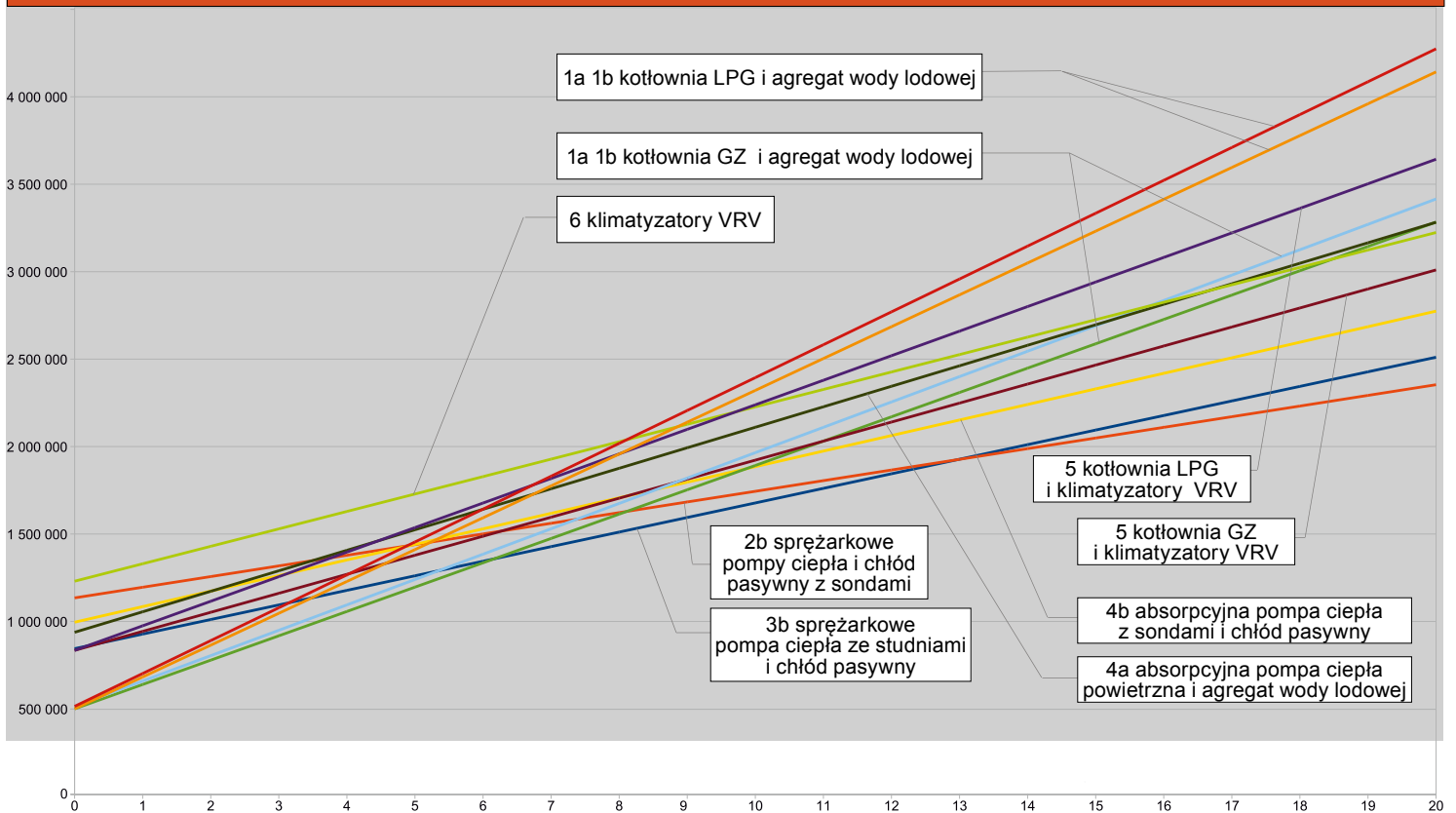
Konsekwencją tego jest fakt, że sezonowe zużycie energii przez kocioł może być liczone na podstawie średniej temperatury zewnętrznej sezonu i jego czasu trwania, a w przypadku pompy ciepła musi być liczone jako suma obliczeń dla okresów cząstkowych (dobowych, miesięcznych) na podstawie ich temperatury zewnętrznej i odpowiadającej jej sprawności pompy. Inaczej mówiąc w przypadku pompy ciepła jest istotne czy pracuje ona przez miesiąc przy temperaturze zewnętrznej 0°C czy też przez dwa tygodnie panuje -10 i kolejne dwa +10°C. W obu wypadkach kocioł zużyje tę samą ilość ciepła, natomiast pompa ciepła w pierwszym wypadku zużyje mniej, a w drugim więcej energii. Czy są to duże różnice? Na podstawie wykonanych obliczeń mogę stwierdzić, że są na tyle znaczące, że mogą zmienić kolejność finalistów.

