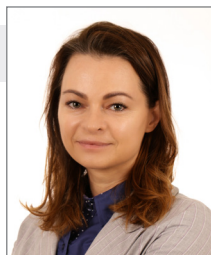




Wpływ wykorzystania odnawialnych źródeł energii na środowisko na przykładzie lokalnego studium przypadku

Environmental effects of renewable energy sources use on a local case study



Dr inż. Agnieszka Jachura

ORCID ID: 0000-0002-2116-3816

Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska
agnieszka.jachura@pcz.pl

Słowa kluczowe: OZE, analiza ekologiczna, systemy techniczne budynku, emisje zanieczyszczeń

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki oceny ekologicznej trzech wariantów wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE) w budynku jednorodinnym. W celu oceny wpływu produkcji ciepła i energii elektrycznej na środowisko, określono ilość emitowanych do powietrza głównych substancji zanieczyszczających. Aby móc porównać różne źródła energii oraz ocenić całkowity wpływ na środowisko, wyznaczono emisję równoważną oraz redukcję emisji zanieczyszczeń. Uzyskano najmniejsze obciążenie na środowisko w wariantcie OZE3, który wykazał najwyższą redukcję dla wszystkich badanych zanieczyszczeń. Największe rozbieżności redukcji emisji zanieczyszczeń, w poszczególnych wariantach, uzyskano dla dwutlenku węgla (CO_2) i tlenków azotu (NO_x). Benzo-(a)-piren (B-a-P) wykazywał najwyższą toksycznością z pośród wszystkich badanych zanieczyszczeń. Zredukowanie jego emisji o ponad 99% znacząco wpłynie na zdrowie ludzkie. Uzyskana w wariantcie OZE1 najniższa efektywność w redukcji emisji NO_x oraz CO_2 , sugeruje ograniczoną skuteczność technologii zastosowanych w tym rozwiązaniu. Wykazano, że wszystkie warianty OZE znacząco poprawiają jakość powietrza, szczególnie w odniesieniu do pyłu, sadzy, B-a-P, dwutlenku siarki i tlenku węgla. Ich redukcja przekracza lub jest zbliżona do poziomu 90%.

Keywords: waste heat, heat pump, heat from sprout growth processes

Abstract

The article presents the results of the ecological assessment of three variants using renewable energy sources (RES) in a single-family building. To assess the environmental impact of heat and electricity production, the amount of major air pollutants emitted was calculated. In order to compare different energy sources and assess the overall environmental impact, equivalent emissions and pollutant emission reductions were determined. The lowest environmental impact was achieved in RES3, which demonstrated the highest reduction for all pollutants tested. The greatest differences in pollutant emission reductions across the individual options were observed for carbon dioxide (CO_2) and nitrogen oxides (NO_x). Benzo-(a)-pyrene (B-a-P) demonstrated the highest toxicity of all pollutants tested. Reducing its emissions by over 99% would significantly impact human health. The lowest NO_x and CO_2 emission reduction efficiency achieved in RES1 suggests the limited effectiveness of the technologies used in this solution. All RES options were shown to significantly improve air quality, particularly with respect to dust, soot, B-a-P, sulfur dioxide, and carbon monoxide. Their reductions exceed or approach 90%.

Wprowadzenie

W sytuacji, gdy świat stoi w obliczu znacznego wzrostu zapotrzebowania i cen energii oraz zmniejszania się zapasów paliw kopalnych, potrzeba bezpieczeństwa energetycznego i ochrony środowiska nigdy nie była tak istotna. Według Międzynarodowej Agencji Energetycznej największymi konsumentami energii w Europie są budynki (Maduta et al., 2022). Sektor budowlany odpowiada za około 40% zużycia energii w Unii Europejskiej i znaczny odsetek globalnej emisji gazów cieplarnianych (około 36%) (Maduta et al., 2022, Szymańska et al., 2022), co czyni go kluczowym obszarem działań na rzecz klimatu. Zapewnienie ogrzewania, chłodzenia i wymaganej energii elektrycznej

