Mariusz Owczarek, Weronika Radzikowska-Juś

Analiza kosztów inwestycji i eksploatacji hybrydowych źródeł energii dla budynku w technologii tradycyjnej w zależności od jego skali

Mazowsze Studia Regionalne 19, 183-202

2016

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych oraz w kolekcji mazowieckich czasopism regionalnych mazowsze.hist.pl.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

MUZEUM HISTORII POLSKI

DOI: 10.21858/msr.19.12

Analiza kosztów inwestycji i eksploatacji hybrydowych źródeł energii dla budynku w technologii tradycyjnej w zależności od jego skali

Mariusz Owczarek, Weronika Radzikowska-Juś

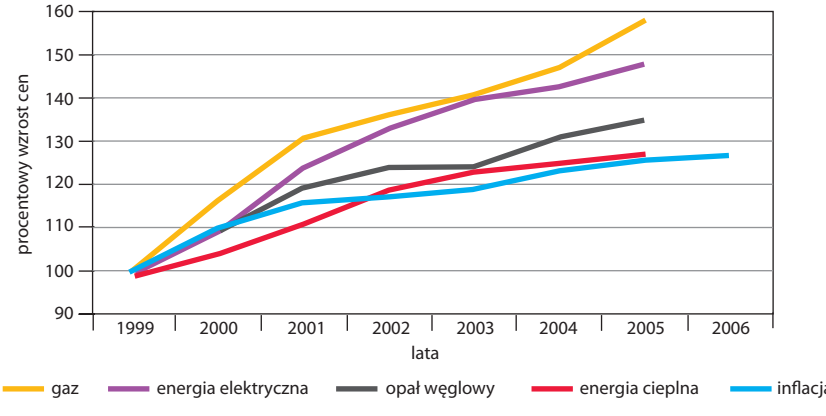
STRESZCZENIE

Najczęściej stosowane źródła energii dla budynków jednorodzinnych to węgiel, gaz i olej opałowy. Coraz częściej inwestorzy rozważają też instalacje pompy ciepła. Każde z tych źródeł charakteryzuje się innymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Idea źródła hybrydowego polega na współpracy kilku źródeł energii w jednym budynku. Celem opracowania jest dobór najlepszych udziałów źródeł z trzech kryteriów: minimum kosztów inwestycji, minimum kosztów eksploatacji przez założony okres czasu i minimum sumy kosztów inwestycji i eksploatacji. Parametrem zmiennym jest wymiar budynku, określony jako długość. Budynek ma kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratu. Obliczane jest zapotrzebowanie ciepła dla budynku, a następnie dobierane hybrydowe źródło ciepła. Zapotrzebowanie ciepła jest obliczane metodą uproszczoną, z bilansem rocznym, a dobór źródła ciepła polega na obliczeniu kosztów dla 286 wybranych kombinacji udziałów źródeł i wybraniu kosztów minimalnych. Wyprowadzono wnioski na temat kosztów inwestycji i eksploatacji źródeł hybrydowych o różnych proporcjach składników.

Sytuacja na rynku paliw w Polsce i na świecie

Zasoby paliw kopalnych są ograniczone i za kilkadziesiąt, kilkaset lat (w zależności od szacunków) ulegną wyczerpaniu. Chociaż być może nie stanie się to za nasze-

Ryc. 1. Przewidywane zużycie energii w Polsce



Źródło: Anam 2007

Tabela 1. Zasoby paliw naturalnych

Paliwo	Zapasy		Rok wyczerpania
	potwierdzone	jednostka	
Węgiel	891,5	Pg	po 2200
Ropa	239,4	Pg	2050
Gaz	186,9	Tm^3	po 2060
Uran	1,02	Pg	2200

Źródło: Lewandowski 2007 – uran, *BP Statistical Review of World Energy* 2015 – pozostałe źródła

go życia, to malejące ich zasoby będą napędzały wzrost cen, który widoczny jest już obecnie. Ceny paliw zależą od wielu czynników, na przykład aktualnej sytuacji gospodarczo-politycznej, jednak przy malejących zasobach wzrost cen na pewno się pojawi. Korzystnie jest więc mieć zasilanie ze źródeł, które mogą wykorzystywać kilka paliw równocześnie.

W tabeli 1. zestawiono dane dotyczące ogólnoświatowych zapasów paliw naturalnych oraz orientacyjny rok ich wyczerpania.

Idea systemów hybrydowych

Słowo „hybryda" pochodzi z języka greckiego i oznacza „zmieszany, dwojakiego pochodzenia" [Grabarek, 2012]. Hybrydowe systemy ogrzewania to połączenie w jednym obiekcie, w jednym systemie wielu urządzeń do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody, urządzeń, które mają różne źródła energii – gaz, olej, drewno, energię słoneczną, węgiel itp. Rodzaje urządzeń tworzących system hybrydowy zależą w zasadzie tylko od możliwości zaopatrzenia w dany rodzaj źródła energii (paliwa) i od spełnienia potrzeb użytkownika [*Co to jest system hybrydowy?, 2015*].

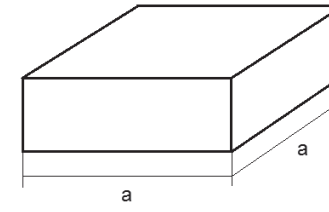
Istota systemu hybrydowego to integralność wielu różnorodnych – zasilanych różnymi rodzajami energii – urządzeń. Zasada polega na współdziałaniu wszystkich tych urządzeń w jednym systemie i ich wspólnym sterowaniu. I tak, w czasie pracy podstawowego urządzenia (np. kotła), kiedy tylko to jest możliwe, system przełącza się na zasilanie z drugiego, bardziej uzasadnionego ekonomicznie źródła. Kiedy drugie źródło przestaje pracować, system wraca do zasilania z podstawowego źródła. Istnieje też możliwość podłączenia do hybrydy trzeciego urządzenia. Ilość urządzeń w hybrydzie i źródeł ich zasilania jest dowolna, ważne jest jednak to, żeby wszystkie elementy były połączone w całość tak, aby bezpiecznie i efektywnie pracować w jednym systemie.

Pojęcie hybrydowych systemów (układów) wytwórczych (HSW) – to połączenie różnych technologii wykorzystania zarówno konwencjonalnych technologii wytwarzania energii elektrycznej (i/lub ciepła), jak i odnawialnych zasobów energii oraz urządzeń do magazynowania energii (zasobników energii), a także złożonych systemów nadzoru i sterowania. Systemy HSW w wielu przypadkach mogą okazać się opłacalne ekonomicznie, a ich zastosowanie przyjazne dla środowiska [Paska, Sałek, Surma, 2005].

Budynek bazowy

Analizowany budynek ma kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratu, jak na ryc. 2. Parametrem jest szerokość, a kształt budynku jest celowo bardzo prosty, aby można było uzależnić powierzchnie przegród obudowy bilansowej od tylko jednego parametru. Powierzchnie okien i drzwi obliczono jako stały procent powierzchni ścian, w tym przypadku 30%. Zyski słoneczne obliczono jak dla Warszawy. Pozostałe parametry budynku zawiera tabela 2.

