

Poprawa parametrów energetycznych budynku jednorodzinnego – alternatywne sposoby zaopatrzenia w energię

An improvement of the energy parameters at the family building – an alternative way of energy supply

Alicja Ewa Urbanowicz, Natalia Mysiakowska*)

Słowa kluczowe: *odnawialne źródła energii, efektywność energetyczna, wskaźnik EP*

Streszczenie

W artykule przedstawiono różne sposoby modernizacji źródła energii ciepłej, które zaopatruje instalacje grzewcze w domu jednorodzinnym. Następnie szczegółowo omówiono wpływ poszczególnych zamierzeń modernizacyjnych na zmniejszenie zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną. Ponadto dla rozwiązań, spełniających kryterium energooszczędności energii pierwotnej, przeanalizowano ich efektywność ekonomiczną. Zamknięcie rozważań stanowił wybór najkorzystniejszego rozwiązania.

Keywords: *Renewable Energy Sources, Energy Effectiveness, EP index*

Abstract

The article presents various way of modernization of thermal energy source which supplies heating system in the family building. Next the impact of separate undertakings on reduced demand for non-renewable primary energy was discussed in details. Moreover in article was analyzed the economic effectiveness for the solutions meeting an energy efficiency criterion of primary energy. The consideration was ended in the selection of the best solution.

1. Wprowadzenie

Konsekwencją wdrożenia do Prawa budowlanego [17] dyrektyw unijnych, związanych z energooszczędnością budynków, były zmiany, jakie ustanowiono w Warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [22]. Polegały one na wprowadzeniu ograniczeń w zakresie zapotrzebowania na energię cieplną i elektryczną dla budynków. Oznacza to, że nowe zapisy zobowiązały inwestorów do konieczności podjęcia działań, doprowadzających do obniżenia zapotrzebowania na energię użytkową w budynkach. Modyfikacja przepisów wykonawczych, obowiązująca od 2014 r., narzuciła znaczące obostrzenia w stosunku do wskaźników energii końcowej i energii pierwotnej.

Spełnienie aktualnych wymagań odnośnie do wskaźnika EP wymaga dostosowania parametrów związanych z energooszczędnością.

Wskaźnik EP, wyrażany w kWh/(m²·rok), uzależniony jest od następujących czynników:

- rodzaju i jakości izolacji budynku oraz zastosowanych materiałów budowlanych,
- rodzaju wentylacji (naturalna, mechaniczna),
- lokalizacji budynku (strefa klimatyczna, położenie geograficzne),
- architektury budynku,
- rodzaju stosowanych źródeł energii,
- zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową.

Pierwsze cztery z wymienionych czynników decydują o zapotrzebowaniu na energię użytkową, związaną z ogrzewaniem (straty ciepła przez przegrody budowlane) i wentylacją budynku. Całkowite zapotrzebowanie na energię użytkową w budynku jed-

norodzinny jest sumą energii niezbędnych na potrzeby ogrzewania i wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. O zapotrzebowaniu na energię końcową przesądzają sprawności źródła ciepła oraz instalacji centralnego ogrzewania i ciepłej wody. Roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną zależy natomiast od rodzaju i ilości źródeł ciepła oraz od rodzaju nośników energii.

Do powszechnie stosowanych sposobów, pozwalających na zredukowanie wskaźnika zapotrzebowania na energię należą czynniki bezpośrednio wpływające na zmniejszenie [21]:

- a) rocznego zapotrzebowania na energię użytkową:
 - wskaźnik izolacyjności cieplnej przegród budowlanych oraz szczelność powietrzna budynku,
- b) rocznego zapotrzebowania na energię końcową:
 - sprawność źródła ciepła i instalacji ciepłno-wentylacyjnych,
- c) rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną:
 - współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie ciepła na ogrzewanie i przygotowanie ciepłej wody.

Przegląd wybranych aktów prawnych

Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. 1994 Nr 89, poz. 414 ze zmianami) wyznacza zasady działalności związanej z projektowaniem, budową, nadzorem, utrzymaniem i rozbiórka obiektów budowlanych oraz funkcjonowania organów administracji rządowej i samorządowej w tych dziedzinach [17].

*) Alicja Ewa Urbanowicz, dr inż. – (ORCID: 0000-0002-3020-8940) - Państwowa Uczelnia Zawodowa im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, Wydział Inżynierii i Ekonomii, Natalia Mysiakowska, inż. – Państwowa Uczelnia Zawodowa im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, Wydział Inżynierii i Ekonomii

Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz. U. z 1997 r. Nr 54 poz. 348 ze zm., tekst jedn. Dz. U. z 2019 r. poz. 750) dotyczy reguł kształtowania polityki energetycznej oraz zasad i warunków zaopatrzenia i uzyskiwania paliw i energii, a także zakresu działalności przedsiębiorstw energetycznych [18].

W ustawie z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2001 r. Nr 62 poz. 627 ze zm., tekst jedn. Dz. U. z 2019 r. poz. 1396 ze zm.) sformułowano zasady ochrony środowiska oraz warunki korzystania z jego zasobów z poszanowaniem wymagań zrównoważonego rozwoju [19].

Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. O odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2015 r. poz. 478 ze zm.) mówi o zasadach i warunkach wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, a także o mechanizmach i instrumentach wspierających tę działalność oraz działania związane z wytwarzaniem biogazu rolniczego i ciepła [20].

Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz. U. 2016 poz. 831 ze zm.) określa:

- zadania jednostek sektora publicznego w zakresie efektywności energetycznej,
- zasady realizacji obowiązku uzyskania oszczędności energii,
- zasady przeprowadzania audytu energetycznego przedsiębiorstwa.

Zmiany w Ustawie o efektywności energetycznej (Dz. U. 2021 poz. 868), wprowadzone w lipcu 2021 r. dotyczą zasad prowadzenia centralnego rejestru oszczędności energii finalnej oraz warunków funkcjonowania dostawcy usług dotyczących zużycia energii [21].

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t. j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1065 ze zm.) jest aktem wykonawczym, w którym ustalono m. in. wymagania w zakresie oszczędności energii i izolacyjności cieplnej przegród budynku [22].

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 to akt wykonawczy do ustawy o wspieraniu termomodernizacji i remontów [23].

Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynku (tekst jedn. Dz. U. z 2021 r. poz. 497) określa zasady sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej, kontroli systemu ogrzewania i systemów klimatyzacji w budynkach, prowadzenie centralnego rejestru charakterystyki energetycznej oraz sposób opracowania krajowego planu działań w zakresie zwiększenia liczby budynków o niskim wskaźniku zużycia energii [24].

Wyjaśnienie podstawowych pojęć

- **budynek mieszkalny jednorodzinny** – budynek wolnostojący, posiadający instalacje zapewniające odpowiednie i zgodne z przeznaczeniem użytkowanie obiektu przez domowników [17],
- **polityka energetyczna** – dział polityki, który zajmuje się określonymi kwestiami energetycznymi,
- **zrównoważony rozwój** – określony sposób działań społeczno-gospodarczych i politycznych, polegający na zaspokajaniu podstawowych potrzeb współczesnego pokolenia z zachowaniem równowagi przyrodniczej w taki sposób, aby przyszłe pokolenia mogły również zaspokoić swoje własne potrzeby [19],
- **odnawialne źródła energii** – źródła, których zasoby nie ulegają wyczerpaniu. Są to niekopalne źródła energii, które obejmują m. in. energię: promieniowania słonecznego, aerotermalną, geotermalną, hydrotermalną, fal, prądów i pływów morskich, a także energię otrzymywaną z biomasy, biogazu, itp. [20],
- **efektywność energetyczna** – iloraz uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji do ilości zużycia energii przez określony obiekt [18],

- **energia pierwotna EP** – energia zawarta w pierwotnych nośnikach energii, przy czym nieodnawialna energia pierwotna to energia zawarta w kopalnych surowcach energetycznych, natomiast odnawialna energia pierwotna to energia pozyskiwana z odnawialnego źródła energii [18, 23],
- **wskaźnik EP** – dla domu jednorodzinnego maksymalna wartość wskaźnika EP, wyrażana w kWh/(m²·rok), jest sumą cząstkowych wartości wskaźników wynikających z zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, przygotowywania ciepłej wody użytkowej oraz chłodzenia. W przypadku budynku jednorodzinnego wskaźnik ten nie uwzględnia cząstkowej wartości wskaźnika związanej z zapotrzebowaniem na energię nieodnawialną do oświetlenia. Cząstkowy wskaźnik na potrzeby chłodzenia jest uwzględniany wówczas, gdy w budynku występują pomieszczenia o regulowanej temperaturze chłodzenia [7, 23],
- **energia użytkowa EU** – w budynku mieszkalnym jednorodzinnym jest to energia efektywnie wykorzystywana na cele ogrzewania, wentylacji i chłodzenia pomieszczeń oraz przygotowywania ciepłej wody użytkowej. Energia użytkowa informuje o standardzie zastosowanych w budynku rozwiązań technicznych, związanych z zapotrzebowaniem na czynnik grzewczy i chłodniczy. Im korzystniejszy współczynnik zapotrzebowania ciepła przegród budowlanych tym mniejsze zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji, lepszy wskaźnik izolacyjności przegród i efektywniejszy system wentylacji oraz większa szczelność budynku [7, 23],
- **energia końcowa EK** – w przypadku budynku jednorodzinnego jest to energia dostarczana do budynku lub jej części do systemów grzewczych/chłodniczych. Energia ta uwzględnia nakłady energii niezbędne do pokrycia strat powstałych w instalacjach i urządzeniach oraz sprawność urządzeń energetycznych zastosowanych do jej wytwarzania [7, 23].

Charakterystyka budynku mieszkalnego i istniejącej instalacji grzewczej

Jest to budynek wolnostojący, jednorodzinny, parterowy z poddaszem użytkowym. Wybudowany został w 2014 roku. Oznacza to, że w chwili oddania go do eksploatacji spełniał wymagania, określone w Rozporządzeniu [22], obowiązujące dla roku 2014.

