

JERZY ŻELASKO¹TECHNICZNA I EKONOMICZNA ANALIZA
BIWALENTNYCH SYSTEMÓW GRZEWczyCH
Z POMPĄ CIEPŁA POWIETRZE-WODATECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF BIWALENT
HEATING SYSTEMS WITH AN AIR-WATER HEAT PUMP

Streszczenie

W pracy analizie poddano biwalentne układy z pompą ciepła typu powietrze-woda współpracujące z kotłami gazowymi konwencjonalnymi i kondensacyjnymi. Celem pracy jest wyznaczenie preferowanego ekonomicznie obszaru stosowania tego typu układów. Analiza wpływu stosunku mocy cieplnej zużywanej do podgrzewania ciepłej wody użytkowej do mocy grzewczej na koszty eksploatacyjne i całkowite użytkowania systemu oparta jest o wyznaczony, optymalny z punktu widzenia techniczno-ekonomicznego, punkt współpracy pompy ciepła z kotłem gazowym.

Słowa kluczowe: pompy ciepła, układy biwalentne

Abstract

The paper analyses bivalent systems with an air-water heat pump operating in conjunction with conventional and condensation gas boilers. Within the assumed low range of total power of the system, the considerations are of universal nature. The paper aims to specify the economically viable areas of use of such systems. An analysis of the influence of the ratio of the thermal power used to heat domestic hot water to the heating output on the exploitation and overall costs of use of the system is based on a determined interface between the pump and the gas boiler, considered as optimum in technical and economic terms.

Keywords: heat pumps, bivalent systems

¹ Dr inż. Jerzy Żelasko, Politechnika Krakowska.

1. Wprowadzenie

Powietrze jako dolne źródło ciepła jest dobrym sposobem obniżania kosztów inwestycyjnych pompy ciepła wchodzącej w skład układów biwalentnych. Różnica cen kolektora gruntowego i powietrznego lamelowanego wymiennika ciepła jest na tyle znacząca, że minimalizuje negatywne cechy tego źródła ciepła: dużą zmienność temperatur, złą koherentność, szronienie parownika itp. Istotą sukcesu ekonomicznego stosowania biwalentnego układu typu pompa ciepła powietrze-woda z kotłem gazowym jest taki dobór parametrów technicznych systemu i obiektu, aby część wad zmienić w zalety lub zniwelować ich negatywne działanie.

Rodzaj dolnego źródła ciepła sugeruje intensywną eksploatację tego typu urządzenia w okresie letnim i w okresach przejściowych, co oznacza produkcję znacznej ilości ciepłej wody użytkowej..

Celem niniejszej pracy jest optymalizacja techniczno-ekonomiczna biwalentnego systemu ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej opartego na pompie ciepła, wspomaganego szczytowym źródłem ciepła – kotłem gazowym.

Rozważono sens ekonomiczny ich stosowania w obiektach o zróżnicowanym zapotrzebowaniu na energię cieplną do zasilania systemów c.o. i cwu. Na podstawie szczegółowej analizy ekonomicznej przedstawiono porównanie kosztów użytkowania kilku wariantów systemów grzewczych w dość szerokim zakresie mocy grzewczych i parametrów pracy przy zadanej wartości całkowitego zapotrzebowania na energię cieplną i znanym udziale przypadającym na c.o. i cwu.

2. Wybór kryterium i metody optymalizacji

Najczęściej stosowanymi w zagadnieniach optymalizacji systemów grzewczych funkcjami celu są: koszty inwestycyjne, ilość dostarczonej energii (paliwa) w ciągu sezonu grzewczego, ilość wyemitowanych zanieczyszczeń, techniczne aspekty stosowanego rozwiązania, itp. Idealne rozwiązanie tak sformułowanej wielokryterialnej optymalizacji, minimalizujące każdą funkcję celu (f_i) niezależnie od pozostałych, nie istnieje. Funkcje są konfliktowe, poszukiwane więc powinno być kompromisowe rozwiązanie niezdominowane [1], [2].