Ryc. 2. Bryła budynku bazowego



Założono, że budynek wyposażony jest w wentylację mechaniczną ze sprawnością odzysku ciepła 70%. Za metodyką [Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r., Tabela 2.] przyjęto sprawność instalacji ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej równą 0,7. Współczynnik efektywności pompy ciepła zostanie wyznaczony w dalszej części artykułu. Długość sezonu grzewczego jest stała i wynosi 222 dni. Wynikiem zastosowanej procedury do obliczania zapotrzebowania na ciepło jest wartość zapotrzebowania na energię końcową.

Tabela 2. Zestawienie parametrów budynku niezbędnych do obliczenia zapotrzebowania na energię

Parametr	Wartość
Współczynnik przenikania ciepła ścian [W/(m^{2}K)]	0,25
Współczynnik przenikania ciepła okien [W/(m^{2}K)]	1,1
Współczynnik przenikania ciepła stropu [W/(m^{2}K)]	0,3
Współczynnik przenikania ciepła podłogi [W/(m^{2}K)]	0,3
Krotność wentylacji [1/h]	0,5
Jednostkowe zapotrzebowanie na CWU [l/(m^2*doba)]	1,6

Dobór źródła ciepła

Rodzaje analizowanych źródeł ciepła

Paliwa naturalne

Paliwami stosowanymi w energetyce konwencjonalnej mogą być paliwa stałe (węgiel kamienny, brunatny, torf), paliwa płynne (ropa naftowa, lekki olej opałowy, ciężki olej opałowy, olej Diesla i inne), paliwa gazowe (gaz ziemny), paliwa nuklearne (uran 235). Ilość ciepła wydzielonego przy spaleniu porcji paliwa wyrażają dwa parametry.

Ciepło spalania gazu jest ilością ciepła wydzieloną przy całkowitym spaleniu 1m^3 gazu i ochłodzeniu produktów spalania do temperatury początkowej, co łączy się ze skropleniem zawartej w nich pary wodnej. Wartość opałowa odpowiada ilości ciepła wydzielonego przy spaleniu 1m^3 gazu, gdy woda zawarta w produktach spalania występuje w postaci pary. Jednostkami ciepła spalania i wartości opałowej są J/kg lub J/m^3 dla gazu.

Wartość opałowa jest mniejsza od ciepła spalania o wielkość ciepła skraplania pary wodnej.

Węgiel kamienny i brunatny

Wartość opałowa węgla kamiennego może się wahać w zakresie od 17 do 34 MJ/kg (do celów grzewczych nie stosuje się węgla o wartości opałowej poniżej 21 MJ/kg), a więc z tej samej ilości węgla bardzo dobrej jakości można uzyskać nawet dwa razy więcej ciepła niż z węgla niższej jakości [Laskowski, 2015].

Natomiast węgiel brunatny, ze względu na niższą wartość energetyczną i swoje wady, stanowi głównie paliwo dla przemysłu. Jednak ze względu na niską cenę bywa stosowany w ogrzewaniu domów. Podstawową wadą węgla brunatnego jest jego naturalna wilgotność oraz wysoka chłonność wody. Z tego względu bezpośrednio po wydobyciu węgiel brunatny zawiera jej ok. 30%, a jego wartość opałowa kształtuje się na poziomie 5-10 MJ/kg, czyli mniej niż dla surowego drewna. Z tego względu przed użyciem węgiel jest suszony, co zapewnia wzrost jego wartości energetycznej do ok. 20 MJ/kg. W praktyce w ogrzewaniu gospodarstw domowych używanie węgla brunatnego wiąże się z koniecznością kupna 2-3 razy więcej węgla brunatnego niż kamiennego, by uzyskać tyle samo ciepła. Ponadto zwiększona zawartość siarki (pomijając szkodliwy wpływ na środowisko) zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia korozji kotła i komina [Treter, 2015].

Olej opałowy

Olej opałowy, podobnie jak paliwa silnikowe, jest produktem rafinacji ropy naftowej.

Oleje opałowe dzielą się ze względu na gęstość oraz zawartość siarki. Przyjmijmy, że przybliżona wartość gęstości mieści się w następujących przedziałach:

- lekki olej opałowy: 0,82-0,85 g/cm^3
- średni olej opałowy: 0,85-0,89 g/cm^3
- ciężki olej opałowy: powyżej 0,89 g/cm^3

Pomiędzy olejami z poszczególnych grup istnieje wiele różnic – nawet oleje zaliczane do tej samej kategorii posiadają różne właściwości (szczególnie wśród olei średnich i ciężkich).

Cechy charakterystyczne każdego oleju decydują o jego przeznaczeniu. Olej opałowy lekki stosowany jest głównie w kotłowniach przydomowych oraz w małych i średnich firmach i instytucjach. Sprawdza się również w większych kotłowniach, np. w spółdzielniach mieszkaniowych. Olej opałowy średni i ciężki znajdują zastosowanie w instalacjach przemysłowych; w dużych zakładach produkcyjnych, przetwórczych, elektrociepłowniach itp. [*Olej opałowy, 2015*].

Gaz ziemny

Gaz ziemny jest naturalnym paliwem wydobywanym ze złóż, znajdujących się w skorupie ziemskiej. Stanowi mieszaninę gazów – metanu z innymi gazami palnymi oraz związkami niepalnymi. Skład gazu zależy od miejsca jego wydobywania oraz istotnie zależy od technologii zgazowania. Zawartość metanu powoduje, iż w procesie spalania nie tworzą się pyły i nie powstają stałe odpady. W wyniku różnorodnych procesów chemicznych skład gazu ulega zmianom i końcowym produktem jest gaz ziemny, przystosowany do transportu siecią gazociągów i użytkowania go w coraz większej liczbie urządzeń, opartych na technologii gazowej [PGNiG 2015].