Drobnym wyzwaniem, bo tylko finansowym, jest uzyskanie średnich temperatur

## ZESTAWIENIE WARIANTÓW WEDŁUG KOSZTÓW INWESTYCJI

Lp	Urządzenia		Koszt inwestycji [zł]
	Ogrzewanie	Chłodzenie	
1b	Kocioł gazowy	agregat wody lodowej 14/18	500 408,00
1a	Kocioł gazowy	agregat wody lodowej 7/14	514 427,00
5	Kocioł gazowy + VRV	sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	834 718,00
3b	Sprężarkowa PC woda/woda (ze studniami)		844 572,00
4a	Absorpcyjna PC powietrze woda + kocioł gazowy	agregat wody lodowej 14/18	938 056,00
4b	Absorpcyjna PC solanka/woda (sondy pionowe)		995 838,00
2b	Sprężarkowa PC solanka/woda (sondy pionowe)		1 134 720,00
6	Sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)		1 230 222,00

## ŁĄCZNY KOSZT INWESTYCJI I EKSPLOATACJI [W ZŁ] PO KOLEJNYCH LATACH



zewnątrznych. W terenowych stacjach IMiGW można kupić zestawienia średnich temperatur ze wskazanego terenu liczone w interwałach rocznych, miesięcznych, tygodniowych czy dobowych. Więcej danych = wyższa cena i więcej obliczeń, ale dokładniejszy wynik.

Większym wyzwaniem jest określenie COP czy EER dla dowolnej spodziewanej kombinacji temperatur dolnego i górnego źródła ciepła. Nie można tu przyjąć „umownej pompy ciepła”. Nawet u jednego producenta występują różne typy szeregi maszyn do różnych zastosowań o różnych charakterystykach. Producenci nie podają charakterystyki sprawności, a jedynie jej

wartość w jednym (znormalizowanym) punkcie. W przypadku renomowanych producentów można na zapytanie otrzymać kilka dodatkowych punktów z krzywej sprawności, ale nie w dowolnym odpowiadającym pomiarom ze stacji meteo. Na szczęście istnieje przepastny internet, w którym można wygrzebać algorytm do aproksymacji punktów pomiarowych przy pomocy wielomianu. Przykładowy określony tą metodą wzór zależności COP od temperatury zasilania instalacji, przyjętej do analizy konkretnej pompy ciepła solanka/woda, przy stałej temperaturze solanki równej 5°C wygląda następująco:

$$\text{COP} = 0,005 \times T^2 - 0,15 \times T + 9,8275$$

Oczywiście dla pomp woda/woda zależność wygląda inaczej, a w przypadku pomp ciepła powietrznych zmianie ulega również temperatura dolnego źródła. Na szczęście temperatura zasilania jest z zewnętrzną powiązana krzywą pogodową i COP można wyrazić przy pomocy tylko jednej z temperatur.

Mając moc obliczeniową i średnie zewnętrzne temperatury, np. dobowe, można określić dla dowolnego dnia średnią wydatkowaną moc cieplną, a uwzględniając współczynnik efektywności pobór energii do napędu pompy ciepła. Powtarzając te obliczenia dla wszystkich dni sezonu w sumie otrzymamy sezonowe zapotrzebowanie energii do napędu pomp ciepła – proste, tylko pracochłonne. Ciekaw jestem, jak to sobie wyobrażał ustawodawca określając zawartość projektu budowlanego?

Tu nie mogę się powstrzymać od dygresji. Od jednego z dystrybutorów powietrznych pomp ciepła z Pomorza wraz z ofertą otrzymałem kalkulację kosztu eksploatacji. Wydała mi się zbyt optymistyczna. Nie dość, że zastosowano w całym czasie pracy jedną wartość sprawności, to czasy pracy z poszczególnymi mocami pochodziły ze znacznie łagodniejszych stref (a może i krajów) niż podlaski biegun zima. Na zgłoszone uwagi rozmówczyni odpowiedziała: „Ale my tak zawsze robimy, dla całej Polski”.