Ze względu na techniczno-ekonomiczny charakter optymalizacji wariantów biwalentnego systemu grzewczego korzystnym wyborem jest zastosowanie metody funkcji użyteczności ($U(f_1, f_2, \dots, f_k)$). Przy zastosowaniu tej metody zagadnienie wyznaczenia rozwiązania preferowanego sformułowane jest w postaci:

$$\min U(f_1, f_2, \dots, f_k) \quad (1)$$

Do analizy kosztów systemu w całym okresie eksploatacji wykorzystano metodę LCC (Life Cycle Cost) najlepiej odwzorowującą aspekty ekonomiczne zagadnienia, sumującą wszystkie koszty przypisane do tego systemu od początku do końca jego istnienia i eksploatacji [3].

Głównym kryterium optymalizacyjnym jest minimalizacja średniorocznych kosztów systemu biwalentnego, rozumianych jako suma kosztów inwestycyjnych, obsługi kredytu

i szeroko pojętych kosztów eksploatacyjnych. Doprowadzenie mediów oraz instalacja grzewcza po stronie odbiorników ciepła nie wchodzi w skład tych kosztów. Kryterium dodatkowym może być kryterium ekologiczne, mające na celu minimalizację zużycia paliwa pierwotnego, służące do sprawdzenia słuszności w sensie ekologicznym znalezionej rozwiązania preferowanego. Kryterium ekologiczne nie może być pominięte, gdyż w procesie optymalizacyjnym pompy ciepła jedną ze zmiennych decyzyjnych są preferencje ze strony państwa na zakup tego urządzenia.

Stosując jako kryterium optymalizacyjne minimalizację zużycia paliwa pierwotnego w procesie ogrzewania budynku określono minimalny współczynnik wydajności cieplnej ϵ_{gr} pompy z zależności:

$$\epsilon_{gr} \geq \frac{W_g \cdot \eta_k \cdot \eta_{sc}}{W_e \cdot \eta_e \cdot \eta_{se}} \quad (2)$$

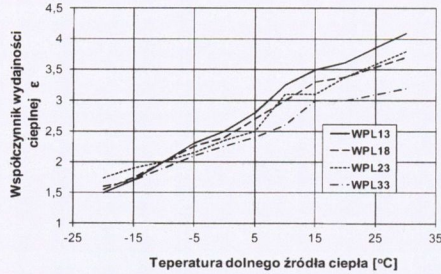
Minimalny współczynnik wydajności cieplnej pompy zależy od wartości opałowej paliwa W_e (W_g), którym opalana jest elektrownia, elektrociepłownia lub kocioł, ich sprawności η_e (η_k), sprawności układu przesyłu i transformacji energii η_{se} , sprawności układu przesyłu ciepła η_{sc} . Kryterium to jest aktywne w przypadku czerpania energii elektrycznej z sieci zasilanych paliwem kopalnym, tak jak w naszym kraju.

Do celów optymalizacji niezbędne jest postawienie ograniczeń na dopuszczalny obszar rozwiązań. Ograniczenia nałożone na zmienne decyzyjne dotyczą pracy i współpracy źródeł ciepła, z zastrzeżeniem ich pewnych cech charakterystycznych, np. temperatury wody zasilającej system grzewczy na poziomie $45 \pm 50^\circ\text{C}$. Ograniczenie to jest aktywne i analiza nie może wykraczać poza ten obszar. Ograniczeniem brzegowym jest suma mocy wynikająca z obciążenia cieplnego budynku i przygotowania c.w.u., minimalne obciążenie równe jest mocy układu przygotowania c.w.u.

3. Parametry pracy urządzeń, statystyczny sezon grzewczy, ceny nośników energii, obliczanie kosztów kapitałowych

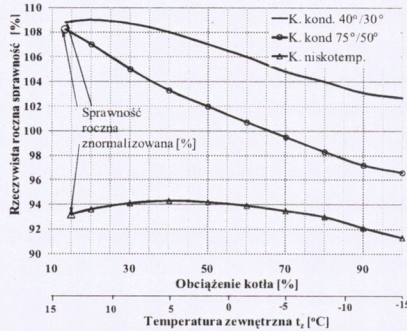
Rzeczywiste współczynniki efektywności cieplnej ϵ dla szerokiego zakresu warunków pogodowych i różnych temperatur zasilania zestawione zostały na rysunku 1. W przypadku gazowych kotłów niskotemperaturowych i kondensacyjnych sprawności tych urządzeń wyznaczono w zależności od ich procentowego obciążenia. Charakterystyka tych urządzeń przedstawiona została na rysunku 2.