Parametry techniczne budynku [16]:

– miejscowość	Nasielsk
– współrzędne geograficzne	52°35'23"N 20°48'15"E
– wysokość nad poziomem morza	108 m n.p.m.
– usytuowanie budynku	elewacja frontowa – NW
– powierzchnia budynku o regulowanej temperaturze	$A_f=150 \text{ m}^2$
– powierzchnia przegród zewnętrznych budynku	$A \approx 375 \text{ m}^2$
– kubatura wentylowana budynku	$V_w=412,5 \text{ m}^3$
– kubatura ogrzewana budynku	$V_e \approx 449,5 \text{ m}^3$
– współczynnik kształtu budynku	$A_f/V_e=0,834$
– szczelność powietrzna (wentylacja naturalna)	$n_{50}=2,0 \text{ l/h}$
– nachylenie połaci dachowej	40°
– liczba mieszkańców	6 osób
– maksymalne zapotrzebowanie na moc cieplną do ogrzewania i wentylacji	8,0 kW
– maksymalne zapotrzebowanie na moc cieplną do przygotowania ciepłej wody	6,61 kW
– rodzaj wentylacji	naturalna (grawitacyjna)
– wskaźnik obciążenia cieplnego odniesiony do powierzchni budynku	53,3 W/m ²
– wskaźnik obciążenia cieplnego odniesiony do kubatury budynku	17,8 W/m ³

- źródłem ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania, wentylacji naturalnej i ciepłej wody użytkowej jest kocioł opalany gazem ziemnym odmiany E,
- sprawność obecnie eksploatowanego pierwotnego źródła ciepła i instalacji ogrzewczej: centralne ogrzewanie $\eta_{co}=92\%$, ciepła woda użytkowa $\eta_{cwu}=84\%$, istniejące źródło ciepła wyposażone jest w automatykę pogodową,
- sposób przygotowania c.w.u. – system zasobnikowy składający się z podgrzewacza pojemnościowego, pompy ładującej zasobnik oraz pompy cyrkulacyjnej,
- parametry instalacji grzewczej 65/50°C
- temperatura ciepłej wody użytkowej 55°C
- ogrzewanie grzejnikowe w pokojach i kuchni oraz ogrzewanie płaszczyznowe (podłogowe) w łazienkach i komunikacji.

Dane klimatyczne wynikające z lokalizacji budynku

- strefa klimatyczna (sezon zimowy) III
- średnie temperatury powietrza zewnętrznego z lat 1991÷2020 dla stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany: styczeń – 1,1°C, lipiec 20,2°C, roczna 9,3°C
- usłonecznienie (liczba godzin promieniowania słonecznego w ciągu roku) 1639,3 h
- temperatura obliczeniowa – 20°C

Porównanie wymagań termicznych dla budynku jednorodzinnego

W związku z koniecznością oszczędności energii budynek mieszkalny jednorodzinny i jego instalacje ogrzewcze, wentylacyjno-klimatyzacyjne i ciepłej wody użytkowej powinny być zaprojektowane i wykonane w sposób zapewniający spełnienie minimalnych wymagań w zakresie [2, 22]:

- wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP,
- izolacyjności cieplnej przegród oraz wyposażenia technicznego budynku.

Tablica 1 Porównanie wartości współczynników przenikania ciepła [22]

Table 1 Comparison of values of the overall heat transfer coefficients [22]

Rodzaj przegrody	Współczynnik przenikania ciepła U_{max} [W/(m ² ·K)]	
	od 1.01.2014 do 31.12.2016 r.	od 1.01.2021 r.
Ściana zewnętrzna – $t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,25	0,20
Podłoga na gruncie – $t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,30	0,30
Strop nad pomieszczeniem nieogrzewanym i strop pod poddaszem nieogrzewanym	0,20	0,15
Okna pionowe, drzwi balkonowe oraz powierzchnie przezroczyste, nieotwieralne	1,30	0,90
Okna połaciowe	1,5	1,1
Drzwi w przegrodach zewnętrznych	1,5	1,3

Maksymalną wartość wskaźnika EP wyznaczono z zależności [22]:

$$EP = \Delta EP_{H+W} + \Delta EP_C + \Delta EP_L, \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})] \quad (1)$$

gdzie:

ΔEP_{H+W} – cząstkowa wartość wskaźnika EP wynikająca z zapotrzebowania ciepła na ogrzewanie, wentylację oraz przygotowanie ciepłej wody użytkowej,

ΔEP_C – cząstkowa wartość wskaźnika EP związana z zapotrzebowaniem na chłód,

ΔEP_L – cząstkowa wartość wskaźnika EP na potrzeby oświetlenia.

W przypadku rozważanego budynku mieszkalnego jednorodzinnego wskaźnik EP jest równy:

$$EP = \Delta EP_{H+W}, \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})] \quad (2)$$

Tablica 2 Maksymalne wartości wskaźnika EP

Table 2 The maximum values of EP energy

Rodzaj budynku	Wartości wskaźnika EP na potrzeby ogrzewania, wentylacji i przygotowania c.w.u. [kWh/(m ² ·rok)], obowiązujące zgodnie z Warunkami Technicznymi [22]	
	w latach 2014 ÷ 2016 (stan istniejący)	od 2021 r.
Dom jednorodzinny	120	70

Maksymalne roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną EP według Rozporządzenia dla:

a) roku 2014 wynosi 18000 kWh,

b) roku 2021 wynosi 10500 kWh.

Zapotrzebowanie na energię cieplną i elektryczną dla budynku w 2014 r.

a) zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania ciepłej wody użytkowej [11, 16] wyznaczono na podstawie następujących danych

– jednostkowe zapotrzebowanie wody

na osobę w ciągu doby $\dot{q} = 35 \text{ dm}^3/(\text{d} \cdot \text{os})$

– liczba osób $n_p = 6 \text{ osób}$

– liczba godzin użytkowania zasobnika

w ciągu doby $\tau = 12 \text{ h}$

– średnie godzinowe zapotrzebowanie

na ciepłą wodę $\dot{V}_{cwu\text{śrh}} = 17,5 \text{ dm}^3/\text{h}$

– maksymalne godzinowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę

$$\dot{V}_{cwu\text{maxh}} = N_h \cdot \dot{V}_{cwu\text{śrh}} \quad (3)$$

– współczynnik nierównomierności godzinowej N_h :

$$N_h = 9,32 \cdot n_p^{-0,244} \quad (4)$$

stąd $\dot{V}_{cwu\text{maxh}} = 6,01 \cdot 17,5 \text{ dm}^3/\text{h} = 105,2 \text{ dm}^3/\text{h}$,

– maksymalne godzinowe zapotrzebowanie na moc cieplną niezbędną do przygotowania c.w.u.:

$$\dot{Q}_{c.w.u.}^{\text{maxh}} = 6,61 \text{ kW}$$

– wymagana pojemność podgrzewacza:

$$V_d = 1,2 \cdot V_{c.w.u.\text{śrd}} \quad [\text{dm}^3] \quad (5)$$

gdzie: 1,2 – współczynnik uwzględniający straty ciepła,

$V_{c.w.u.\text{śrd}}$ – średnia dobowa ilość wody dla mieszkańców, dm^3 , $V_{c.w.u.\text{śrd}} = 210 \text{ dm}^3/\text{d}$

stąd wymagana pojemność podgrzewacza $V_d = 252 \text{ dm}^3$

– przyjęto podgrzewacz o pojemności $V_{cwu} = 300 \text{ dm}^3$

– temperatura wody ciepłej $t_c = 55^\circ\text{C}$

– temperatura wody zimnej $t_z = 10^\circ\text{C}$

– $c_w = 4,189 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ – ciepło właściwe wody.

Zapotrzebowania na ciepło użytkowe do przygotowania c.w.u.

– średnie dobowe

$$\phi_{cwu\text{śrd}} = 11 \text{ kWh}/\text{d}$$

– średnie miesięczne

$$\phi_{cwu\text{śmc}} = 330 \text{ kWh}/\text{m-c}$$

– średnie roczne

$$\phi_{cwu\text{śroczne}} = 4015 \text{ kWh}/\text{rok}$$

b) roczne zapotrzebowanie na ciepło użytkowe na cele centralnego ogrzewania i wentylacji naturalnej

$$\phi_{co+went\text{śroczne}} = 10655 \text{ kWh}/\text{rok}$$

c) roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną

Aktualne roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną w budynku wynosi

$$\phi_{el} = 4450 \text{ kWh/rok}$$

Energia elektryczna w domu jednorodzinnym używana jest na następujące cele: zasilanie urządzeń AGD, zasilanie odbiorników radiowo-telewizyjnych, komputerów, oświetlenie, zasilanie urządzeń elektrycznych w kotłowni (np. pomp, sterownika kotła).

Roczne zapotrzebowanie na energię cieplną dla budynku

W tab. 3 zestawiono roczne zapotrzebowania na energię cieplną na poszczególne cele, natomiast w tab. 4 wartości jednostkowego zapotrzebowania na wyodrębnione energie i ich udział procentowy. Źródłem ciepła w budynku jest kocioł grzewczy o mocy 20 kW, jednofunkcyjny, opalany gazem ziemnym. Pojemność zasobnikowego podgrzewacza ciepłej wody wynosi 300 dm³. Do obliczenia energii pierwotnej przyjęto średni współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii końcowej dla gazu ziemnego $w_g = 1,1$ [25].

Tablica 3 Zestawienie rocznego zapotrzebowania na energię cieplną [23]

Table 3 Comparison of the annual heating demand [23]

Wyszczególnienie	EU	EK	EP
	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok
Centralne ogrzewanie i wentylacja	10655	11581,5	12739,7
Ciepła woda użytkowa	4015	4779,8	5257,8
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną	14670	16361,3	17997,5

Tablica 4 Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na określone energie i ich udział [25]

Table 4 The annual unit demand for definite energy and them participation [25]

Wyszczególnienie	Ogrzewanie + wentylacja	Ciepła woda	Suma
Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię użytkową			
Wartość [kWh/(m ² ·rok)]	71,03	26,77	97,80
Udział [%]	72,60	27,40	100,00
Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię końcową			
Wartość [kWh/(m ² ·rok)]	77,21	31,86	109,07
Udział [%]	70,80	29,20	100,00
Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię pierwotną			
Wartość [kWh/(m ² ·rok)]	84,93	35,05	119,98
Udział [%]	70,79	29,21	100,00

Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla budynku wynosi 119,98 kWh/(m²·rok), tak więc warunek ustalony w Warunkach Technicznych [23] obowiązujący dla lat 2014÷2016 był spełniony.