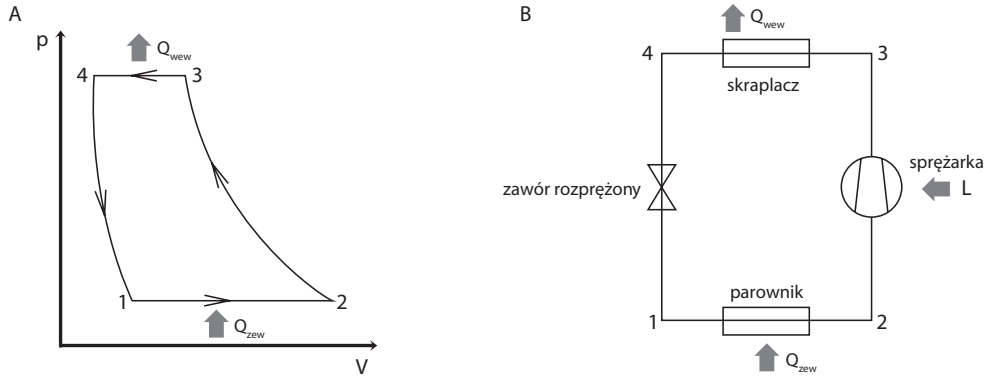
W Polsce dostarczanych jest najczęściej pięć rodzajów gazu ziemnego:

1) gaz ziemny wysokometanowy typu E (dawniej GZ-50):
   ciepło spalania – zgodnie z taryfą nie może być mniejsze niż 38,0 MJ/m^3, za standardową przyjmując wartość 39,5 MJ/m^3, wartość opałowa – nie mniejsza niż 31,0 MJ/m^3;
2) gaz ziemny zaazotowany typu Ls (dawniej GZ-35):
   ciepło spalania – zgodnie z taryfą nie może być mniejsze niż 28,8 MJ/m^3, za standardową przyjmując wartość 27,9 MJ/m^3, wartość opałowa – nie mniejsza niż 24,0 MJ/m^3;
3) gaz ziemny zaazotowany typu Lw (dawniej GZ-41,5):
   ciepło spalania – zgodnie z taryfą nie może być mniejsze niż 32,8 MJ/m^3, za standardową przyjmując wartość 31,0 MJ/m^3, wartość opałowa – nie mniejsza niż 27,0 MJ/m^3;
4) gaz propan-butan – powietrze grupy GPP:
   ciepło spalania – zgodnie z taryfą nie może być mniejsze niż 23,3 MJ/m^3, za standardową przyjęta została wartość 24,0 MJ/m^3;
5) gaz propan-butan – rozprężony grupy B/P:
   ciepło spalania – zgodnie z taryfą nie może być mniejsze niż 111,6 MJ/m^3, za standardową przyjęta została wartość 115,0 MJ/m^3.

Pompa ciepła

Pompa ciepła (PC) jest to urządzenie, które przepompowuje ciepło z obszaru o niskich temperaturach (tzw. dolne źródło pompy ciepła) do domowej instalacji grzewczej, w której temperatura czynnika jest wyższa. Zadaniem pompy ciepła jest „wyciągnięcie"

Ryc 3. Schemat działania pompy ciepła



ciepła z jednego miejsca, a następnie oddanie go przy wyższej temperaturze w innym miejscu. Dlatego mówi się, że pompa ciepła nie wytwarza, a jedynie przenosi (przepompowuje) je z otoczenia do ogrzewanego domu. Nieprzypadkowo nazwa jest analogiczna do zwykłej pompy wodnej, która pobiera wodę z miejsca na niskiej wysokości i przetłacza ją wyżej lub podnosi jej ciśnienie [Lis, 2015]. Dzięki temu możemy czerpać ciepło niskotemperaturowe z gruntu, powietrza czy wody, a następnie używać je do ogrzewania naszego domu.

Przenoszenie ciepła z ośrodka o niższej temperaturze do ośrodka o wyższej może być zrealizowane na kilka sposobów, najpopularniejsze są pompy ciepła absorpcyjne i sprężarkowe. Tu zajmiemy się tylko pompą sprężarkową. Działanie pompy jest możliwe dzięki czynnikowi, który paruje i skrapla się w takiej temperaturze i ciśnieniu, aby przenosić ciepło na pożądanym poziomie temperaturowym [Szargut, 2016, rozdział 6]. Obieg termodynamiczny i techniczną realizację urządzenia przedstawia ryc. 3.

Załóżmy, że mamy czynnik o temperaturze i ciśnieniu odpowiadający punktowi 1. na ryc. 3A. Temperatura ta jest niższa niż temperatura ośrodka, w którym umieszczony jest parownik. Ciśnienie czynnika jest natomiast tak niskie, aby intensywnie parował, w takim stanie przepływa on przez parownik, zamieniając się w gaz, a przy tym odbierając ciepło z otoczenia parownika o temperaturze T_{par}. Następnie trafia do sprężarki, która spręża go do stanu w punkcie 3. Jego ciśnienie jest teraz tak wysokie, że przepływając przez skraplacz, zamienia się w ciecz, oddając ciepło do ośrodka o temperaturze T_{skr}, wyższej od temperatury $T_{par.}$ Następnie z punktu 4. trafia do zaworu rozprężnego, w którym, na skutek dławienia, obniża się jego ciśnienie. Znajdujemy się znowu w punkcie 1. i cały proces powtarza się. W technicznej realizacji procesu temperatura czynnika w parowniku jest nieco wyższa niż temperatura ośrodka T_{par}, a temperatura w skraplaczu nieco niższa niż T_{skr}. Występują też

straty energii na sprężarce i zaworze rozprężnym. Współczynnik efektywności pompy ciepła definiuje się jako:

$$C.O.P = \frac{Q_{wew}}{L} \quad (1),$$

gdzie:
Q_{wew} – ciepło oddane w skraplaczu,
L – praca do napędu sprężarki.

Jeśli pominiemy opisane fakty, wynikające z fizycznej realizacji obiegu, otrzymamy pewną wzorcową, teoretyczną pompę ciepła, pracującą według tak zwanego obiegu Carnota. Jej współczynnik efektywności można wyznaczyć, mając tylko temperaturę T_{par} i T_{skr}.

$$C.O.P_t = \frac{T_{skr}}{T_{skr} - T_{par}} \quad (2).$$

W praktyce współczynnik efektywności najłatwiej wyznaczyć z pomiarów ciepła oddawanego przez pompę i mocy do napędu sprężarki. Porównanie współczynników teoretycznych i rzeczywistych dla przykładowej pompy znanego producenta zawiera tabela 3. Temperaturę w otoczeniu skraplacza T_{skr} obliczono jako średnią temperaturę zasilania i powrotu wody z obiegu C.O.

Widać, że straty bardzo ograniczają efektywność pompy i że jest ona bardziej efektywna przy wyższych temperaturach zewnętrznych. W roku 2015 średnia temperatura, na podstawie archiwum pomiarów stacji meteorologicznej LAB-EL, dla miesięcy od stycznia do kwietnia i od października do grudnia, wyniosła 5,06°C. Na podstawie tej wartości i tabeli 3. do dalszych obliczeń przyjęto średni współczynnik COP = 3,5.

Tabela 3. Zależność współczynnika efektywności pompy ciepła od temperatury w obiegu

$T_{zew} = T_{par}$	T zasilania C.O.	T_{skr}	COP_t	COP
-7	35	30	8,2	2,97
2	35	30	10,8	3,53
7	35	30	13,2	4,04
10	35	30	15,2	4,66
-7	45	40	6,7	2,58
2	45	40	8,2	3,02
7	45	40	9,5	3,41

Określenie mocy źródła

Mając obliczone zapotrzebowanie na energię, wyznaczamy całkowitą moc źródła według normy PN-EN 12831 [PN-EN 12831:2006].

$$P_C = \left(H_{tr} + H_{ve}\right)\left(T_{\text{int}} - T_e\right) \quad (3),$$

gdzie:
T_{int} – projektowa temperatura wewnętrzna,
T_e – projektowa temperatura zewnętrzna,
H_{tr} – współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie, wyznaczany według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r., punkt 5.2.3.1.1,
H_{ve} – współczynnik przenoszenia ciepła przez wentylacje, wyznaczany według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r., punkt 5.2.3.2.