Integralną część systemów biwalentnych stanowią zasobniki c.w.u i zbiorniki buforowe spełniające funkcję akumulatora energii i sprzęgła hydraulicznego. Dla uproszczenia w pracy przyjęto zerowe straty energii z tytułu ich stosowania, występują zaś w zestawieniu kosztów systemów biwalentnych. Szczegółowy rozkład temperatur powietrza zewnętrznego w przeciągu roku potrzebny jest do wyznaczenia ilości godzin pracy systemu w określonych warunkach. Nowoczesne powietrzne pompy ciepła mogą wytwarzać ciepło grzewcze przy temperaturze dochodzącej do -20°C . Wartość wilgotności powietrza wykorzystywana jest do obliczenia szybkości szronienia parownika pompy ciepła (rys. 3), w efekcie końcowym do wyznaczania czasu jego odszraniania.



Rys. 1. Współczynniki efektywności cieplnej pomp ciepła (f-my Stiebel Eltron) dla temperatury zasilania 50°C (WPLi pompa ciepła powietrze woda o wydajności „i” [kW]) [4]

Fig. 1. Coefficient of performance for the heat pump (Stiebel Eltron), (WPLi heat pump with thermal production capacity “i” [kW]) [4]



Rys. 2. Charakterystyka kondensacyjnych i niskotemperaturowych kotłów gazowych [5]

Fig. 2. Characteristic of gas fired condensing and low temperature boilers [5]

Cena energii elektrycznej przyjęta została wg taryfy G11 (rok 2012 opłata zł/kWh 0,4571 + inne) zaś gazu ziemnego wg W-3.6 (rok 2012 cena 1,7153 zł/m³ + inne).

Rzeczywiste koszty pracy poszczególnych urządzeń grzewczych określone zostały na podstawie sprawności (efektywności) chwilowych w danych warunkach ich funkcjonowania.

Na rysunku 4 przedstawiono koszty wyprodukowania 1kWh energii cieplnej przez poszczególne urządzenia w zależności od temperatury zewnętrznej. Jak można zauważyć punkt bivalentny urządzeń znajduje się na stosunkowo niskim poziomie w zakresie od -11 do -4 °C w zależności od systemu.

W celu obliczenia kosztów użytkowania systemów grzewczych wprowadzono współczynnik $R_i(t_{z,i})$, wskazujący, jaka ilość chwilowego zapotrzebowania na moc cieplną może być pokryta za pomocą pompy ciepła:

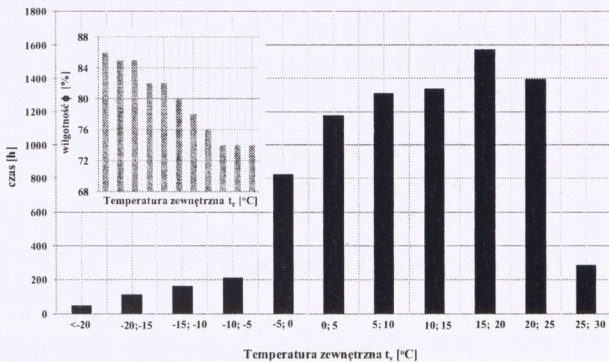
$$R_i(t_{z,i}) = \frac{\dot{Q}_{WPL,i}(t_{z,i})}{\dot{Q}_{C,i}(t_{z,i})} \quad (3)$$

Do obliczania kosztów użytkowania poszczególnych systemów grzewczych stosujemy wzory w postaci podanej na przykładzie systemu pompa ciepła-kocioł kondensacyjny:

$$K_i(t_{z,j}) = \begin{cases} W_{CO,j}(t_{z,j}) \cdot K_{k.kond,j}(t_{z,j}) + W_{CWU,j}(t_{z,j}) \cdot K_{k.kond,CO}(t_{z,j}) \\ \Leftrightarrow K_{k.kond,j}(t_{z,j}) \leq K_{WPL,j}(t_{z,j}) \\ R_i(t_{z,j}) \cdot W_{c,j}(t_{z,j}) \cdot K_{WPL,j}(t_{z,j}) + (1 - R_i(t_{z,j})) \cdot W_{c,j}(t_{z,j}) \cdot K_{k.kond,j}(t_{z,j}) \\ \Leftrightarrow K_{k.kond,j}(t_{z,j}) > K_{WPL,j}(t_{z,j}) \wedge 0 < R_i(t_{z,j}) < 1 \\ W_{c,j}(t_{z,j}) \cdot K_{WPL,j}(t_{z,j}) \Leftrightarrow K_{k.kond,j}(t_{z,j}) > K_{WPL,j}(t_{z,j}) \wedge R_i(t_{z,j}) \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

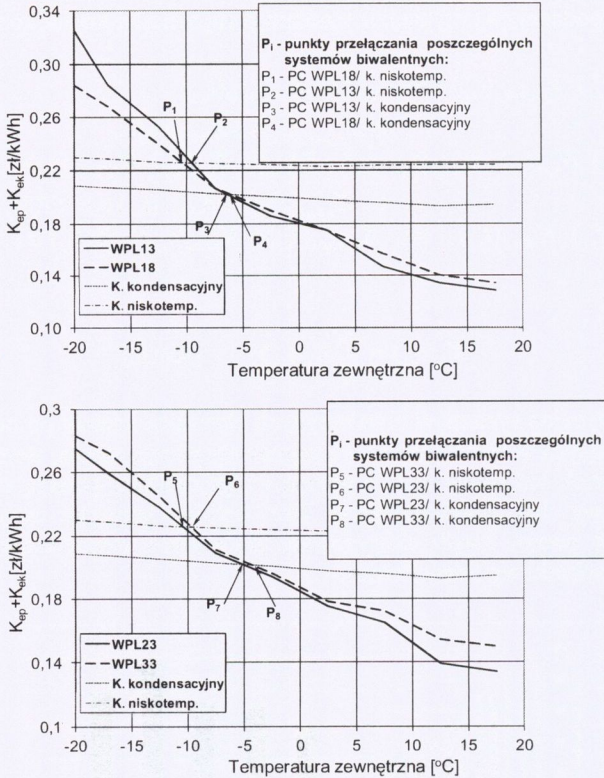
$$K_r(t_{z,j}) = \sum_{i=1}^n K_i(t_{z,j}) \quad [\text{zł/rok}] \quad (5)$$

Koszty inwestycyjne systemów bivalentnych określone zostały po pełnym zestawieniu urządzeń wchodzących w skład systemu i obejmowały pompę ciepła, sterownik, rozdzielnicę elektryczną, zbiornik buforowy wraz z pompą i (opcjonalnie) grzałką elektryczną, kocioł niskotemperaturowy lub kondensacyjny. Dla kotłów przyjęto ceny hurtowe firmy Viessmann, a dla pompy ciepła skorygowane do realiów rynku krajowego ceny firmy Stiebel Eltron, zasobniki wg firmy Pomex.



Rys. 3. Statystyczny rozkład temperatur i wilgotności powietrza w ciągu roku [6]

Fig. 3. Statistical annual distribution of temperature and humidity of air [6]



Rys. 4. Koszty wyprodukowania 1kWh energii ciepłej przez poszczególne urządzenia w zależności od temperatury zewnętrznej

Fig. 4. Cost of production of 1kWh heat energy for different devices

Obliczone i uzyskane od producentów koszty inwestycyjne K_{urz} zamieniano na koszty kapitałowe K_{kap} (amortyzacyjne) stosując zależność:

$$K_{kap} = K_{urz} \cdot \frac{p(1+p)^n}{(1+p)^n - 1} \quad (6)$$

Przyjęto okres amortyzacji dla pompy ciepła i kotła gazowego $n = n_p = n_k = 15$ lat. Do obliczeń kosztów kapitałowych przyjęto koszt kredytu $p = 5\%$.

Sumarycznie koszt eksploatacji biwalentnego systemu grzewczego składa się z kosztów: energii elektrycznej K_{e-p} i paliwa gazowego K_{e-k} , wytwarzania energii ciepłej (obsługa, konserwacja, itp.), kosztów kapitałowych pompy ciepła K_{kap-p} i kotła K_{kap-k} .