Roczne zapotrzebowanie na gaz ziemny

Niezbędną ilość opału (gazu ziemnego odmiany E) obliczono z zależności:

$$B_{a,co+cwu} = \frac{Q_{co,u}}{\eta_{co} \cdot H_i} + \frac{Q_{cwu,u}}{\eta_{cwu} \cdot H_i} \quad (6)$$

gdzie:

$Q_{co,u}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową na cele ogrzewania,

$Q_{cwu,u}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody,

H_i – wartość opałowa gazu ziemnego odmiany E, $H_i = 34,3 \text{ MJ/m}^3 = 9,53 \text{ kW/m}^3$,

η_{co} – średnia sprawność całkowita systemu grzewczego, $\eta_{co} = 0,92$,

η_{cwu} – średnia sprawność całkowita systemu ciepłej wody użytkowej, $\eta_{cwu} = 0,84$.

$$B_{a,co+cwu} \approx 1717,3 \text{ m}^3/\text{rok}$$

Wymagany stopień redukcji wskaźnika EP

Wymagany dla roku 2021 stopień redukcji zapotrzebowania na energię pierwotną w odniesieniu do roku 2014 wynosi:

$$\sim 41,7\%$$

co oznacza, że zapotrzebowanie na energię pierwotną należy zmniejszyć do 58,3%.

Modernizacja źródła ciepła, w tym zastosowanie odnawialnych źródeł energii – warianty rozwiązań

Jak wcześniej wspomniano budynek został oddany do eksploatacji około 7 lat temu [16].

Aktualnie nie spełnia obowiązujących wymagań odnośnie do wskaźnika EP. Do sposobów umożliwiających zmniejszenie wskaźnika EP zalicza się m. in. zwiększenie wskaźników izolacyjności cieplnej przegród budowlanych i szczelności powietrznej budynku oraz zastąpienie wentylacji naturalnej systemem wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej. Przedsięwzięcia te mogą okazać się bardzo kosztowe. Nie gwarantują również osiągnięcia założonego stopnia redukcji zapotrzebowania na EP. W konsekwencji zdecydowano o zmodernizowaniu istniejącego źródła energii cieplnej. Dodatkowo w rozwiązaniu zaproponowano wyposażenie budynku w instalację fotowoltaiczną.

- Wariant I** – założono zastąpienie istniejącego kotła grzewczego, opalanego gazem ziemnym, kotłem kondensacyjnym. Sterowanie pracą kotła realizowane będzie, podobnie jak do tej pory, za pomocą automatyki pogodowej z funkcją priorytetu ciepłej wody.
- Wariant II** – przyjęto, że źródłem ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody w sezonie zimowym będzie eksploatowany kocioł gazowy tradycyjny, wyposażony w automatykę pogodową j.w., natomiast w sezonie letnim źródłem ciepła na potrzeby ciepłej wody użytkowej będą słoneczne kolektory cieczowe. W obliczeniach założono, że ilość ciepła dostarczonego za pomocą systemu solarnego do przygotowania ciepłej wody użytkowej wynosi 50% rocznego zapotrzebowania na ten cel.
- Wariant III** – zaproponowano układ źródeł ciepła i ich cząstkowy udział w zaspokojeniu rocznego zapotrzebowania na czynnik grzejny jak powyżej. Różnica w źródłach ciepła polega na tym, że eksploatowany tradycyjny kocioł gazowy zostanie zastąpiony kotłem kondensacyjnym, nośnikiem ciepła będzie również gaz ziemny odmiany E.
- Wariant IV** – w rozwiązaniu założono współpracę istniejącego kotła jednofunkcyjnego ze sprężarkową pompą ciepła typu „powietrze-woda” w układzie „biwalentnym alternatywnym”. W obliczeniach przyjęto, że sprężarkowa pompa ciepła pracować będzie w sezonie letnim na potrzeby instalacji c.w.u., natomiast w sezonie zimowym dostarczać będzie 35% ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody. Pozostałe 65% ciepła w tym sezonie doprowadzane będzie z jednofunkcyjnego kotła gazowego. Ponadto zdecydowano, że źródłem energii elektrycznej dla pompy ciepła będą instalacja fotowoltaiczna i zewnętrzna sieć energetyczna.
- Wariant V** – w wariantcie tym przyjęto, że w sezonie letnim źródłem ciepła na potrzeby ciepłej wody użytkowej będzie instalacja słonecznych kolektorów cieczowych, natomiast w sezonie zimowym czynnik grzejny na potrzeby centralnego ogrzewania

i c.w.u. dostarczany będzie przez geotermalną pompę ciepła. Dolnym źródłem ciepła dla pompy ciepła będzie wymiennik gruntowy pionowy. Ponadto przyjęto, że niezbędna higienizacja zbiornika i instalacji ciepłej wody oraz ewentualny niedobór energii cieplnej pozyskiwany będzie za pomocą grzałki elektrycznej, zainstalowanej w podgrzewaczu ciepłej wody.

- f) **Wariant VI** – w rozwiązaniu tym założono całoroczną pracę geotermalnej pompy ciepła. Oznacza to, że pompa ciepła będzie jedynym źródłem czynnika grzewczego na potrzeby c.o. i ciepłej wody. Ewentualny niedobór energii cieplnej rozwiązany będzie analogicznie, jak w wariantcie V. Nadmieniamy, że eksploatowany pojemnościowy podgrzewacz ciepłej wody wyposażony jest w wymiennik ciepła (węzownicę) i grzałkę elektryczną o mocy 2,85 kW.

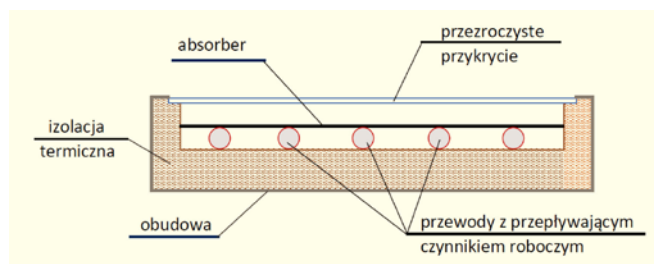
Modernizacja źródła energii elektrycznej [16]:

Zamierzenie to polegać będzie na wyposażeniu budynku w instalację fotowoltaiczną, która dostarczać będzie energię elektryczną na potrzeby oświetlenia, sprzętu i urządzeń elektrycznych oraz pompy ciepła. Należy podkreślić, że efektywna praca instalacji PV przypada na miesiące od kwietnia do września. W pozostałych miesiącach roku, z uwagi na warunki klimatyczne, udział tej energii będzie mniejszy. W związku z tym energia elektryczna na potrzeby budynku pobierana będzie z zewnętrznej sieci energetycznej.

Alternatywne źródła zaopatrzenia w ciepło i energię elektryczną

Kocioł kondensacyjny, opalany gazem ziemnym lub olejem opalowym lekkim, różni się od tradycyjnego kotła gazowego technologią wytwarzania ciepła [15]. Specjalna konstrukcja wymiennika ciepła oraz niska temperatura wody powracającej z instalacji grzewczej umożliwiają pozyskanie ciepła nie tylko w procesie spalania gazu, ale również w procesie kondensacji pary wodnej zawartej w odpływających z kotła spalinach. W procesie spalania paliwa gazowego lub oleju opałowego zjawisko kondensacji zachodzi wówczas, gdy maksymalne parametry czynnika grzejącego nie przekraczają 75/60°C. Sprawność wytwarzania ciepła w kotle kondensacyjnym, wyposażonym w automatykę pogodową z funkcją priorytetu ciepłej wody, kształtuje się na poziomie: $\eta_{co} = 0,97$, $\eta_{cww} = 0,88$ [7, 15].

Kolektor słoneczny cieczowy płaski [4, 5, 8, 9, 16] – jest to urządzenie stosowane do pozyskania energii cieplnej z energii promieniowania słonecznego. Wyróżnia się dwa rodzaje najczęściej stosowanych kolektorów słonecznych cieczowych: płaskie i próżniowe rurowe. Budowę kolektora słonecznego cieczowego płaskiego ilustruje rys. 1.



Rys. 1 Przekrój poprzeczny kolektora słonecznego cieczowego płaskiego
Fig. 1 The cross-section of a solar liquid thermal collector

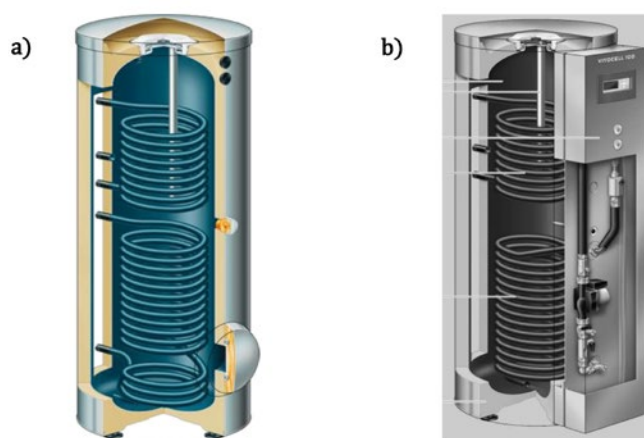
Zasadę działania cieczowego kolektora słonecznego płaskiego omówiono szczegółowo w publikacjach [1, 5, 7, 8, 9]. Dla przypomnienia konwersja energii promieniowania słonecznego na energię cieplną zachodzi w następujący sposób:

- promieniowanie słoneczne, docierające do kolektora przenika przez jego szklane pokrycie i pada na płaską powierzchnię absorbera,
- zaabsorbowana przez absorber energia promieniowania słonecznego zamieniana jest na energię termiczną.

Pozyskane w ten sposób ciepło odbierane jest przez czynnik roboczy przepływający w rurkach, przytwierdzonych od spodu do absorbera. Gdy czynnik roboczy osiągnie założoną temperaturę łączy się pompa cyrkulacyjna, która tłoczy gorące medium robocze do wymiennika ciepła zainstalowanego w pojemnościowym podgrzewaczu ciepłej wody. Oznacza to, że ciepło pozyskane przez czynnik roboczy w kolektorze przekazywane jest wodzie w podgrzewaczu.

O sprawności cieplnej kolektorów słonecznych decydują: budowa i fizyczne właściwości jego elementów konstrukcyjnych, w tym współczynnik transparentności szyby i rodzaj absorbera oraz różnica temperatur pomiędzy czynnikiem roboczym w kolektorze i otoczeniem, a także środowisko, w którym pracuje urządzenie.

Podgrzewacz pojemnościowy biwalentny [13, 16, 26] – jest to zamknięty, zaizolowany od zewnątrz zbiornik, wyposażony w dwa wymienniki ciepła, króćce przyłączeniowe i anodę ochronną (rys. 2). Jest urządzeniem stosowanym w instalacji ciepłej wody użytkowej, zasilanym w czynnik grzewczy z dwóch źródeł ciepła, np. z kolektorów słonecznych cieczowych i kotła grzewczego. Wymiennik zainstalowany w dolnej części podgrzewacza odbiera ciepło dopływające z kolektora. Do wymiennika znajdującego się w górnej części podgrzewacza czynnik grzejny dostarczany jest z kotła za pomocą pompy ładującej.