to główne sektory zużycia energii w budynkach (Szczotka et al., 2022). W tym kontekście obiekty budowlane muszą stawić czoła wyzwaniu, jakim jest zarządzanie energią, które umożliwi im przyczynianie się do wzrostu gospodarczego, dobrobytu społecznego i zrównoważonego rozwoju, przy jednoczesnej ochronie zasobów nieodnawialnych i środowiska naturalnego. Ponadto mają możliwość przyjęcia środków mających na celu oszczędzanie energii, zmniejszenie jej zapotrzebowania i poprawę wydajności swoich systemów (Tomczuk et al., 2025, Sowa, 2018). Wynika to z dużej zależności od paliw kopalnych gospodarstw domowych, w celu pokrycia zapotrzebowania na ogrzewanie (CO), ciepłą wodę użytkową (CWU), a także w mniejszym stopniu i pośrednio na chłodzenie, oświetlenie i urządzenia

elektryczne (EE) (Szymańska et al., 2022). Rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych z budynków mieszkalnych, może być wykorzystanie systemów energii odnawialnej. Odnawialne źródła energii (OZE) odgrywają istotną rolę w wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła w domach jednorodzinnych, niezależniacząc je od zewnętrznych dostawców energii (Chwieduk et al., 2018). Szacuje się, że aby zapewnić zrównoważony i możliwy do poprawy standard życia do roku 2050, wymagana jest dodatkowa produkcja energii niskoemisyjnej o mocy 25000 GW (Maduta et al., 2022). Badania wykazały, że biorąc pod uwagę szkodliwe skutki dla środowiska produkcji energii w oparciu o paliwa kopalne, wykorzystanie OZE, takich jak systemy fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, magazyny energii czy elektrownie słoneczne, mogłoby znacząco przyczynić się do rozwoju niskoemisyjnego, zrównoważonego środowiska (Maduta et al., 2022, Szymańska et al., 2022, Kaczor et al., 2022). Zastosowanie technologii OZE w budynkach mieszkalnych ma na celu zwiększenie efektywności energetycznej, zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych oraz ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne (Sowa, 2018). Wprowadzenie rozwiązań opartych na OZE umożliwia również osiągnięcie większej niezależności energetycznej, co w kontekście niestabilnych cen energii i sytuacji geopolitycznej staje się istotnym czynnikiem bezpieczeństwa energetycznego gospodarstw domowych. W aspekcie ekologicznym, korzyści wynikające z wykorzystania OZE obejmują przede wszystkim redukcję emisji gazów cieplarnianych, ograniczenie zanieczyszczeń powietrza oraz zmniejszenie zapotrzebowania na surowce kopalne (Chwieduk et al., 2018, Kaczor et al., 2022).

Celem niniejszej pracy jest ocena ekologiczna zastosowania OZE w budynku mieszkalnym na podstawie konkretnego studium przypadku. Analiza obejmuje porównanie tradycyjnych rozwiązań energetycznych z wariantami opartymi na OZE, w kontekście ich wpływu na środowisko. Wyniki przeprowadzonych obliczeń mają na celu wskazanie, w jakim stopniu wdrożenie OZE może przyczynić się do poprawy bilansu energetycznego i środowiskowego budynków mieszkalnych, w polskich warunkach klimatycznych.

Założenia i warianty przyjęte do analiz

W niniejszej pracy analizy zostały przeprowadzone dla istniejącego budynku mieszkalnego, jednorodzinnego. Jest to obiekt dwukondygnacyjny, całkowicie podpiwniczony, zamieszkały jest przez czteroosobową rodzinę. Przedmiotowy budynek zlokalizowany jest w województwie śląskim, w miejscowości Wiśla. Odpowiada to trzeciej strefie klimatycznej naszego kraju. Dla tego regionu Polski, projektowana temperatura zewnętrzna wynosi -20°C . Przedmiotowy budynek w 2024 roku przeszedł gruntowną termomodernizację przegród budowlanych. Dzięki wykonanym ulepszeniom budynek spełnia wymagania WT2021 w zakresie izolacyjności przegród oraz efektywności energetycznej. Rozważono trzy warianty systemu zasilania przedmiotowego budynku w ciepło i energię elektryczną, których zestawienie zaprezentowano w tabeli 1. Do celów porównawczych, jako wariant odniesienia (bazowy) zastosowano aktualnie wykorzystywane w budynku źródła

Tabela 1. Warianty odnawialnych źródeł energii przyjęte do analiz, Źródło: opracowanie własne

Table 1. Variants of renewable energy sources adopted for the analyses, Source: authors' own study

Oznaczenie wariantu	Rodzaj źródła energii
W0	Kocioł węglowy, sieć elektroenergetyczna
OZE1	Kocioł na biomasę, panele fotowoltaiczne
OZE2	Kocioł na biomasę, kolektory słoneczne, panele fotowoltaiczne, przydomowa elektrownia wiatrowa
OZE3	Kocioł na biomasę, kolektory słoneczne, panele fotowoltaiczne, przydomowa elektrownia wiatrowa, pompa ciepła

energii.