Koszty wytwarzania przyjęto proporcjonalnie do ceny energii zużytej przez urządzenie (odpowiednio 5% i 8%), a koszty utrzymania określono jako 2% kosztów inwestycyjnych.

Stąd roczny koszt eksploatacji systemu biwalentnego K_{sb} dany jest wzorem

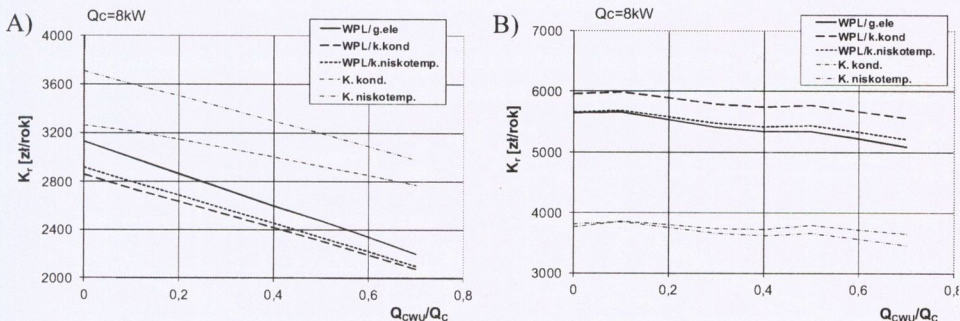
$$K_{sb} = K_{kap-p} + K_{kap-k} + 1,05 \cdot K_{e-p} + 1,08 \cdot K_{e-k} + 0,02 \cdot (K_{kap-p} + K_{kap-k}) \quad (5)$$

W rozpatrywanym zakresie nominalnych obciążeń cieplnych koszty inwestycyjne kotłów kształtują się praktycznie na stałym poziomie.

4. Analiza wyników

Do analizy przyjęto dwa modele obiektu. Pierwszy charakteryzuje typową eksploatację domku jednorodzinnego, drugi może być odniesiony do obiektu gastronomicznego, przemysłowego, małego basenu, itp. Różnica wynika z mocy przeznaczanej na przygotowanie ciepłej wody użytkowej. W pierwszym przypadku część mocy, którą przeznaczamy na c.w.u. wykorzystywana jest jedynie przez krótki okres- maksymalnie przez cztery godziny w ciągu doby, reszta wykorzystywana jest na c.o., w zależności od potrzeb. W drugim przypadku zapotrzebowanie na c.w.u. jest stałe i znaczące przez okres całego roku.

Wykresy rocznych kosztów użytkowania poszczególnych systemów w badanym przedziale 8 ÷ 20 kW całkowitej mocy grzewczej wskazują, że koszty użytkowania systemów grzewczych wyposażonych w pompy ciepła są w każdym przypadku niższe od kosztów w typowych systemach monowalentnych (rys. 5A).



Rys. 5. Roczne koszty użytkowania poszczególnych systemów dla domku jednorodzinnego:

A) koszty eksploatacyjne, B) koszty uwzględniające nakłady inwestycyjne

Fig. 5. Annual consumer costs for different systems of family house:

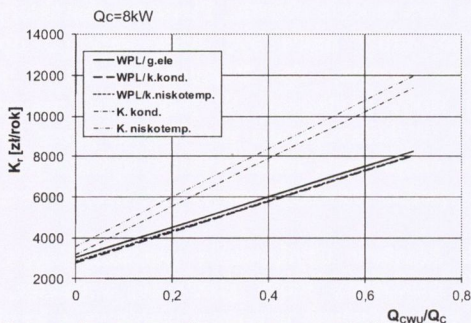
A) operating costs, B) total (with amortization) costs

W przypadku porównania układu monowalentnego z kotłem niskotemperaturowym i biwalentnego wyposażonego w kocioł kondensacyjny i pompę ciepła WPL różnice kosztów funkcjonowania sięgają od 12% do 30% z tendencją wzrostu opłacalności wraz ze wzrostem mocy przeznaczanej na przygotowanie c.w.u.