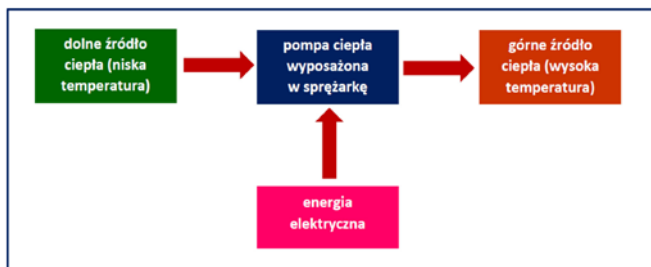
Rys. 2 Podgrzewacz pojemnościowy ciepłej wody użytkowej z dwoma wymiennikami ciepła: a) VITOCCELL 100-U, b) VITOCCELL 100-B z modułem regulatora systemów solarnych

Fig. 2 A storage water heater for domestic hot water with double heat exchangers [13, 26]: a) VITOCCELL 100-U, b) VITOCCELL 100-B with a module of the solar system regulator

Pompa ciepła [1, 6, 10, 13, 16]

W ostatnim ćwierćwieczu pompa ciepła stała się urządzeniem, które zyskuje coraz większe znaczenie i popularność, dzięki stosowaniu jej w instalacjach grzewczych i chłodniczych. Jest to urządzenie przyjazne dla środowiska. Podczas użytkowania nie emituje zanieczyszczeń do otoczenia. Jej niska energochłonność powoduje, że całkowity równoważnik efektu cieplarnianego, związany z dostarczeniem do pompy energii napędowej, jest niewielki w odniesieniu do innych systemów grzewczych. W literaturze technicznej pompa ciepła nazywana jest często transformatorem temperatury, gdyż jest ona pośrednikiem w przenoszeniu energii cieplnej z dolnego źródła ciepła do górnego za pomocą dostarczonej do sprężarki energii. Dzięki pompie ciepła można uzyskać energię cieplną niezbędną do ogrzewania mieszkań, przygotowania ciepłej wody użytkowej i na potrzeby niskotemperaturowej instalacji technologicznej.

Instalacja grzewcza wyposażona w sprężarkową pompę ciepła zbudowana jest z następujących elementów: umownego dolnego źródła ciepła dostarczającego ciepło, wspomnianej pompy ciepła oraz umownego górnego źródła ciepła, jako odbiornika wytworzonego ciepła. Schemat instalacji pokazano na rys. 3. Obieg termodynamiczny sprężarkowej pompy ciepła połączony jest z obiegami dolnego i górnego źródła ciepła za pomocą odpowiednio parownika i skraplacza.



Rys. 3 Schemat działania układu wyposażonego w pompę ciepła
Fig. 3 Scheme of working a heating system equipped with a heat pump

Budowa i zasada działania jednostopniowej sprężarkowej pompy ciepła

Sprężarkowa pompa ciepła należy do najpopularniejszych pomp ciepła. Stanowi ona zamknięty układ zbudowany z dwóch wymienników ciepła: parownika i skraplacza, sprężarki i zaworu rozprężnego oraz przewodów, umożliwiających przepływ czynnika roboczego pomiędzy tymi urządzeniami. Krążący wewnątrz układu czynnik roboczy jest poddawany przemianom termodynamicznym, zgodnie z obiegiem lewobieżnym Lindego.

Pompa ciepła może pobierać ciepło niskotemperaturowe z otoczenia w sposób:

- bezpośredni** (np. z powietrza atmosferycznego, które omywając parownik oddaje swoje ciepło czynnikowi krążącemu znajdującemu się w parowniku),
- pośredni** – roztwór glikolu, wypełniający instalację roboczą dolnego źródła ciepła, odbiera ciepło zakumulowane w ośrodku i przekazuje je w parowniku czynnikowi, krążącemu w obiegu pompy ciepła. W parowniku czynnik, krążący w obiegu zamkniętym pompy ciepła, w wyniku dostarczenia ciepła wrze i zmienia swój stan skupienia z ciekłego na gazowy. Następnie para przepływa do sprężarki, skąd po sprężeniu kierowana jest do skraplacza. W sprężarce następuje wzrost ciśnienia i temperatury par czynnika. W skraplaczu natomiast zachodzi skroplenie par czynnika roboczego w efekcie oddania ciepła czynnikowi zasilającemu górne źródło ciepła. Skroplony czynnik roboczy przepływa do zaworu rozprężnego, rozpręża się i przemieszcza do parownika. Cykl przemian termodynamicznych powtarza się.

Pozyskane przez górne źródło ciepło użyteczne jest sumą wykonanej pracy i energii cieplnej pobranej z dolnego źródła. Wielkością charakteryzującą sprężarkową pompę ciepła jest termodynamiczna efektywność obiegu, uwzględniająca straty spowodowane nieodwracalnością procesów tworzących dany obieg. W sprężarkowej pompie ciepła są to straty powstające w procesach sprężania i rozprężania.

Współczynnik efektywności energetycznej sprężarkowej pompy ciepła równy jest stosunkowi bezwzględnej wartości sumy energii pobranej z dolnego źródła ciepła i pracy wykonanej przez sprężarkę do tej pracy. Wartość tego współczynnika oblicza się z zależności:

$$COP = \frac{Q_{uż}}{W_{EEL}} \quad (7)$$

gdzie:

$$Q_{uż} = Q_{DZC} + W_{EEL} \quad (8)$$

Q_{DZC} – ciepło pobrane z dolnego źródła ciepła, [J]

W_{EEL} – praca wykonana przez sprężarkę, [J].

Wyróżnia się następujące sposoby eksploatacji pompy ciepła:

a) **eksploatacja dwusystemowa** nazywana jest pracą biwalentną urządzeń dostarczających czynnik grzewczy. Punkt włączenia drugiego źródła ciepła zależy od współczynnika wydajności pompy ciepła. W trybie biwalentnym instalacja pompy ciepła współpracuje z dodatkowym źródłem ciepła np. kotłem opalonym gazem ziemnym, czy z instalacją solarną. W układzie tym pompa pokrywa od 50% do 90% zapotrzebowania na moc cieplną obiektu,

b) **eksploatacja jednosystemowa** określana jest jako monowalentna, co oznacza, że pompa jest jedynym urządzeniem zastosowanym na cele ogrzewania i przygotowania ciepłej wody.

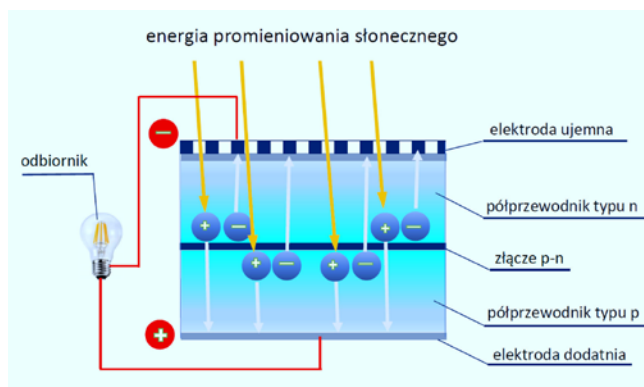
Zbiornik buforowy [13, 16] – zbiornik służący do magazynowania nadwyżek ciepłych skumulowanych w wodzie zasilającej instalację centralnego ogrzewania w budynku. Urządzenie to potrzebne jest wówczas, gdy instalacja wyposażona jest w tradycyjne grzejniki lub obiegi grzewcze o różnych temperaturach czynnika na zasileniu (np. grzejniki tradycyjne i instalacja podłogowa). Zakumulowana w zbiorniku buforowym woda kierowana jest do instalacji c.o. w zależności od chwilowych potrzeb grzewczych domu. Sterowanie parametrami ilościowymi i jakościowymi, pobieranej ze zbiornika wody, realizowane jest za pomocą zaworu mieszającego sprężonego z automatyką pompy ciepła.

Instalacja fotowoltaiczna [3, 5, 12, 16]

Połączona z siecią elektroenergetyczną instalacja fotowoltaiczna zbudowana jest z następujących elementów: zestawu modułów PV (ilość uzależniona od zapotrzebowania na energię), falownika (przekształtnika prądu stałego w prąd przemienny DC/AC), dwukierunkowego licznika energii oraz konstrukcji montażowej i sieci przewodów.

W przypadku magazynowania wytworzonej energii elektrycznej instalacja PV wyposażona jest w dodatkowe urządzenia. Należą do nich akumulator i sterownik (regulator ładowania). Inwestor produkujący energię elektryczną i sprzedający jej nadmiar do sieci nazywany jest prosumentem, natomiast instalacja fotowoltaiczna połączona z siecią energetyczną instalacją sieciową. Instalacja PV, która nie jest przyłączona do sieci, określana jest jako autonomiczna.

W ogniwie fotowoltaicznym następuje konwersja energii promieniowania słonecznego (bepośredniego i rozproszonego) w energię elektryczną prądu stałego. Pochłonięta przez ogniwo energia fotonów promieniowania elektromagnetycznego powoduje uwolnienie elektronów z powłoki walencyjnej materiału ogniwa i przemieszczanie się ich w sieci krystalicznej półprzewodnika. W wyniku ruchu ładunków elektrycznych następuje przepływ prądu. Schemat działania ogniwa przedstawia rys. 4.



Rys. 4 Schemat konwersji fotowoltaicznej w ogniwie krzemowym [3, 12]

Fig. 4 Diagram of photovoltaics conversion in a silicon cell [3, 12]

Ogniwo zbudowane jest z materiału półprzewodnikowego. Najczęściej stosowanym materiałem jest krzem. W zależności od technologii produkcji ogniwa krzemowe dzieli się na:

- ogniwa monokrystaliczne,
- ogniwa polikrystaliczne,
- ogniwa amorficzne.

Moduł fotowoltaiczny [3, 12] tworzą ogniwa. Na górnej powierzchni ogniwa przymocowana jest elektroda ujemna zbierająca, natomiast na dolnej elektroda dodatnia przenosząca. Na zewnętrznych powierzchniach ogniw, połączonych szeregowo-równolegle, znajduje się folia organiczna. Wierzchnia część modułu przykryta jest hartowaną szybą, natomiast tylna zewnętrzna powierzchnia zabezpieczona np. laminatem. Tak skonstruowany moduł obudowany jest aluminiową ramką.