Następnie wprowadzamy uogólnione hybrydowe źródło ciepła, które może się składać z kotła węglowego (indeks W), gazowego (indeks G), olejowego (indeks O) i pompy ciepła (indeks PC) w dowolnych proporcjach. Łączna moc źródła P_c:

$$P_C = WP_C + GP_C + OP_C + PCP_C = P_W + P_G + P_O + P_{PC} \quad (4),$$

gdzie:
W, G, O, PC – udziały mocy poszczególnych źródeł składowych, W+G+O+PC=1.

Koszty inwestycyjne źródeł

Koszty inwestycyjne poszczególnych źródeł zależą od ich mocy. Dla każdego źródła określono zależność w postaci wielomianu, opisującą koszt w zależności od mocy. Postać funkcji otrzymano przez interpolacje cen danego źródła (kotła, pompy ciepła) dla różnych mocy pochodzących z własnych badań rynku. Wysokość cen ulega wahaniom, w tym artykule odpowiada marcowi 2015 roku.

Przyjętą funkcje zależności cen od mocy opisuje wzór 5.:

$$y = \begin{cases} 1000 & dla \quad -1{,}1477x^2 + 198{,}96x - 147{,}35 < 1000 \\ -1{,}1477x^2 + 198{,}96x - 147{,}35 & dla \quad -1{,}1477x^2 + 198{,}96x - 147{,}35 > 1000 \end{cases} \quad (5),$$

gdzie:
y – cena [PLN],
x – moc źródła [kW].

Odpowiednią funkcje dla kotła gazowego przedstawia wzór 6.:

$$y = 68{,}345x + 6747{,}5 \quad (6).$$

Koszty kotła olejowego – funkcja 7.

$$y = 24{,}361x + 8356{,}2 \quad (7).$$

Ostatnim rozpatrywanym źródłem jest pompa ciepła; jej koszty inwestycyjne opisuje funkcja 8.

$$y = 1161{,}2x + 26104 \quad (8).$$

Prosty czas zwrotu

SPBT (*Simply Pay Back Time*) jest najprostszym wskaźnikiem oceny ekonomicznej w porównaniu z rozwiązaniem bazowym (w przypadku projektowanej modernizacji rozwiązaniem bazowym jest stan istniejący budynku). Prosty czas zwrotu SPBT jest to okres w latach, w którym wpływy (oszczędności) zrównoważą poniesione nakłady inwestycyjne. Zatem okres, w którym zwrócą się poniesione nakłady, wyrażamy wzorem [Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r.]:

$$SPBT = \frac{N_U}{\Delta O_r} \quad (9),$$

$$\Delta O_r = O_1 - O_2 \quad (10),$$

gdzie:
N_U – koszt inwestycyjny źródła,
ΔO_r – suma rocznych oszczędności,
O_1 – koszt energii w roku dla źródła 1,
O_2 – koszt energii w roku dla źródła 2.

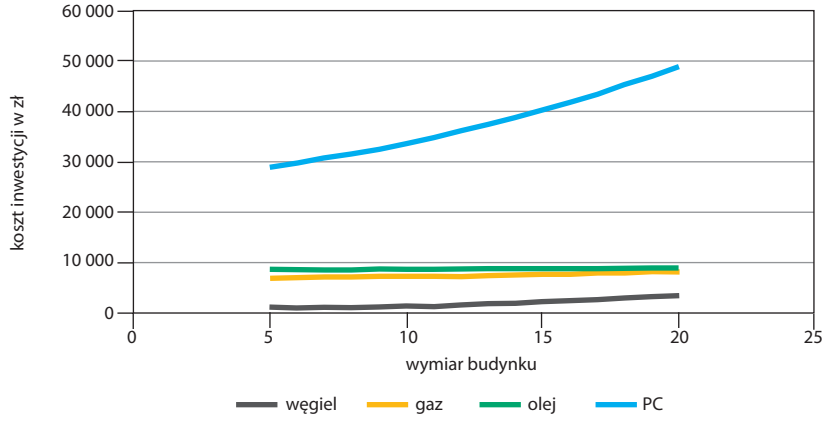
Wyniki dla źródeł pojedynczych

W pierwszej kolejności rozpatrzono koszty inwestycji, eksploatacji oraz koszty inwestycji wraz z kosztami 20-letniej eksploatacji przy zastosowaniu poszczególnych nośników ciepła. Na ryc. 4.-7. wymiar budynku opisany na osi poziomej odpowiada zmiennej „a" na ryc. 2.

Biorąc pod uwagę wyłącznie koszty inwestycyjne, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest kocioł węglowy, nieco droższe są inwestycje w kotły: olejowy i gazowy. Natomiast ze zdecydowanie najwyższymi kosztami związany jest zakup pompy ciepła (ryc. 4.).

Koszt energii w sezonie grzewczym dla mniejszych budynków, w każdym z rozpatrywanych przypadków, jest zbliżony. Przyjęto następujące jednostkowe koszty energii z poszczególnych źródeł: węgiel – 0,12 zł/kWh, olej – 0,4 zł/kWh, gaz – 0,24 zł/kWh, energia elek-

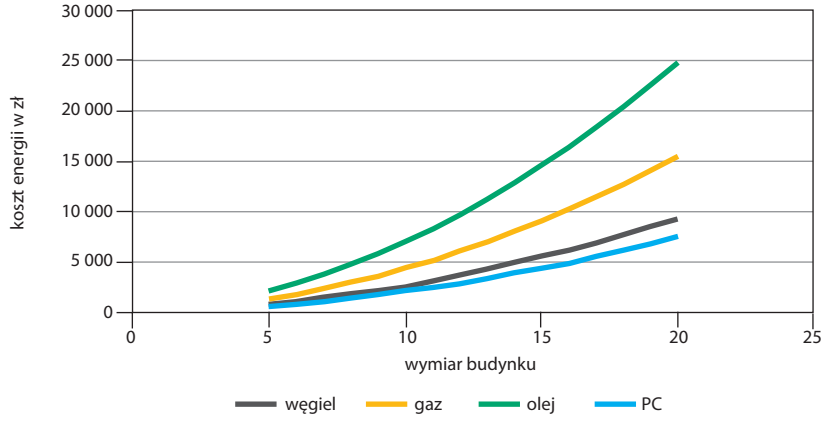
Ryc. 4. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych źródeł ciepła w zależności od wymiaru budynku