## ZESTAWIENIE WARIANTÓW WEDŁUG JEDNOSTKOWYCH KOSZTÓW PRODUKCJI CIEPŁA

Lp.	Urządzenia	Koszt ciepła [zł/GJ]
2	Sprężarkowa PC solanka/woda (sondy pionowe)	18,90
3	Sprężarkowa PC woda/woda (ze studniami)	25,20
6	Sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	26,57
4b GZ	Absorpcyjna PC solanka/woda (sondy pionowe)	27,68
5 GZ	Kocioł gazowy + VRV	29,41
4a GZ	Absorpcyjna PC powietrze woda + kocioł gazowy	31,20
5 LPG	Kocioł gazowy + VRV	39,30
1 GZ	Kocioł gazowy	39,90
1 LPG	Kocioł gazowy	53,30

Na tym etapie analiza taryf w celu określenia cen jednostkowych gazu LPG, CNG, czy energii elektrycznej, by z poboru energii przejść ostatecznie na koszt ogrzewania (chłodzenia) jest już tylko drobnym ćwiczeniem rachunkowym. Wyniki analizy przedstawiam w tabelach. Jeszcze drobna uwaga, analiza nie uwzględnia kosztów serwisu, wymiany elementów eksploatacyjnych, żywotności urządzeń i tym podobnych istotnych elementów.

Kocioł jest najdroższym producentem ciepła, energia cieplna wytwarzana w kotle jest ok. 5-ciokrotnie droższa od energii uzyskanej z gruntowych pomp ciepła.

Energia potrzebna do przepompowywania wody pomiędzy studniami jest znacznie większa od energii koniecznej do wymuszania obiegu w instalacji sond pionowych, sezonowy koszt pompowania w obu wypadkach równy jest odpowiednio 28 tys. zł i 4 tys. zł i stanowi odpowiednio 54% i 7% udział w cenie pozyskania energii cieplnej; koszt ten różnicuje ceny energii z obu źródeł, różnica sprawności obu pomp ciepła nie niweluje różnicy wynikającej z kosztu pompowania; koszt pompowania w pierwszym przypadku zależy wprost od głębokości studni przed podjęciem decyzji o rodzaju dolnego źródła należy dokonać rozpoznania geologicznego, głębokie złoża wody dyskwalifikują studnie jako dolne źródło.

Jednostkowy koszt energii cieplnej uzyskanej z instalacji VRV jest porównywalny z kosztem wytwarzania energii przez gruntową pompę ciepła ze studnią, wyliczony w wariantcie 5 koszt jednostkowy jest powiększony z powodu współpracy instalacji VRV z (nieekonomiczną) kociołnią; należałoby przeanalizować wyeliminowanie kociołni i instalacji grzewnikowej i ogrzewanie całości budynku tylko instalacją VRV, prawdopodobnie koszty inwestycji i ogrzewania byłyby porównywalne do wariantu 3b.

Rzeczywisty koszt ogrzewania instalacją VRV będzie większy od obliczonego, gdyż w obliczeniach postępowano się danymi meteo w postaci temperatur średniomiesięcznych, najniższą przyjętą temperaturą jest  $-4^{\circ}\text{C}$ , a sprawność pomp powietrznych maleje wraz z temperaturą zewnętrzną, w celu zbliżenia się do rzeczywistej sprawności pomp należałoby wykonać obliczenia w przedziałach tygodniowych, które wykażą występowanie niższych temperatur; obliczenia kosztu ogrzewania pomp gruntowych pozbawione są tego błędu, gdyż temperatura dolnego źródła w tym wypadku jest stabilna przez cały okres sezonu grzewczego.

W przypadku wody lodowej produkcja chłodu o wyższych temperaturach jest bardziej opłacalna, 26,6 zł/GJ w relacji do 39,60 zł/GJ przy klasycznym poziomie temperatur.

W układach sprężarkowych mamy do czynienia z około dwukrotną różnicą cen, najtańsza jest energia chłodnicza produkowana przez instalacje bezpośredniego odparowania (VRV).

Bezkonkurencyjnie niska jest cena chłodu pasywnego – praktycznie jest równa cenie pompowania czynnika dolnego źródła, chłód pasywny jest 26-krotnie tańszy od najtańszego chłodu wytwarzanego w maszynie chłodniczej!

W każdym wariantcie jednostkowy koszt wytworzenia energii cieplnej jest znacznie większy od wytworzenia energii chłodniczej, koszty te są zbliżone jedynie w przypadku instalacji VRV pracującej samodzielnie (bez współpracy z kotłem) – grzanie 26,6 zł/GJ i chłodzenie 23,4 zł/GJ.