Efektywność energetyczna zaproponowanych rozwiązań

Wariant I – wymiana kotła tradycyjnego na kocioł kondensacyjny. Zarówno w kocioł tradycyjny, jak i kondensacyjny opalane są gazem ziemnym.

W obliczeniach przyjęto sprawność wytwarzania ciepła w kotle kondensacyjnym: $\eta_{co} = 0,97$, $\eta_{cww} = 0,88$ [7, 15].

Tablica 5 Zestawienie rocznego zapotrzebowania na energię cieplną – wariant I [23]

Table 5 Comparison of the annual heating demand – the option I [23]

Wyszczególnienie	EU	EK	EP
	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok
Centralne ogrzewanie i wentylacja	10655,0	10984,5	12082,95
Ciepła woda użytkowa	4015,0	4562,5	5018,75
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną	14670,0	15547,0	17101,70

Obliczenie wskaźnika EP_{WI} dla wariantu I:

$$EP_{WI} = \frac{17101,7 \text{ kWh/rok}}{150 \text{ m}^2} = 114,01 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$$

$EP_{WI} > EP_{2021}$ – rozwiązanie nie może być zastosowane, gdyż nie spełnia wymagań odnośnie do wskaźnika EP. Zastąpienie istniejącego kotła kotłem kondensacyjnym pozwala zredukować zapotrzebowanie na energię pierwotną o blisko 5%.

Wariant II – 50% rocznego zapotrzebowania ciepła na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej dostarczane będzie z instalacji słonecznych kolektorów cieczowych. W sezonie zimowym czynnik grzewczy, na potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej, pozyskiwany będzie w istniejącym kotle jednofunkcyjnym, opalany gazem ziemnym.

Tablica 6 Zestawienie rocznego zapotrzebowania na energię cieplną – wariant II [23]

Table 6 Comparison of the annual heating demand – the option II [23]

Wyszczególnienie	EU	EK	EP
	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok
Centralne ogrzewanie i wentylacja	10655,0	11581,5	12739,7
Ciepła woda użytkowa	2007,5	2389,9	2628,9
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną	12262,5	13971,4	15368,6

Obliczenie wskaźnika EP_{WII} dla wariantu II:

$$EP_{WII} = \frac{15368,6 \text{ kWh/rok}}{150 \text{ m}^2} = 102,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$$

$EP_{WII} > EP_{2021}$ – rozwiązanie nie może być zastosowane, gdyż nie spełnia wymagań dla wskaźnika EP. Zastosowanie instalacji słonecznych kolektorów cieczowych redukuje zapotrzebowanie na energię pierwotną o około 14,6%.

Wariant III – dotyczy współpracy instalacji słonecznych kolektorów cieczowych z kotłem kondensacyjnym, opalany gazem ziemnym. Założono identyczne proporcje w zakresie pracy poszczególnych źródeł energii cieplnej jak w wariantie II.

Tablica 6 Zestawienie rocznego zapotrzebowania na energię cieplną – wariant III [23]

Table 6 Comparison of the annual heating demand – the option III [23]

Wyszczególnienie	EU	EK	EP
	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok
Centralne ogrzewanie i wentylacja	10655,0	10984,5	12083,0
Ciepła woda użytkowa	2007,5	2281,25	2509,4
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną	12262,5	13265,75	14592,4

Obliczenie wskaźnika EP_{WIII} dla wariantu III:

$$EP_{WIII} = \frac{14592,4 \text{ kWh/rok}}{150 \text{ m}^2} = 97,28 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$$

$EP_{WIII} > EP_{2021}$ – podobnie jak w wariantach I i II rozwiązanie nie może być zastosowane. Redukcja zapotrzebowania na energię pierwotną wynosi 18,9%.

Wariant IV – pozyskanie ciepła na potrzeby grzewcze budynku realizowane będzie przez kocioł jednofunkcyjny i sprężarkową pompę ciepła „powietrze-woda”, współpracujących ze sobą w układzie „biwalentnym alternatywnym”. Dla punktu biwalencji przyjęto temperaturę powietrza zewnętrznego – 5°C. Założony procentowy udział poszczególnych źródeł energii zamieszczono w tab. 8.

Tablica 7 Zestawienie rocznego zapotrzebowania na energię cieplną – wariant IV

Table 7 Comparison of the annual heating demand – the option IV

Wyszczególnienie	EU	EK	EP
	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok
Centralne ogrzewanie i wentylacja	6925,75	7528,0	8280,80
Ciepła woda użytkowa	1304,8	1553,3	1708,70
Całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną	8230,55	9081,4	9989,60

Obliczenie wskaźnika EP_{WIV} dla wariantu IV:

$$EP_{WIV} = \frac{9989,6 \text{ kWh/rok}}{150 \text{ m}^2} = 66,60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$$

$EP_{WIV} < EP_{2021}$ – rozwiązanie może być zastosowane, gdyż wskaźnik EP spełnia wymagania określone w obowiązujących przepisach. W układzie tym redukcja zapotrzebowania na energię pierwotną wynosi 44,5%.

Wariant V – ciepło na potrzeby grzewcze budynku dostarczane będzie przez instalację słonecznych kolektorów cieczowych (c.w.u. w sezonie letnim) oraz sprężarkową pompę ciepła „solanka-woda” (c.o. + c.w.u. w sezonie zimowym). Procentowy udział poszczególnych źródeł energii w zaspokojeniu potrzeb cieplnych budynku przedstawiono w tablicy 8. Zgodnie z załącznikiem nr 4 do Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 5 października 2017 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii [25] w przypadku energii słonecznej i geotermalnej współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla indywidualnego źródła ciepła i przyjętych nośników energii równy jest $w_{Pi} = 0,0$. W związku z tym wskaźnik EP_{WV} dla wariantu V:

$$EP_{WV} = 0,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$$

$EP_{WV} < EP_{2021}$ – rozwiązanie może być zastosowane, gdyż wskaźnik EP spełnia wymagania ustalone w obowiązujących przepisach. Redukcja zapotrzebowania na energię pierwotną, w odniesieniu do obecnie eksploatowanego źródła ciepła, wynosi 100%.

Wariant VI – geotermalna sprężarkowa pompa ciepła pracująca w trybie monowalentnym przez cały rok. Procentowy udział poszczególnych źródeł energii w zaspokojeniu potrzeb cieplnych budynku przedstawiono w tabelicy 8. Współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej dla indywidualnego źródła ciepła i przyjętych nośników energii wynosi $w_{p,i} = 0,0$, stąd wskaźnik EP_{WV} dla wariantu VI:

$$EP_{WVI} = 0,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$$

$EP_{WVI} < EP_{2021}$ – rozwiązanie może być zastosowane. Podobnie jak w wariantach IV i V wskaźnik EP spełnia obowiązujące wymagania. Redukcja zapotrzebowania na energię pierwotną, w odniesieniu do istniejącego źródła ciepła, równa jest 100%.

Tablica 8 Udział proponowanych źródeł energii w zaspokojeniu potrzeb cieplnych budynku

Table 8 Types of energy sources proposed to use and their part in Energy needs in building

Rodzaj źródeł energii	Cel zapotrzebowania na czynnik grzejny	
	Centralne ogrzewanie	Ciepła woda użytkowa
Okres pracy	Sezon zimowy	Cały rok
Wariant IV		
Energia promieniowania słonecznego – pompa ciepła „powietrze – woda”	35%	67,5%
Gaz ziemny	65%	32,5%
Wariant V		
Energia promieniowania słonecznego – słoneczne kolektory cieczerwowe		50%
Energia geotermalna – pompa ciepła „solanka-woda” – dolne źródło ciepła w postaci pionowych sond gruntowych	100%	50%
Wariant VI		
Energia geotermalna – pompa ciepła „solanka-woda” – dolne źródło stanowią pionowe sondy gruntowe	100%	100%

Dobór urządzeń

Podgrzewacz biwalentny Vitocell 100-U o pojemności 300 dm³

Obliczenie wymaganej mocy grzewczej podgrzewacza pojemnościowego przy założonych czasach podgrzewu $\tau_A = 2 \text{ h}$ oraz $\tau_A = 4 \text{ h}$ [11, 15, 16]:

$$\dot{Q}_A = \frac{c_w \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T}{\tau_A} \quad (9)$$

c_w – ciepło właściwe wody, $c_w = 0,001163 \text{ kWh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,

$\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ (gęstość wody),

V – pojemność dobraneo podgrzewacza do wody, $V = 300 \text{ dm}^3$,

ΔT – różnica temperatur, $\Delta T = 45 \text{ K}$

$\tau_A = 2 \text{ h}$, $\dot{Q}_{Akg} = 7,85 \text{ kW}$ – w sytuacji, gdy źródłem ciepła jest kocioł gazowy,

$\tau_A = 2 \div 4 \text{ h}$, $\dot{Q}_{Akg} = 7,85 \div 3,93 \text{ kW}$ – w sytuacji, gdy źródłem czynnika grzejnego będzie instalacja solarna lub pompa ciepła.

Podgrzewacz zasilany będzie w czynnik grzewczy dostarczany z następujących źródeł:

- pompy ciepła „powietrze-woda” i kotła opalanego gazem (wariant IV),
- cieczerwowych kolektorów słonecznych i geotermalnej sprężarkowej pompy ciepła (wariant V),
- z geotermalnej sprężarkowej pompy ciepła (wariant VI).

Instalacja solarna [7, 8, 9, 14, 16]

Do obliczeń przyjęto słoneczne kolektory cieczerwowe płaskie HEVALEX typu KS2...F TLP AC. Dane kolektorów ustalono na podstawie karty informacyjnej producenta urządzeń [27].

Powierzchnię słonecznych kolektorów cieczerwowych określa zależność:

$$A_{p,kol} = \frac{\Phi_a}{H_{r,miasto} \cdot \eta} \quad (10)$$

gdzie:

$A_{p,kol}$ – powierzchnia absorbera, [m²],

Φ_a – przewidywane roczne zapotrzebowanie na energię cieplną, [kWh/a],

$H_{r,miasto} (I_{s,miasto})$ – roczny uzysk energii promieniowania słonecznego dla reprezentatywnej stacji meteorologicznej danej miejscowości, [kWh/a], przyjęto $I_{s,Warszawa} = 955,7 \text{ kWh/a}$,

η – sprawność kolektora, jest to stosunek strumienia energii użytecznej do strumienia energii promieniowania.