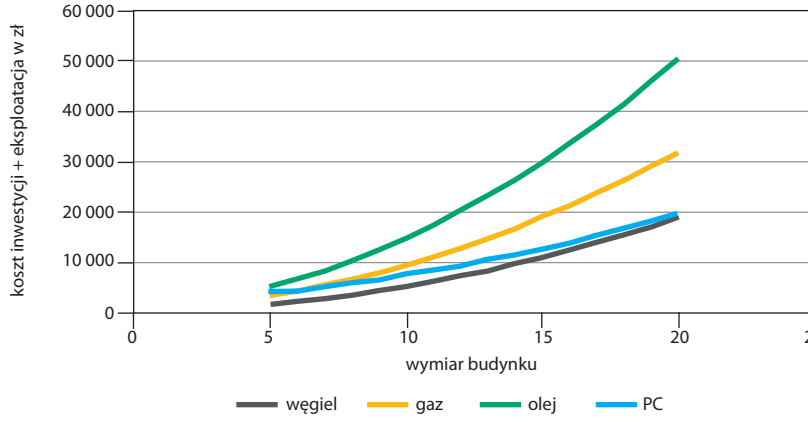
tryczna – 0,6 zł/kWh [1]. Znaczące różnice obserwujemy przy większej kubaturze budynku. Im większy budynek, tym ogrzewanie olejowe jest droższe, podobnie jest z gazem. Jeśli chodzi o węgiel i pompę ciepła – to utrzymują się one na podobnym poziomie (ryc. 5.).

Natomiast jeżeli do kosztów inwestycji dodamy 20 lat eksploatacji, pompa ciepła osiągnie podobną wartość do węgla, czyli najtańszego z nośników. Najdroższy jest nadal olej. Gaz utrzymuje się na średnim poziomie (ryc. 6.).

Ryc. 5. Zestawienie kosztów energii w sezonie grzewczym dla poszczególnych źródeł ciepła w zależności od wymiaru budynku



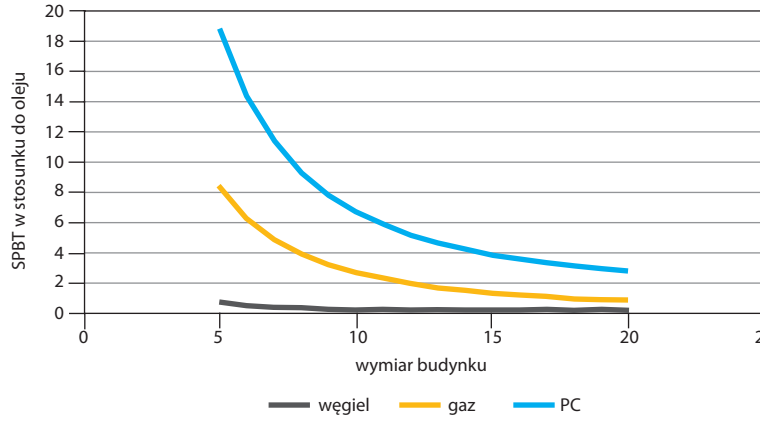
Ryc. 6. Zestawienie kosztów inwestycji + 20-letnia eksploatacja dla poszczególnych źródeł ciepła w zależności o wymiaru budynku



Najkrótszy czas zwrotu w stosunku do oleju ma węgiel, kubatura budynku ma bardzo niewielki wpływ. Natomiast gaz i pompa ciepła szybszy czas zwrotu osiąga w przypadku budynków o większej kubaturze (ryc. 7.).

W kolejnym kroku rozważań postanowiono połączyć w hybrydy każdy z nośników energii. Założono, że hybrydę mogą tworzyć dwa, trzy lub cztery urządzenia z różnym udziałem procentowym (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%). Do obliczeń

Ryc. 7. Porównanie SPBT dla poszczególnych źródeł ciepła w zależności o wymiaru budynku w stosunku do oleju



przypadków dodano również możliwość, iż urządzenia nie będą tworzyły hybryd, czyli jedno urządzenie będzie miało 100% udziału, a pozostałe 0%. Poszukiwano optymalnego rozwiązania pod względem kosztowym. Minimalizowano sumę kosztów inwestycji i eksploatacji źródła hybrydowego przy danych udziałach. Funkcje celu można zapisać w postaci:

$$\sum_i I\left(P_C G_i\right) + n\sum_i EK * A_k G_i C_i = \min \qquad (11),$$

gdzie:
I – koszt inwestycyjny danego urządzenia w funkcji mocy,
G_i – udział danego urządzenia w źródle hybrydowym, np. G_1 = W, G_2 = G, G_3 = O, G_4 = PC,
EK – zapotrzebowanie na energię końcową dla budynku na jednostkę powierzchni użytkowej [KWh/(m^{2}rok)],
A_k – powierzchnia użytkowa budynku [m^2],
C_i – cena jednostki energii z danego źródła [zł/kWh],
n – liczba lat eksploatacji systemu.

Minimum poszukiwano metodą przeglądania. Rozpatrzono 286 opcji, jako opcje rozumiemy kombinacje udziałów W,G,O i PC. By przyspieszyć obliczenia posłużono się autorskim programem, napisanym w języku C^{++}.

Dla budynku o danych wymiarach wyznaczane jest zapotrzebowanie na energie metodą skróconą. Niezbędną moc źródła dla budynku o danym współczynniku strat wyznaczono zgodnie z PN-EN 12831:2006. Następnie dla założonego podziału mocy obliczany jest koszt inwestycji i eksploatacji poszczególnych źródeł. Ilość energii, jaką muszą pokryć poszczególne źródła, jest dzielona z takimi samymi współczynnikami wag, co moc. W kolejnych iteracjach, przy niezmienionym wymiarze budynku, rozpatrywane są kolejne kombinacje udziałów mocy źródeł. Za optymalną uważa się kombinacje z minimalnymi kosztami.

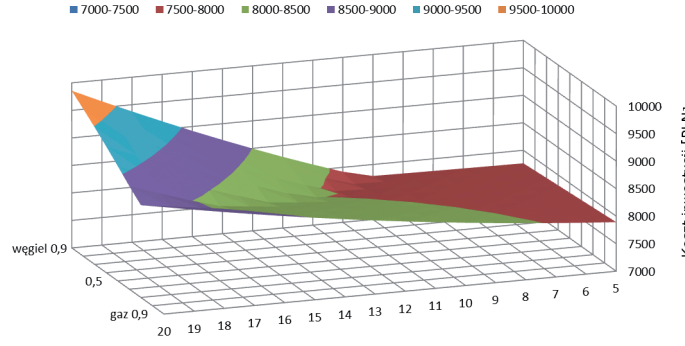
Koszty inwestycji dla źródeł hybrydowych

Na rycinach 8.-19. pokazano opłacalność systemów hybrydowych, które tworzą pary poszczególnych urządzeń. Ryciny 8.-13. biorą pod uwagę jedynie koszty inwestycji, a więc tylko pierwszą sumę ze wzoru (11). Ryciny 14.-19. oprócz inwestycji zawierają również 20 lat eksploatacji, we wzorze (11) *n* równe jest 20.