Koszty funkcjonowania najtańszego bivalentnego systemu grzewczego (WPL – grzałka elektryczna) są w całym zakresie mniejsze od kosztów generowanych przez kocioł niskotemperaturowy, a dla niższych wartości współczynnika $\dot{Q}_{CWU} / \dot{Q}_C$ porównywalne z kosztami dla kotła kondensacyjnego.

Analiza rocznych kosztów eksploatacji poszczególnych systemów uwzględniających nakłady inwestycyjne wskazuje jednoznacznie, że wykorzystanie pomp ciepła tego typu w gospodarstwach domowych jest nieopłacalne (rys. 5B).

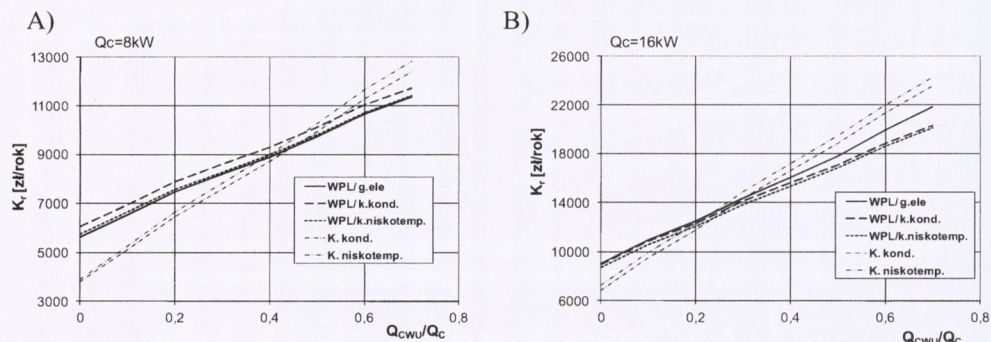
W badanym przedziale różnica kosztów pomiędzy systemami bivalentnymi i monowalentnymi wahała się od około 50 % (dla $\dot{Q}_C = 8$ kW) do kilkunastu (dla $\dot{Q}_C = 20$ kW).



Rys. 6. Roczne koszty użytkowania poszczególnych systemów

Fig. 6. Annual operating costs for different systems

Odmienne wyniki otrzymujemy analizując drugi przyjęty model, charakteryzujący się zwiększonym stałym zapotrzebowaniem na c.w.u. (rys. 6).



Rys. 7. Roczne koszty eksploatacyjne użytkowania poszczególnych systemów uwzględniające nakłady inwestycyjne: A) Całkowita moc grzewcza $\dot{Q}_C = 8$ kW, B) Całkowita moc grzewcza $\dot{Q}_C = 16$ kW

Fig. 7. Annual total costs for different systems:

A) Total heat power $\dot{Q}_C = 8$ kW, B) Total heat power $\dot{Q}_C = 16$ kW

W zakresie kosztów eksploatacyjnych otrzymane wyniki są analogiczne z wynikami uzyskanymi dla modelu pierwszego. Ze względu na (sześciokrotnie) zwiększoną ilość

energii, która jest przeznaczona na produkcję c.w.u. w modelu drugim koszty funkcjonowania urządzeń są wyższe. W związku z tym różnica kosztów funkcjonowania systemów biwalentnych z kotłem gazowym i systemów monowalentnych, w stosunku do całkowitych kosztów inwestycyjnych układu biwalentnego znacznie wzrasta w porównaniu do modelu pierwszego. Wraz ze wzrostem tego wskaźnika wzrasta opłacalność inwestycji. Wykresy na rysunkach 7A i 7B wskazują, że istnieje zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania c.w.u. i c.o., dla którego koszt produkowania energii cieplnej za pomocą systemu biwalentnego wyposażonego w pompę ciepła powietrze-woda jest niższy niż produkowanie energii za pomocą kotła gazowego.

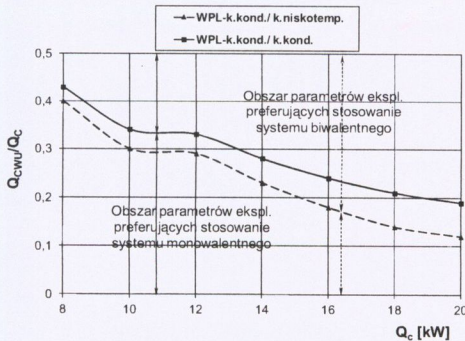
Wraz ze wzrostem całkowitego zapotrzebowania na moc cieplną budynku maleje wartość $\dot{Q}_{cwu} / \dot{Q}_c$ wymagana by system biwalentny (WPL – kocioł gazowy) był opłacalny.