Sprawność słonecznego kolektora cieczerwego η [-] można obliczyć z równania:

$$\eta = \tau\alpha - \frac{k_1 \cdot (T_{abs} - T_o)}{I_s} - \frac{k_2 \cdot (T_{abs} - T_o)^2}{I_s} \quad (11)$$

$\tau\alpha$ – sprawność optyczna kolektora, [-], dla kolektora firmy HEVALEX typu KS2...F TLP AC sprawność optyczna $\tau\alpha = 0,753$,

T_{abs} – temperatura absorbera, [K], $T_{abs} = 323,0 \text{ K}$

T_o – temperatura otoczenia, [K], $T_o = 293,0 \text{ K}$

k_1 – współczynnik liniowych strat ciepła, [W/(m²·K)], $k_1 = 3,168 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,

k_2 – współczynnik nieliniowych strat ciepła, [W/(m²·K)], $k_2 = 0,012 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,

I_s – wartość natężenia promieniowania słonecznego (strumień energii doprowadzonej), [W/m²], do obliczeń przyjęto $I_s = 950 \text{ W}/\text{m}^2$.

Obliczeniowa sprawność słonecznego kolektora cieczerwego HEVALEX typu KS2...F TLP AC wynosi $\eta = 0,653$, całkowita powierzchnia kolektorów $A_{p,kol} = 6,43 \text{ m}^2$, niezbędna ilość kolektorów dla powierzchni absorbera pojedynczego kolektora $A_{pl,kol} = 2,36 \text{ m}^2$ wynosi $n = 3$ szt. Przyjęto kolektory typu KS2600F TLP AC.

Tablica 9 Parametry słonecznego kolektora cieczerwego [29]

Table 9 Parameters of solar water collector [29]

L. p.	Parametry	Jednostka	Wartość
1	Powierzchnia brutto kolektora	m ²	2,62
2	Powierzchnia absorbera	m ²	2,36
3	Sprawność optyczna kolektora	%	75,3
4	Współczynnik liniowych strat ciepła k_1	W/(m ² ·K)	3,168
5	Współczynnik nieliniowych strat ciepła k_2	W/(m ² ·K)	0,012
6	Długość	mm	2022
7	Szerokość	mm	1295
8	Wysokość	mm	90
9	Zawartość płynu	dm ³	1,1
10	Nr certyfikatu Solar Keymark		011-7S2822 F

Kolektory połączone będą szeregowo. Połączenie to umożliwi przepływ czynnika roboczego z jednego kolektora do kolejnego. W wariantcie V instalacja kolektorów słonecznych dostarczać będzie czynnik grzewczy, niezbędny do przygotowania ciepłej wody użyt-

kowej w sezonie wiosenno-letnim. Kolektory zainstalowane będą na dachu nachylnym pod kątem 40°C do poziomu i zorientowane powierzchnią roboczą na południowy-wschód.

Pompa ciepła „powietrze-woda” [7, 8, 9, 10, 13]

Wymagana moc cieplna pompy ciepła:

- | | |
|-------------------------|---------|
| a) ciepła woda użytkowa | 7,85 kW |
| b) centralne ogrzewanie | 3,0 kW |
- Pozostałe parametry:
- maksymalne zapotrzebowanie godzinowe na czynnik grzewczy $\dot{Q}_{max(c.o.+c.w.u.)} = 10,85 \text{ kW}$
 - współczynnik wydajności grzewczej pompy ciepła $SPF = 4,75$
 - sprawność instalacji c.w.u. $\eta_{inst.c.w.u.} = 0,74$
 - sprawność sytemu wytwarzania ciepła na potrzeby c.w.u. wskaźnik $SPF = 3,52$
 - udział energii elektrycznej w wytwarzaniu ciepła 28,4%
 - udział energii z otoczenia 71,6%
 - obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną 10,85 kW
 - funkcja tylko grzanie

Przyjęto kompaktową pompę ciepła „powietrze-woda” Vitocal 222-s o mocy 12,6 kW. Składa się ona z jednostki zewnętrznej i wewnętrznej. Moduł zewnętrzny wyposażony jest w parownik, sprężarkę, zawór rozprężny i wentylator. W skład modułu wewnętrznego wchodzi pompa obiegu grzewczego, wymiennik ciepła (skraplacz), zawór 3-drogowy, armatura zabezpieczająca i regulator. Przepływowy podgrzewacz wody grzewczej o pojemności 170 dm³ jest standardowo wbudowany w obudowę jednostki wewnętrznej.

Pompa ciepła „solanka-woda” (geotermalna pompa ciepła) [7, 8, 9, 10, 13, 14, 16]

W wariantcie V założono, że instalacja słonecznych kolektorów cieczowych współpracować będzie z pompą ciepła „solanka-woda”. Praca układu w wariantcie V polegać będzie na przygotowaniu czynnika grzewczego na potrzeby instalacji ciepłej wody użytkowej w sezonie letnim (kwiecień – wrzesień) przez słoneczne kolektory cieczowe. W sezonie zimowym czynnik grzewczy na potrzeby instalacji centralnego ogrzewania i c.w.u. dostarczany będzie przez pompę ciepła „solanka-woda”. W okresie tym kolektory słoneczne również będą miały swój niewielki udział w pozyskaniu energii cieplnej. Ponadto podgrzewacz pojemnościowy c.w.u. wyposażony będzie w grzałkę elektryczną o mocy 2,85 kW.

Natomiast w wariantcie VI przyjęto, że geotermalna pompa ciepła stanowić będzie praktycznie jedyne źródło energii cieplnej dla budynku.

Wymagana moc cieplna pompy ciepła – wariant V i VI:

- | | |
|-------------------------|---------|
| a) ciepła woda użytkowa | 3,93 kW |
| b) centralne ogrzewanie | 8,0 kW |
- c) maksymalne zapotrzebowanie godzinowe na czynnik grzewczy $\dot{Q}_{max(c.o.+c.w.u.)} = 11,93 \text{ kW}$
- Dane przyjęte do doboru pompy ciepła
- współczynnik wydajności grzewczej pompy ciepła $SPF = 4,6$
 - sprawność instalacji c.w.u. $\eta_{inst.c.w.u.} = 0,74$
 - sprawność instalacji c.o. $\eta_{inst.c.o.} = 0,90$
 - sprawność sytemu wytwarzania ciepła na potrzeby c.w.u. wskaźnik $SPF = 3,9$
 - udział energii elektrycznej w wytwarzaniu ciepła 25,0%
 - udział energii z otoczenia 75,0%
 - obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną 11,93 kW
 - funkcja pompy ciepła tylko grzanie

Przyjęto pompę ciepła „solanka-woda” Vitocal 350-G o mocy 13,7 kW

Pionowe sondy gruntowe [10]

Moc cieplna pobierana z gruntu: $\dot{Q}_o = 9,0 \text{ kW}$

Do wyznaczenia wymaganej długości pojedynczej sondy przyjęto następujący układ warstw w podłożu gruntowym:

- do głębokości 24,00 m p.p.t. zalega warstwa żwirowo-piaskowa o wskaźniku $\dot{q}_z = 19 \text{ W/m}$,
- w przelocie 24,00÷54,00 m p.p.t. znajduje się warstwa gliny wilgotnej $\dot{q}_{gw} = 40 \text{ W/m}$,
- poniżej wilgotnych glin do głębokości 70,00 m p.p.t. występuje warstwa wodonośna $\dot{q}_{ww} = 55 \text{ W/m}$,
- poniżej warstwy wodonośnej zalega lita skała $\dot{q}_{ls} = 77 \text{ W/m}$.

Minimalna długość sondy w litej skale wynosi 30 m. Moc cieplna pobierana z gruntu przez jedną sondę typu „U” wynosi $\dot{Q}_{ls} = 4846 \text{ W}$. Przyjęto dwa pionowe wymienniki gruntowe, każdy o długości 100 m.

Wymagana liczba zwojów rur z PE: $n = 5$ szt. Dodatkowe wyposażenie instalacji stanowić będą naczynie wzbiorcze Reflex, zawór bezpieczeństwa, pompa, rozdzielacze, armatura regulacyjna i urządzenia pomiarowe.

Zbiornik buforowy [10, 13]

Pojemność zbiornika buforowego zależy od mocy pompy ciepła, tzn. na 1 kW mocy grzewczej pompy ciepła przyjmuje się zapotrzebowanie od 20 do 30 litrów wody. Przyjęto zbiornik buforowy o pojemności 250 dm³.

Zapotrzebowanie na energię elektryczną przez grzałkę, która uruchamiana będzie na potrzeby higienizacji wody (zabieg realizowany raz na dwa tygodnie) oraz w przypadku niewystarczającej ilości ciepła dostarczonego przez pompę ciepła:

$$\phi_{el,grzałka} = 1225 \text{ kWh/rok}$$

Instalacja fotowoltaiczna [3, 12]

Przewidywana ilość godzin pracy instalacji fotowoltaicznej:

- okres kwiecień-wrzesień: $12 \text{ h} \times 30 \times 6 = 2160 \text{ h}$
- okres październik-marzec: $8 \text{ h} \times 30 \times 6 = 1440 \text{ h}$

Łączny czas pracy modułów fotowoltaiczne w ciągu roku wynosi 3600 h.

Dla minielektrowni o mocy do 10 kW przyjmuje się 1,25 kWp mocy instalacji fotowoltaicznej na każde zużyte 1000 kWh energii w ciągu roku, stąd wymagana moc instalacji równa jest 5,5625 kWp. Niezbędna ilość modułów fotowoltaicznych przy rocznym zużyciu energii elektrycznej $Q_{c} = 4450 \text{ kWh}$:

$$n = \frac{5,5625 \text{ kWp}}{0,455 \text{ kWp}} = 12,22 \approx 13 \text{ sztuk}$$

Tablica 10 Podstawowe parametry pojedynczego modułu fotowoltaicznego [28]
Table 10 Basic parameters of single photovoltaic module [28]

L. p.	Opis pozycji	Jednostka	Wartość
1	Moduł – JA Solar 455 W JAM72S20-450 MR	-	-
2	Nominalna moc modułu	Wp	455
3	Typ ogniwa – monokrystaliczne	-	-
4	Liczba ogniwa w module	szt.	144
5	Sprawność modułu	%	20,18
6	Wymiary: długość szerokość wysokość	mm mm mm	2120 1052 35
7	Waga	kg	25

Powierzchnia pojedynczego modułu fotowoltaicznego

$$F_1 = 2,120 \text{ m} \cdot 1,052 \text{ m} = 2,23 \text{ m}^2,$$

pole powierzchni 13 modułów

$$F_{13} = 2,23 \text{ m}^2 \cdot 13 = 29,00 \text{ m}^2.$$

Moduły ustawione zostaną na konstrukcji montażowej na trawniku w sąsiedztwie budynku, powierzchnia aktywna skierowana będzie na południowy-wschód, kąt nachylenia 40°.