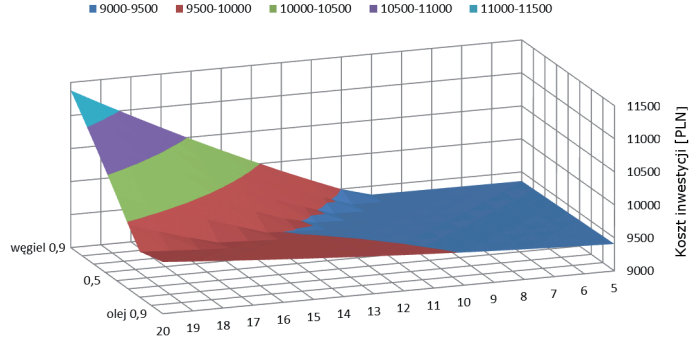
Analizując rycinę 8., warto zauważyć, że dla mniejszych budynków najtańszy jest węgiel. Natomiast dla budynków większych opłaca się inwestycja w źródło hybrydowe, w którym z wielkością budynku wzrasta udział gazu i zmniejsza się udział węgla.

Biorąc pod uwagę wyniki dla hybrydy węgiel – olej (ryc. 9.), są one podobne jak dla źródła węglowo-gazowego. Decydujący wpływ na zmienność kosztów ma cena kotła węglowego, która silnie rośnie wraz z mocą.

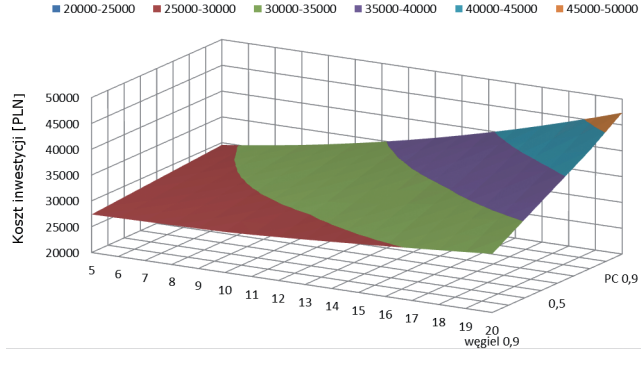
Ryc. 8. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych par hybryd węgiel – gaz w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



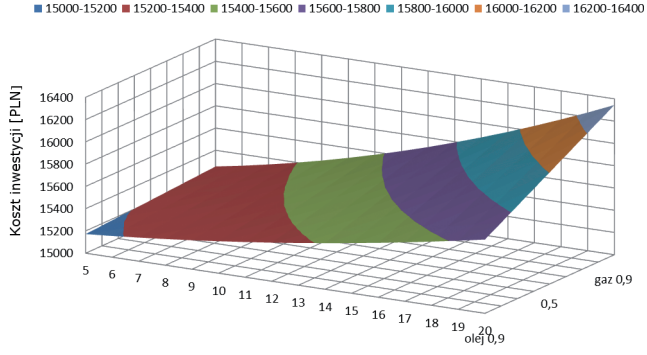
Ryc. 9. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych par hybryd węgiel – olej w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



Ryc. 10. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych par hybryd węgiel – PC w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



Ryc. 11. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych par hybryd gaz – olej w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



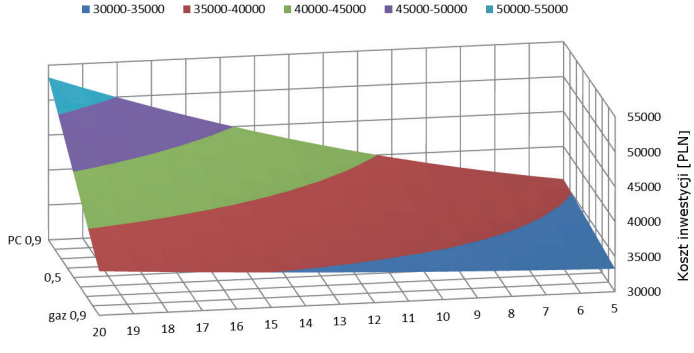
Z ryciny 10., prezentującej koszty inwestycyjne hybrydy pompa ciepła – węgiel, można wywnioskować, iż koszty pompy ciepła są o wiele wyższe niż kotła węglowego.

Jeśli weźmiemy pod uwagę hybrydę gaz – olej (ryc. 11.) – to decydująca dla zmiany ceny jest cena kotła gazowego. Czym większy budynek, tym bardziej opłacalne jest zwiększanie udziału kotła olejowego i zmniejszanie gazowego.

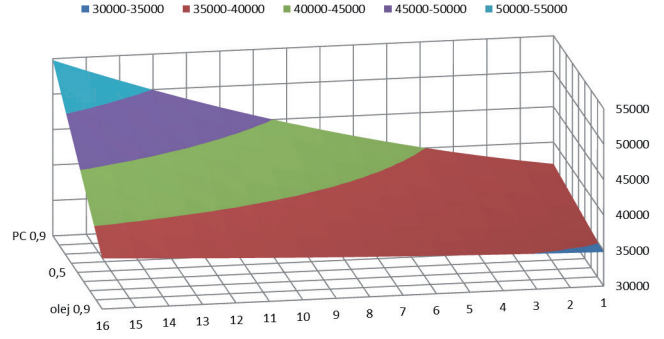
Przy zestawieniu gaz – PC (ryc. 12.), podobnie jak przy inwestycji węgiel – PC, decydujący jest koszt pompy. Wartości cen są tu wyższe, ponieważ kocioł gazowy jest droższy od węglowego.

W wariancie olej – PC (ryc. 13.) obserwujemy podobne poziomy cen i charakterystyki zmienności, co przy analizie hybrydy gaz – PC.

Ryc. 12. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych par hybryd gaz – PC w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



Ryc. 13. Zestawienie kosztów inwestycji dla poszczególnych par hybryd olej – PC w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



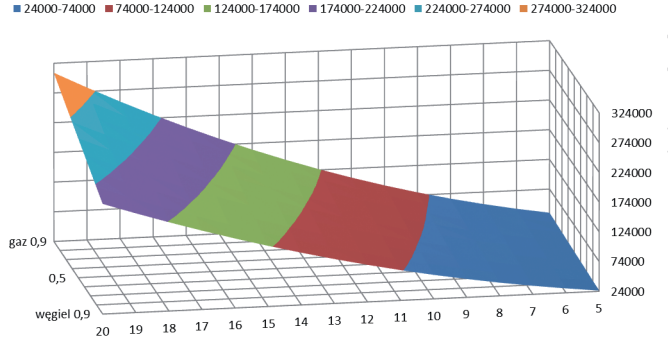
Łączne koszty inwestycji i eksploatacji dla źródeł hybrydowych

Na wykresach obliczono i przedstawiono łączne koszty inwestycji i eksploatacji przez 20 lat dla źródeł hybrydowych.