Droższa energia cieplna i znacznie dłuższy czas pracy w funkcji grzania powodują niewielki wpływ efektywności wytwarzania chłodu na roczny koszt eksploatacji!

Dopiero połączenie kosztu inwestycji i eksploatacji pozwala wybrać optymal-

ny wariant. Ale pamiętajmy, że optymalny finansowo! Każdy z przedstawionych systemów ma swoją specyfikę, w różnym stopniu realizują one wymagania klimatu pomieszczeń, charakteryzują się różną wygodą lub uciążliwością obsługi, różną mają żywotność, wrażliwość na złą obsługę, dostępność serwisu, ceny części zamiennych.

w długoterminowym okresie najtańszym rozwiązaniem jest gruntowa pompa ciepła ze studniami, jednak należy pamiętać o geologicznej analizie poprzedzającej decyzję stosowania studni jako dolnego źródła ciepła

najdroższa inwestycyjnie pompa ciepła z sondami eksploatacyjnie zbliża się do pompy ze studniami, zrównując się w 20-stym roku eksploatacji

pozostałe warianty stają się droższe od gruntowych pomp ciepła już między drugim, a trzecim rokiem eksploatacji

rozwiązania różniące się tylko poziomem temperatur wody lodowej: 7/14 i 14/18 są prawie identyczne w zakresie inwestycji i eksploatacji

wariant z instalacją VRV wspomaganą kotłem mniejszej mocy staje się tańszy od klasycznego zestawu kocioł i agregat wody lodowej po piątym roku eksploatacji jednak generalnie kosztowo jest do niego zbliżony

różnica pomiędzy gruntowymi pompami ciepła, a pozostałymi wariantami jest bardzo wyraźna na korzyść pomp gruntowych

na podstawie przeprowadzonej analizy można domniemywać, że podobnie do gruntowych pomp ciepła przedstawiałyby się koszty inwestycji i eksploatacji samodzielnego systemu VRF (nie współpracującego z kotłem), analizę należałoby rozszerzyć o to porównanie.

oparcie kalkulacji o średniomiesięczne temperatury zewnętrzne nie umożliwia dokonania poprawnej kalkulacji kosztów eksploatacji bivalentnych źródeł ciepła, układy bivalentne obniżają koszty inwestycji i jednocześnie zwiększają koszty eksploatacji, jednak do przeanalizowania tych relacji konieczne są dane meteo pokazujące udział niskich temperatur zewnętrznych.

## Wnioski

Jako, że z każdej lekcji należy wyciągać wnioski, ale wnioski techniczne mierzalne są już podane, pozwolę sobie na zakończenie artykułu refleksjami.

## ZESTAWIENIE WARIANTÓW WEDŁUG JEDNOSTKOWYCH KOSZTÓW PRODUKCJI CHŁODU

Lp.	Urządzenia	Koszt chłodu [zł/GJ]
2b	Sprężarkowa PC solanka/woda (sondy pionowe) – chłód pasywny	0,87
4b GZ	Absorpcyjna PC solanka/woda (sondy pionowe) – chłód pasywny	0,87
3b	Sprężarkowa PC woda/woda (ze studniami) – chłód pasywny	5,15
5,6	Sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	23,44
1b	Agregat wody lodowej 14/18	26,60
1a	Agregat wody lodowej 7/14	39,60

Powyższa praca zajęła mi prawie trzy miesiące. Miejscami jest trudna merytorycznie, miejscami pracochłonna, czasami wymaga oczekiwania na oferty dostawców czy wyniki negocjacji (np. taryf energetycznych). Urzędnik lekką ręką sformułował wymóg wykonania tego typu analizy jako części projektu budowlanego.

**Jaką drogą pójdzie projektant, by spełnić wymagania rozporządzenia jeśli z tytułu zwiększonego (znacznie) zakresu pracy nie dostaje dodatkowego wynagrodzenia? Jeśli „na skróty” i wykonana praca nie ma wartości merytorycznej, to czy nie lepiej by papier na jej wydrukowanie szumiał nam w postaci drzew?**

A może nie chodzi o faktyczny wybór optymalnego systemu, a o spełnienie warunku formalnie, by dać wrażenie wypełnienia dyrektywy zrównoważonego rozwoju?