Zainstalowanie pompy ciepła spowoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Moc elektryczna sprężarki w wariancie IV wynosi $Q_{elWIV} = 3,58 \text{ kW}$, natomiast w wariantach V i VI – $Q_{elWV} = 3,45 \text{ kW}$.

Zapotrzebowanie na energię elektryczną przez pompę ciepła będzie wynosić:

- a) wariant IV $Q_{elgr.p.cWIV} = 2275 \text{ kWh}$
- b) wariant V $Q_{elgr.p.cWV} = 3430 \text{ kWh}$
- c) wariant VI $Q_{elgr.p.cWVI} = 4030 \text{ kWh}$

Całkowite roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną po modernizacji źródeł energii cieplnej i elektrycznej w budynku oraz zainstalowaniu pompy ciepła zestawiono w tab. 11.

Tablica 11 Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną po modernizacji źródeł energii

Table 11 An annual demand for electric energy after modernization of energy source

Wyszczególnienie	Wariant IV	Wariant V	Wariant VI
	kWh	kWh	kWh
Instalacja w budynku	4450	4450	4450
Pompa ciepła	2275	3430	4030
Dodatkowe urządzenia	120	120	120
Grzałka elektryczna	-	1225	1225
Razem [kWh]	6845	9225	9825

Tablica 12 Zestawienie produkcji energii elektrycznej i powierzchni instalacji fotowoltaicznej

Table 12 Comparison of electricity production and the photovoltaic system area

Numer wariantu	ϕ_{el}^*	$\phi_{el,mod}^{**}$	Wymagana moc instalacji	Niezbędna ilość modułów	Powierzchnia
	kWh	kWh	kWp	szt.	m ²
IV	6845	2395	8,55	19	42,37
V	9225	4775	11,53	26	57,98
VI	9825	5375	12,28	27	60,21

* ϕ_{el} – łączne roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną

** $\phi_{el,mod}$ – roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną wynikające z modernizacji

Zapotrzebowania na gaz ziemny

a) wariant IV

Niezbędna ilość opału (gazu ziemnego odmiany E):

$$B_{(a,co+cwu)IV\text{wariant}} = 952,9 \text{ m}^3/\text{rok}$$

Oszczędność opału, wynikająca z zastosowania wariantu IV, wynosi:

$$\Delta B_{(a,co+cwu)IV\text{wariant}} = 764,4 \text{ m}^3/\text{rok}$$

b) warianty V i VI

Kocioł gazowy zostanie wyłączony z eksploatacji, stąd oszczędność paliwa gazowego, będąca konsekwencją zastosowania wariantu V, kształtuje się na poziomie:

$$\Delta B_{(a,co+cwu)IV\text{wariant}} = 1717,3 \text{ m}^3/\text{rok}$$

Analiza ekonomiczna zaakceptowanego rozwiązania

Zestawienie kosztów związanych z opłatami za gaz ziemny i pobraną energię elektryczną

Obliczenia przeprowadzono w oparciu o ceny jednostkowe ważne dla stycznia 2021 r.

a) gaz ziemny

Przyjęta do obliczeń cena 1 m³ gazu wg taryfy W-3 (gospodarstwa domowe wykorzystujące gaz ziemny do ogrzewania pomieszczeń) wynosiła 1,30 PLN. Do ceny związanej z poborem gazu ziemnego doliczono opłaty dystrybucyjną stałą i zmienną oraz abonamentową, stąd przyjęto do obliczeń cenę za 1 m³ gazu 2,0 PLN.

Łączne roczne koszty zużycia gazu ziemnego wynoszą:

– dla stanu przed modernizacją:

$$K_{c.o.+c.w.u.} = 1717,3 \frac{\text{m}^3}{\text{rok}} \cdot 2 \frac{\text{PLN}}{\text{m}^3} = 3434,6 \text{ PLN}$$

– dla stanu po modernizacji – wariant IV

$$K_{c.o.+c.w.u.} = 952,9 \frac{\text{m}^3}{\text{rok}} \cdot 2 \frac{\text{PLN}}{\text{m}^3} = 1905,8 \text{ PLN}$$

Oszczędność kosztów związanych z poborem gazu:

– dla stanu po modernizacji – wariant IV

$$K_{c.o.+c.w.u.} = 1528,8 \text{ PLN}$$

– dla stanu po modernizacji – warianty V i VI

$$K_{c.o.+c.w.u.} = 3434,6 \text{ PLN}$$

b) energia elektryczna

Łączne roczne koszty zużycia energii elektrycznej, przy założeniu średniej jednostkowej opłaty na poziomie $0,95 \frac{\text{PLN}}{\text{kWh}}$ – grupa taryfowa G11 (stan przed modernizacją):

$$K_{eel} = 4450 \text{ kWh} \cdot 0,95 \frac{\text{PLN}}{\text{m}^3} = 4227,5 \text{ PLN}$$

Tablica 13 Szacunkowe koszty zużycia energii elektrycznej dla poszczególnych wariantów

Table 13 The assessment costs of electricity consumption for separate variants

Numer wariantu	K_{elcalc}^*	$\phi_{el,mod}^{**}$	K_{elmod}^{***}
	PLN/rok	kWh	PLN/rok
IV	6502,75	2395	2275,25
V	8763,50	4775	4536,25
VI	9333,75	5375	5106,25

* K_{elcalc} – całkowite roczne koszty zużycia energii elektrycznej – modernizacja wyłącznie źródeł energii cieplnej (brak instalacji fotowoltaicznej)

** $\phi_{el,mod}$ – roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną wynikające z modernizacji źródeł energii cieplnej

K_{elmod}^{***} – szacunkowe całkowite koszty zużycia energii elektrycznej związane z rocznymi kosztami eksploatacyjnymi odnawialnych źródeł energii (pompy ciepła)

Zestawienie orientacyjnych kosztów modernizacji źródła ciepła

a) wariant IV

Tablica 14 Orientacyjne koszty instalacji wyposażonej w pompę ciepła „powietrze-woda”

Table 14 The approximate costs of heating system equipped with heat pipe „air-water”

L. p.	Wyszczególnienie	Koszty
		PLN
1	Kompaktowa pompa ciepła „powietrze-woda” typu „split”	33810
2	Zbiornik buforowy V = 250 dm ³	2000
3	Pompa obiegowa, armatura, przewody, materiały dodatkowe, montaż instalacji i urządzeń	5790
	Razem	41600

b) warianty V i VI

Tablica 15 Orientacyjne koszty instalacji wyposażonej w geotermalną pompę ciepła

Table 15 The approximate costs of heating system equipped with geothermal heat pipe

L. p.	Wyszczególnienie	Koszty
		PLN
1	Geotermalna pompa ciepła	33500
2	Sondy gruntowe – wykonanie odwiertów i montaż rur	22800
3	Zbiornik buforowy, naczynie zbiorcze, armatura zabezpieczająca i odcinająca, pompa obiegowa, materiały dodatkowe, materiały dodatkowe, prace montażowe	19590
	Razem	75890

Tablica 16 Orientacyjne koszty instalacji słonecznych kolektorów cieczowych płaskich

Table 16 The approximate costs of flat solar collectors system

L. p.	Wyszczególnienie	Koszty
		PLN
1	Kolektor płaski cieczowy 3 szt.	6880
2	Zestaw przyłączeniowy kolektora + śrubunki	1000
3	Zestaw do mocowania kolektorów na dachu pokrytym dachówką	3000
4	Podgrzewacz pojemnościowy z dwoma węzownicami i grzałką elektryczną	6000
5	Naczynie zbiorcze, armatura odcinająca i zabezpieczająca + przewody	900
6	Płyn do napełniania instalacji – mieszanina wody i glikolu, 3 pojemniki	300
7	Stacja regulacyjna pracy instalacji słonecznej zintegrowana z pompą i regulatorem	2590
8	Montaż urządzeń i instalacji	6200
	Razem	26870

Tablica 17 Orientacyjne koszty instalacji fotowoltaicznej

Table 17 The approximate costs of photovoltaic system

L. p.	Wyszczególnienie	Koszt [PLN]			
		Budynek	W IV	W V	W VI
1	Moduły fotowoltaiczne – 13÷27 szt.	10270	15010	20540	21330
2	Konstrukcja montażowa – elementy typu stojak do PV + kable DC i AC + komponenty	5000	6000	6500	6500
3	Falownik	2100	2100	2100	2100
4	Koszty dodatkowe	6515	9510	10480	11230
5	Montaż instalacji + dokumentacja techniczna	5000	5500	8000	8000
	Razem	28785	38020	47520	49060

Prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych dla budynku (zapotrzebowanie na energię elektryczną przez mieszkańców budynku) wyznaczono z zależności:

$$SPBP_{PVWbudynek} = \frac{28785 \text{ PLN}}{4227,5 \text{ PLN/rok}} = 6,8 \text{ lat}$$

Tablica 18 Koszty usprawnień oraz prosty okres zwrotu przedsięwzięcia modernizacyjnego w poszczególnych wariantach

Table 18 The costs of improvements and Simple Payback Time of a modernization undertaking in separate variants

L. p.	Opis zamierzenia modernizacyjnego	Koszt instalacji źródła ciepła	Koszt instalacji PV** – udział %	Prosty okres zwrotu nakładów SPBP [lata] w odniesieniu do		
		PLN	PLN	gazu ziemnego	energii elektrycznej*	Σ(gaz+eel)
1	2	3	4	5	6	7
1	Wariant IV – pompa ciepła „powietrze-woda”	41600	13307,0	27,2	5,85	14,4
2	Wariant V – geotermalna pompa ciepła	75890	24501,5	25,9	5,4	13,7
3	Wariant V – słoneczne kolektory cieczowe	26870	114,0	53,6	4,4	44,7
4	Wariant V – geotermalna pompa ciepła + słoneczne kolektory cieczowe	102760	24615,5	29,9	5,4	16,0
5	Wariant VI – geotermalna pompa ciepła	75890	26840	22,1	5,25	12,0

energia elektryczna* – dotyczy zużycia energii elektrycznej pozyskanej z instalacji fotowoltaicznej w odniesieniu do jednostkowej ceny rynkowej energii elektrycznej

koszt instalacji PV** – dotyczy procentowego udziału kosztów instalacji PV związanych z danym zamierzeniem inwestycyjnym w całkowitych kosztach wykonania tej instalacji

Analizę ekonomiczną, związaną z wyborem optymalnego źródła ciepła, przeprowadzono w oparciu o jeden z zalecanych do stosowania przez UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) wskaźników efektywności ekonomicznej tzn. prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych SPBP (Simple Payback Period). Jest on ilorazem nakładów inwestycyjnych do całkowitej wartości rocznych oszczędności i wyrażany jest w latach. Wskaźnik ten należy do statycznych kryteriów oceny efektywności ekonomicznej zamierzenia inwestycyjnego. W ujęciu ekonomicznym SPBP wskazuje po ilu latach nakłady inwestycyjne, poniesione na zrealizowanie zamierzenia energooszczędnego, zwrócą się (tzn. wskazuje okres, w którym suma korzyści, związanych z realizacją inwestycji zrównoważy poniesione nakłady).