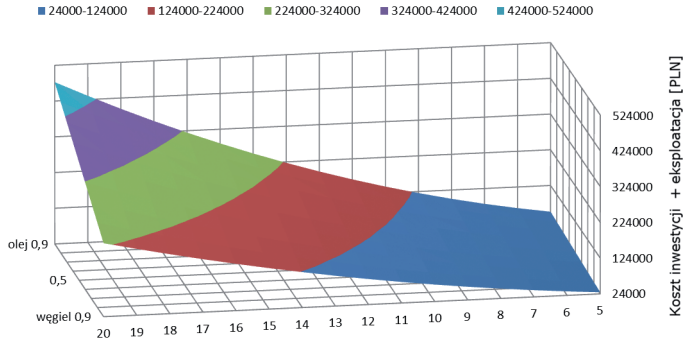
Analizując hybrydę węgiel – gaz (ryc. 14.) dowiedziono, że najtańsze jest źródło jedynie węglowe, przy czym zwiększanie kosztów w miarę wzrostu udziału gazu jest o wiele mniejsze dla małego budynku.

Charakterystyka kosztowa hybrydy węgiel – olej (ryc. 15.) jest podobna do przypadku gaz – węgiel, ale przy większych poziomach cen. Warto zauważyć, że różnica w kosztach względem hybrydy gaz-węgiel jest szczególnie widoczna w przypadku budynków dużych.

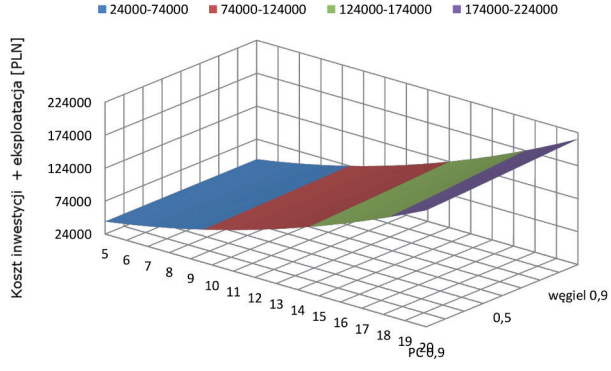
Ryc. 14. Zestawienie kosztów inwestycji + 20 letnia eksploatacja dla poszczególnych par hybryd węgiel – gaz w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



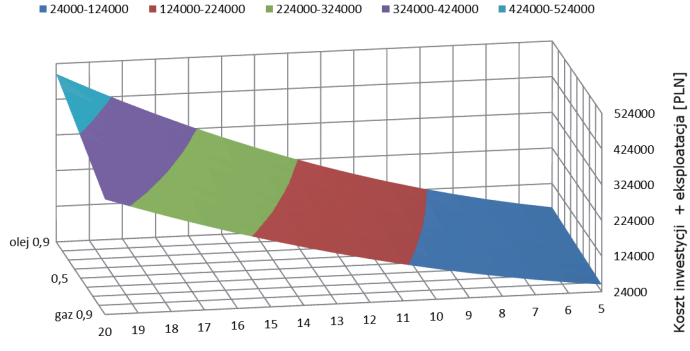
Ryc. 15. Zestawienie kosztów inwestycji + 20 letnia eksploatacja dla poszczególnych par hybryd węgiel – olej w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



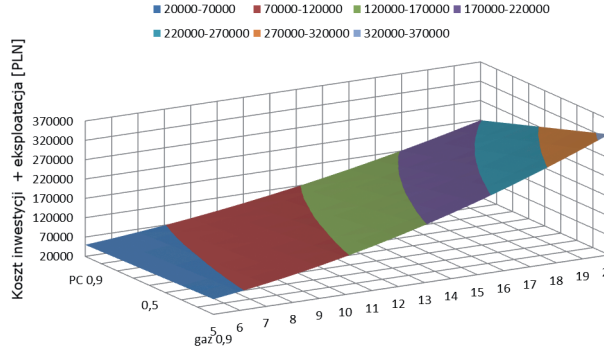
Ryc. 16 Zestawienie kosztów inwestycji + 20 letnia eksploatacja dla poszczególnych par hybryd węgiel – PC w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



Ryc. 17. Zestawienie kosztów inwestycji + 20 letnia eksploatacja dla poszczególnych par hybryd gaz – olej w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



Ryc. 18 Zestawienie kosztów inwestycji + 20 letnia eksploatacja dla poszczególnych par hybryd gaz – PC w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



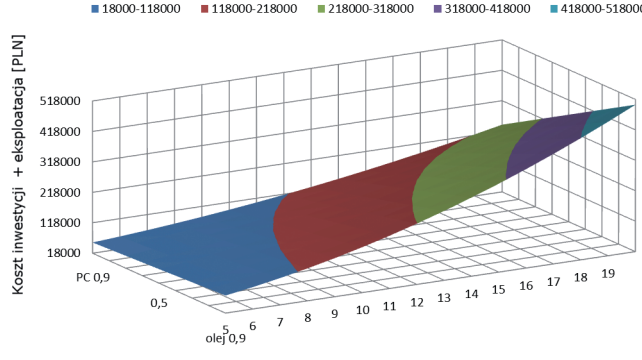
Na rycinie 16. widać zalety niskich kosztów eksploatacji pompy ciepła. Łączny koszt inwestycji i eksploatacji maleje wraz ze wzrostem udziału PC. Dzieje się tak pomimo znacznie większych kosztów inwestycyjnych pompy w stosunku do kotła węglowego. Nie uwzględniono tu ewentualnych napraw pompy ciepła, jednak z drugiej strony – nie uwzględniono także podwyżek cen węgla lub stosowania pompy sorpcyjnej, zasilanej gazem, a nie elektrycznością.

W przypadku wariantu gaz – olej (ryc. 17.) tańszą opcją jest gaz, wzrost kosztów przy zwiększaniu się udziału oleju jest mniejszy dla budynków większych.

Przy zestawieniu kosztów hybrydy gaz – PC (ryc. 18.) – charakter kosztów jest podobny do źródła PC – węgiel, ale bezwzględne oszczędności, wynikające z zastosowania pompy, są jeszcze większe.

Z ryciny 19. wynika, że oszczędności w eksploatacji dzięki zastosowaniu PC, są największe z powodu wysokich cen oleju opałowego.

Ryc. 19. Zestawienie kosztów inwestycji + 20 letnia eksploatacja dla poszczególnych par hybryd olej – PC w zależności od ich udziału procentowego i wymiaru budynku



Wnioski

Biorąc pod uwagę jedynie koszt inwestycji oraz eksploatacji, węgiel wydaje się najbardziej korzystnym źródłem energii. Jednak jeżeli weźmie się pod uwagę dążenia UE, zmierzające do obniżenia emisyjności spalin, to w przyszłości może się to zmienić. W 2015 r. Polska przyjęła wspólną politykę klimatyczną, w której zawarto szereg niekorzystnych dla polskiej gospodarki energetycznej zapisów, zmierzających do ograniczenia stosowania konwencjonalnych źródeł energii – szczególnie węgla.