Proszę nie przenosić wyników tej analizy na inne obiekty. Ciągłe zmieniają się urządzenia, ich zakres stosowania i parametry, inny kształt bryły budynku czy struktura pomieszczeń też zmieniają relacje. W tym wypadku zastosowano ceny energii i paliw wynegocjowane przez inwestora, w innym czasie i lokalizacji będą oczywiście inne. To wszystko powoduje, że systemy sąsiadujące ze sobą w rankingu mogą się zamienić miejscami. Oczywiście system najtańszy nie stanie się najdroższym i na odwrót. Pominąłem zagadnienie opustów przy zakupie urządzeń i kontraktowaniu robót – ten czynnik może wprowadzić w tabelach duże zamieszanie. Czy zatem jest sens wykonywania takich analiz? Jednak niektóre spostrzeżenia wydają się uniwersalne, na przykład to, że cena wytwarzania chłodu nie waży znacząco w koszcie rocznym.

I jeszcze proszę spojrzeć na ostatni wykres i odpowiedzieć na jedno pytanie: Który wariant wybierze generalny wykonawca realizujący prace w formule „projektuj i buduj” jeśli wcześniej został wyłoniony według kryterium najniższej ceny?

JACEK SZUMSKI, PRACOWNIA PROJEKTOWA  
INSTALACJI SANITARNYCH BIAŁYSTOK

WWW.INSTALACJESANITARNEBIALYSTOK.PL

[1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12 kwietnia 2002 r w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie Dz. U. Nr 75 poz. 690 z późn. zm.

[2] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego z dn 25 kwietnia 2012 r (Dz.U. z 2012 r poz. 462)

[3] Norma PN-83/B-03430. Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej.

### ZESTAWIENIE WARIANTÓW WEDŁUG ROCZNYCH KOSZTÓW EKSPLOATACJI (OGRZEWANIE I CHŁODZENIE)

Lp.	Urządzenia	Koszt eksploatacji [zł]
2b	Sprężarkowa PC solanka/woda (sondy pionowe)	60.948,00
3b	Sprężarkowa PC woda/woda (ze studniami)	83.315,00
4b GZ	Absorpcyjna PC solanka/woda (sondy pionowe)	88.932,00
6	Sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	99.687,00
5 GZ	Kocioł gazowy + sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	108.768,00
4a GZ	Absorpcyjna PC powietrze woda + kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	117.230,00
1b GZ	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	139.160,00
5 LPG	Kocioł gazowy + sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	140.414,00
1a GZ	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 7/14	145.058,00
1b LPG	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	182.090,00
1a LPG	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 7/14	187.988,00

### ZESTAWIENIE WARIANTÓW WEDŁUG ŁĄCZNYCH KOSZTÓW PO 10 LATACH

Lp.	Urządzenia	Łączny koszt [zł]
3b	Sprężarkowa PC woda/woda (ze studniami)	1.677.722,00
2b	Sprężarkowa PC solanka/woda (sondy pionowe)	1.744.200,00
4b GZ	Absorpcyjna PC solanka/woda (sondy pionowe)	1.885.158,00
1b GZ	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	1.892.008,00
5 GZ	Kocioł gazowy + sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	1.922.398,00
1a GZ	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 7/14	1.965.007,00
4a GZ	Absorpcyjna PC powietrze woda + kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	2.110.356,00
6	Sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	2.227.092,00
5 LPG	Kocioł gazowy + sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	2.238.858,00
1b LPG	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	2.321.308,00
1a LPG	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 7/14	2.394.307,00

### ZESTAWIENIE WARIANTÓW WEDŁUG ŁĄCZNYCH KOSZTÓW PO 20 LATACH

Lp.	Urządzenia	Łączny koszt [zł]
2b	Sprężarkowa PC solanka/woda (sondy pionowe)	2.353.680,00
3b	Sprężarkowa PC woda/woda (ze studniami)	2.510.872,00
4b GZ	Absorpcyjna PC solanka/woda (sondy pionowe)	2.774.478,00
5 GZ	Kocioł gazowy + sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	3.010.078,00
6	Sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	3.223.962,00
4a GZ	Absorpcyjna PC powietrze woda + kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	3.282.656,00
1b GZ	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	3.283.608,00
1a GZ	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 7/14	3.415.587,00
5 LPG	Kocioł gazowy + sprężarkowa PC powietrze/freon (VRV)	3.642.998,00
1b LPG	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 14/18	4.142.208,00
1a LPG	Kocioł gazowy + agregat wody lodowej 7/14	4.274.187,00