W analizowanym przykładzie obliczenia opłacalności zamierzenia inwestycyjnego wykonano posługując się pewnym uproszczeniem. Polegało ono na tym, że w ustaleniu wartości rocznych kosztów eksploatacyjnych założono stałość jednostkowej ceny za energię elektryczną i gaz oraz pominięto koszty związane z obsługą i serwisowaniem urządzeń, czy też podatkami. Oznacza to, że koszty te uzależniono wyłącznie od aktualnej ceny nośników energii.

W tab. 17 zestawiono koszty wykonania instalacji fotowoltaicznej wynikające z zapotrzebowania na energię elektryczną przez mieszkańców budynku oraz nakłady inwestycyjne związane z dostosowaniem tej instalacji do potrzeb energetycznych każdego z wariantów planowanej modernizacji źródła energii cieplnej. Tak więc, w poszczególnych wariantach założono zaopatrzenie proponowanego źródła energii cieplnej (pompy ciepła) w energię elektryczną z instalacji fotowoltaicznej. Odniesienie orientacyjnych cząstkowych

kosztów nakładów na instalację fotowoltaiczną do iloczynu ilości zużytej przez urządzenia energii elektrycznej i jednostkowej ceny tej energii (roczne korzyści) wskazuje, że najbardziej opłacalnym wariantem rozbudowy źródła energii elektrycznej jest wariant VI (tab. 18, kolumna 6).

W tablicy 18, poza wartościami SPBP związanymi z poborem energii elektrycznej, przedstawiono również proste okresy zwrotu dla przypadków, gdy:

- a) nośnikiem energii jest gaz ziemny – wartość nakładów inwestycyjnych na odnawialne źródło energii (kolumna 3) odniesiono do oszczędności finansowych związanych ze zmniejszonym poborem gazu, wynikającym z danego energooszczędnego rozwiązania,
- b) nośnikiem energii cieplnej jest gaz ziemny, natomiast energia elektryczna dostarczana jest z instalacji PV – sumę orientacyjnych nakładów na nowe źródło ciepła i częściowych nakładów na instalację fotowoltaiczną odniesiono do sumy oszczędności finansowych z tytułu zmniejszonego poboru gazu (lub rezygnacji z tego poboru) oraz zastosowania instalacji fotowoltaicznej.

Z zestawienia wyników, zamieszczonych w kolumnie 5 tab. 18, wynika, że dla inwestycji polegającej na modernizacji źródła energii cieplnej najkrótszy okres zwrotu wynosi 22,1 lat. Wartość tę uzyska się wówczas, gdy źródłem ciepła dla obu eksploatowanych w budynku instalacji (centralnego ogrzewania i ciepłej wody) będzie geotermalna pompa ciepła, pracująca w systemie całorocznym i współpracująca, w szczególnych przypadkach, z grzałką elektryczną, zainstalowaną w podgrzewaczu ciepłej wody użytkowej. Jeżeli natomiast odniesie się łączne koszty inwestycyjne poniesione w związku z modernizacją źródła ciepła i częściowym udziałem danego źródła w instalacji fotowoltaicznej do sumy oszczędności finansowych, wynikających z oszczędności nośnika energii cieplnej oraz oszczędności z tytułu pozyskiwania energii elektrycznej z instalacji PV to najkorzystniejszym rozwiązaniem również będzie geotermalna pompa ciepła dostarczająca czynnik grzewczy do instalacji przez cały rok (wariant VI). Prosty okres zwrotu (SPBP) w opisanym przypadku wynosi 12 lat.

Podsumowanie i wnioski

Wykonana analiza w zakresie efektywności energetycznej zaproponowanych energooszczędnych rozwiązań wskazała na trzy propozycje modernizacyjne możliwe do zastosowania. Należały do nich:

- współpraca pompy ciepła „powietrze-woda” z istniejącym kotłem opalany gazem ziemnym,
- współpraca geotermalnej pompy ciepła z instalacją słonecznych kolektorów cieczowych,
- geotermalna pompa ciepła, jako urządzenie dostarczające czynnik grzewczy do instalacji ciepłej wody i centralnego ogrzewania.

Analiza ekonomiczna wykazała, że modernizacja źródła ciepła i zastosowanie odnawialnego źródła energii cieplnej jest inwestycją, dla której prosty okres zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych przekraczał 20 lat. Ponadto pompa ciepła oraz grzałka elektryczna i dodatkowe pompy wymagały doprowadzenia określonej ilości energii elektrycznej z zewnątrz. W związku z koniecznością zaspokojenia zwiększonych potrzeb energetycznych sprawdzono, jaki wpływ na koszty inwestycyjne będzie miało powiększenie mocy planowanej do wykonania instalacji fotowoltaicznej.

Dla połączonych nakładów inwestycyjnych, będących konsekwencją modernizacji źródła ciepła i budowy instalacji fotowoltaicznej, ponownie przeprowadzono analizę ekonomiczną. Do jej wykonania zastosowano również prosty okres zwrotu nakładów. W rezultacie ustalono, że najkorzystniejszym rozwiązaniem w zakresie energooszczędności będzie pompa ciepła, współpracująca z sondami gruntowymi i pobierająca energię elektryczną z instalacji fotowoltaicznej.

- [1] Foit H. 2010. *Zastosowanie odnawialnych źródeł ciepła w ogrzewnictwie i wentylacji*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice
- [2] Jadwiszczak P. 2014. „Nowe wymagania, jakim powinny odpowiadać budynki. Możliwość spełnienia wymagań EP”, *Rynek Instalacyjny*, kwiecień.
- [3] Klugman-Radziemska E. 2018. „Odnawialne źródła energii. Przykłady obliczeniowe”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- [4] Neupauer K., Magiera J. 2009. „Analiza sprawności kolektorów słonecznych różnych typów”, *Chemia Czasopismo Techniczne*, 1-CH/2009, Zeszyt 4, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [5] Lewandowski W. M. 2012. „Proekologiczne odnawialne źródła energii” Wydanie czwarte uaktualnione, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2001,
- [6] Oszczak W. 2009. „Ogrzewanie domów z zastosowaniem pomp ciepła”. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa .
- [7] Paska J. 2010. „Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła” Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [8] Pluta Z. 2013. „Podstawy teoretyczne konwersji energii słonecznej”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [9] Pluta Z. 2008. „Słoneczne instalacje energetyczne” Wydanie II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa .
- [10] Rubik M. 2006. *Pompy ciepła Poradnik*, Wydawnictwo Instal, Warszawa
- [11] Szaflik W. 2008. „Projektowanie instalacji ciepłej wody w budynkach mieszkalnych”. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin .
- [12] Tytko r. 2020. „Fotowoltaika Podręcznik dla studentów, uczniów, instalatorów, inwestorów” Wydanie II, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków .
- [13] Viessmann, Zeszyty fachowe Pompy ciepła, Viessmann Group P208 01 PL, 06/2008
- [14] Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M., Kurowski K. 2008. *Kolektory słoneczne. Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle*. Wydawnictwo Dom Wydawniczy Medium, Warszawa .
- [15] Zaborowska E. 2019. „Projektowanie kotłowni wodnych na paliwa ciekłe i gazowe”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk .
- [16] Mysiakowska N. 2021, Praca dyplomowa inżynierska, *Wytwarzanie ciepła na potrzeby instalacji centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w budynku jednorodzinny z zastosowaniem baterii słonecznych, ogniw fotowoltaicznych i pomp ciepła*, Państwowa Uczelnia Zawodowa im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, Wydział Inżynierii i Ekonomii

AKTY PRAWNE

- [17] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. 1994 Nr 89, poz. 414 ze zmianami)
- [18] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz. U. 1997 Nr 54 poz. 348 ze zm., tekst jedn. Dz. U. z 2019 r. poz. 750)
- [19] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2001 r. Nr 62 poz. 627 ze zm., tekst jedn. Dz. U. z 2019 r. poz. 1396 ze zmianami)
- [20] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. O odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2015 r. poz. 478 ze zmianami)
- [21] Ustawa z dn. 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz. U. 2016 poz. 831 ze zm.)
- [22] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t. j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1065 ze zm.)
- [23] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju 1 z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej
- [24] Ustawa z 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków (tekst jedn. Dz. U. 2021 poz. 497)
- [25] Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 5 października 2017 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej (Dz. U. 2017 poz. 1912)

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

- [26] <https://www.viessmann.pl/budynki-mieszkalne/podgrzewacz-wody-uzytkowej/biwalentne-zasobniki-ciepłej-wody-uzytkowej/vitocell-100-b.html>
- [27] [http://www.viessmann.com/http-svc/web/poland/PDF-90.nsf/1C238275A-AE25BDDC1257B480033EF60/OpenElement-DT_Vitocell100-U-W300L\(05-2012\).pdf](http://www.viessmann.com/http-svc/web/poland/PDF-90.nsf/1C238275A-AE25BDDC1257B480033EF60/OpenElement-DT_Vitocell100-U-W300L(05-2012).pdf)
- [28] <https://virtech.pl/monokrystaliczne/450wp-modul-fotowoltaiczny-monokrystaliczny-ja-solar-jam72d20-450-mb-szklo-szklo>
- [29] <https://www.hewalex.pl/oferta/plaskie-kolektory-słoneczne/kolektor-słoneczny-ks2600f-tlp-ac-1.html> + <https://www.hewalex.pl/oferta/zestawy-solarne-z-kolektorami-plaskimi/>