5. Podsumowanie

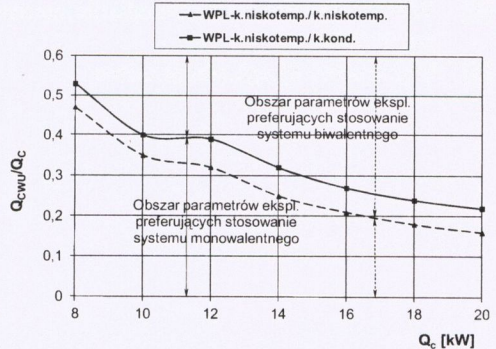
W oparciu o wyliczone wartości punktów przecięcia się wykresów określających roczne koszty użytkowania różnych systemów z uwzględnieniem kosztów inwestycyjnych sporządzono wykresy przedstawione na rysunkach 8A i 8B.

Rysunki 8A i 8B wskazują warunki eksploatacyjne, które należy spełnić, aby analizowany biwalentny system grzewczy okazał się opłacalny w porównaniu z rozpatrywanymi systemami monowalentnymi. Obszary leżące powyżej wyznaczonych krzywych preferują stosowanie systemów biwalentnych.

A)



B)



Rys. 8. Obszar parametrów eksploatacyjnych preferujących stosowanie poszczególnych systemów grzewczych: A) Układ pompy ciepła z kotłem niskotemperaturowym, B) Układ pompy ciepła z kotłem kondensacyjnym

Fig. 8. Preferred area of working paramiters for heat bivalent systems: A) Heat pump with gas low temperature boiler, B) Heat pump with gas fired condensig boiler

Oznaczenia

$K_{k,kond,i}(t_{z,i})$	$K_{WPL,i}(t_{z,i})$	– koszt wyprodukowania 1kWh energii cieplnej za pomocą kotła kondensacyjnego, pompy ciepła dla temp. zewn. $t_{z,i}$	[zł/1kWh]
$W_{CO_2,i}(t_{z,i})$	$W_{CWU,i}(t_{z,i})$	– zapotrzebowanie na energię c.o., c.w.u. dla temp. zewn. $t_{z,i}$	[kWh]
$W_{C,i}(t_{z,i})$		– całkowite obciążenie cieplne dla temp. zewn. $t_{z,i}$	[kW]
K_{kap-p}	K_{kap-k}	– koszt inwestycyjny pompy ciepła, kotła gazowego	[zł]
$\dot{Q}_{wpl,i}(t_{z,i})$		– chwilowe zapotrzebowanie na moc cieplną dla temperatury $t_{z,i}$ pokrywana za pomocą pompy ciepła	[kW]
$\dot{Q}_{c,i}(t_{z,i})$		– zapotrzebowanie na moc cieplną dla temperatury $t_{z,i}$	[kW]

Literatura

- [1] Marks W., Owczarek S.: *Optymalizacja wielokryterialna budynków energiooszczędnych*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 1999.
- [2] Żelasko J.: *Analiza techniczna i optymalizacja ekonomiczna biwalentnego systemu pompa ciepła-kocioł gazowy*, Materiały XIX Zjazd Termodynamików. Gdańsk, 2005.
- [3] Wójcik S.: *Przydatność metody LCC (Life Cycle Cost) do oceny efektywności różnych systemów ogrzewania w budownictwie mieszkaniowym*, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 9, (2001).
- [4] [WWW.stiebel-eltron.pl/produkty/pompy_ciepła_powietrze_wodawpl_13-33](http://www.stiebel-eltron.pl/produkty/pompy_ciepła_powietrze_wodawpl_13-33)
- [5] [WWW.viessmann.pl/etc/medialib/internet](http://www.viessmann.pl/etc/medialib/internet): Zeszyt Viessman-Technika Kondensacyjna 200901
- [6] <http://meteo.ftj.agh.edu.pl/meteo>