Strategia ta stawia szereg wymagań i tym samym wymuszać może m.in. kosztowną modernizację kotłów węglowych (z zastosowaniem filtrów), pod groźbą kar, której kosztom wiele gospodarstw domowych może nie sprostać. Możliwe jest również ograniczenie dostępności do węgla – ograniczenie sprzedaży węgla jedynie do certyfikowanego lub wręcz zakaz sprzedaży węgla osobom indywidualnym przez składy opałowe. Wymienione problemy nieść mogą ze sobą wzrost cen surowca lub wręcz konieczność korzystania z alternatywnych paliw do kotłów (jak pelet), a tym samym – wzrost kosztów eksploatacji tradycyjnej instalacji grzewczej.

Z innymi problemami będą musieli się zmierzyć użytkownicy instalacji grzewczych korzystających z gazu ziemnego. Jest to surowiec wyjątkowo nieodporny na zawirowania polityczne (np. konflikt rosyjsko-ukraiński), z tego względu trudno prognozować, czy niezależnie od wysokości ceny, jaką gotów będzie zapłacić konsument, uzyska do niego dostęp.

Dlatego, wychodząc naprzeciw zmieniającym się realiom polityczno-ekonomicznym, warto rozważyć poniesienie wyższych kosztów inwestycji, aby zapewnić sobie stabilne źródło ogrzewania o przewidywalnych, niskich kosztach eksploatacji, jakie stanowi pompa ciepła.

Łączny koszt inwestycji i eksploatacji pompy ciepła po dwudziestu latach jest zbliżony do poziomu kosztów dla kotła węglowego. Zalety kosztowe pomp ciepła ujawniają się szczególnie w budynkach dużych.

Najdroższym z prezentowanych rozwiązań jest ogrzewanie olejem, trzeba jednak pamiętać, że na przykład w obszarach górskich ogrzewanie olejem jest często spotykane. Czas zwrotu względem kotła olejowego jest najkrótszy dla budynku o dużej kubaturze.

W ogólnym przypadku rozpatrywano możliwość ogrzewania domu nawet z zastosowaniem czterech źródeł jednocześnie, jednak ze względu na bardzo wysokie koszty inwestycji oraz aspekty praktyczne – jest to nieuzasadnione. Dlatego w referacie zaprezentowano charakterystyki kosztów inwestycji i eksploatacji dla hybryd wykorzystujących po dwa z rozpatrywanych źródeł ogrzewania.

Bibliografia

Anam R. 2007, *Zużycie energii: Polska przoduje w UE*, http://www.egospodarka.pl/art/galeria/26381,Zuzycie-energii-Polska-przoduje-w-UE,1,39,1.html, dostęp: 03.08.2016.

Archiwum pomiarów stacji meteorologicznej LAB-EL www.meteo.waw.pl .

BP Statistical Review of World Energy 2015, http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf, dostęp: 03.08.2016.

Co to jest system hybrydowy?, http://www.ulrich.com.pl/pl/poradnik-systemy_hybrydowe_zestawy-co_to_jest_system_hybrydowy-1012,1,47.html, dostęp: 03.08.2016.

Grabarek J., 2012, *Ogrzewania hybrydowe (1). Wygodne oszczędzanie*, http://www.instalator.pl/2012/12/ogrzewania-hybrydowe-1-wygodne-oszczedzanie/, dostęp: 03.08.2016.

Instytut Techniki Budowlanej, Praca nr 10/B/2011: *Analiza wymagań techniczno-budowlanych dotyczących ochrony cieplnej budynków, celem ustalenia minimalnych wymagań w zakresie charakterystyki energetycznej i przedstawienia propozycji zmian zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z 19 maja 2010 r w sprawie charakterystyki energetycznej budynków*.

Lis K. 2015, *Jak działają pompy ciepła?*, http://ogrzewanie.drewnozamiastbenzyny.pl/jak-dzialaja-pompy-ciepla/, dostęp: 03.08.2016.

Koczyk H. (red.), 2009, *Ogrzewnictwo praktyczne. Projektowanie, montaż, certyfikacja energetyczna, eksploatacja,* Poznań.

Laskowski P. 2016, *Koszty ogrzewania domu węglem, praktyczne wyliczenie*., http://muratordom.pl/instalacje/ogrzewanie-paliwami-stalymi/koszty-ogrzewania-domu-weglem-praktyczne-wyliczenie,28_7102.html, dostęp: 03.08.2016.

Lewandowski W. M., 2007, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Warszawa.

Olej opałowy, http://www.olej-opalowy.pl/index.php?symbol=olej_opalowy.htm, dostęp: 08.10.2015.

Paska I., Sałek M., Surma T., 2005, *Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w systemach hybrydowych*, „Wiadomości elektrotechniczne", Nr 12, s. 3-13.

PGNiG 2015, *Czym jest gaz ziemny?*, http://oferta.pgnig.pl/czym-jest-gaz-ziemny, dostęp: 03.08.2016.

PN-EN 12831:2006, *Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r. *w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytów, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego*.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. *w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej*.

Szargut J., 2016, *Termodynamika*, Warszawa.

Treter W. 2015, *Czyste ogrzewanie. Tanie i wygodne palenie węglem na miarę XXI wieku*, http://czysteogrzewanie.pl/czym-ogrzewac/wegiel-brunatny/, dostęp: 03.08.2016.

Costs analysis of investment and operation of hybrid energy sources for traditional building technology depending on the scale

ABSTRACT

The most commonly used source of energy for single-family dwellings are coal, gas and oil. Increasingly, investors are considering a heat pump installations. Each of these sources has different investment and operational costs. The idea of a hybrid source relies on the cooperation of several sources of energy in one building. The aim of the study is selection of the best hybrid sources from the three criteria: minimum investment cost, minimum operating costs for a predetermined period of time and minimum of total costs of investment and operation. Variable parameter is the size of the building defined as the length. The building is has the shape of a rectangular prism with a square base. It calculated heat demand of the building and then selected hybrid heat source. Heat demand is calculated using the simplified method of annual balance sheet and heat source selection is to calculate the cost for 286 shares of selected combinations of sources and selecting minimal cost. Conclusions has been derived about investment and operating costs of hybrid sources with different proportions of ingredients.

dr. inż. Mariusz Owczarek*, adiunkt w Katedrze Budownictwa, Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej, zajmuje się fizyką budowli i metodami komputerowymi w budownictwie.*

mgr inż. Weronika Radzikowska-Juś*, ukończyła Wydział Cybernetyki Wojskowej Akademii Technicznej w specjalności: Organizacja i Zarządzanie oraz Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej w specjalności: Budownictwo ogólne; obecnie jest doktorantką w Katedrze Budownictwa Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej; zajmuje się fizyką budowli, a przede wszystkim przepływami ciepła oraz efektywnością energetyczną w zakresie energii odnawialnych.*