Wariant odniesienia (W0) to kocioł węglowy, o sprawności całkowitej wynoszącej 0,64. Stanowi on źródło zasilania budynku w ciepło, zarówno na potrzeby ogrzewania, jak i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Natomiast przedmiotowy budynek w energię elektryczną zaopatruje sieć elektroenergetyczna systemowa.

I wariant (OZE1) poddany analizie to zmiana kotła węglowego na kocioł na biomasę. Kocioł na biomasę ma za zadanie zapewnić ciepło oraz przygotować ciepłą wodę użytkową dla rozważanego budynku. W przypadku zasilania budynku w energię elektryczną, zaproponowano zastąpienie sieci elektroenergetycznej alternatywnym źródłem energii czyli panelami fotowoltaicznymi.

II wariant (OZE2) poddany analizie to wszystkie zmiany zaproponowane w wariantcie I oraz dodatkowo zastosowanie kolektorów słonecznych, które mają pokryć połowę zapotrzebowania na przygotowanie ciepłej wody użytkowej oraz przydomowej elektrowni wiatrowej, wspierającej produkcję energii elektrycznej.

III wariant (OZE3) poddany analizie to wszystkie zmiany zaproponowane w wariantcie II oraz dodatkowo zastosowanie pompy ciepła, która ma za zadanie zapewnić ogrzewanie domu w około 70% i pokryć około 30% zapotrzebowania do przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Dane oraz założenia uwzględnione w obliczeniach: kocioł węglowy dostarcza ciepło na potrzeby grzewcze w wysokości 7540,19 kWh/rok (27,1425 GJ/rok), w tym na CO w ilości 4283,32 kWh/rok (15,42 GJ/rok) i CWU w ilości 3256,87 kWh/rok (11,72 GJ/rok); przyjęto stałe zużycie energii elektrycznej w przedmiotowym budynku jako 3500 kWh w ciągu roku.

Dla każdego wariantu przeprowadzono ocenę środowiskową, bazującą na emisji głównych zanieczyszczeń generowanych do atmosfery, tj.: dwutlenek siarki (SO_2), tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), dwutlenek węgla (CO_2), pył, sadza, benzo(a)piren (B-a-P).

Metodyka analiz

W celu oceny wpływu produkcji ciepła i energii elektrycznej na środowisko, dla każdego z analizowanych wariantów obliczona została ilość emitowanych do powietrza głównych substancji zanieczyszczających (NO_x , SO_2 , CO_2 , CO, pył, sadza, B-a-P). Oznaczenie wielkości emisji

(rzeczywistej) poszczególnych gazów i pyłu przeprowadzono w oparciu o metodę wskaźnikową, na podstawie wartości opałowej paliwa, zapotrzebowania na energię, ilości zużytego paliwa oraz wskaźnika emisji. Do obliczeń wykorzystano zależność (1):

$$E_T = \frac{I_{Sp} \cdot W_o \cdot W_T}{1000} = C \cdot W_T, \frac{kg}{rok} \quad (1)$$

gdzie:

- E_T – emisja rzeczywista zanieczyszczenia o indeksie T [kg/rok]
- W_T – wskaźnik emisji zanieczyszczenia o indeksie T [kg/GJ] lub [kg/kWh]
- I_{Sp} – ilość spalane paliwa [kg/rok]
- W_o – wartość opałowa paliwa [MJ/kg]
- 1000 – przelicznik z MJ na GJ
- C – roczne zapotrzebowanie na dany nośnik energii [GJ/rok] lub [kWh/rok]

Wartość opałową paliwa określono na podstawie danych udostępnionych przez dostawcę. Wartości wskaźników emisji przyjęto zgodnie z danymi udostępnianymi przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (2025a, 2025b).

Następnie wyznaczono emisję równoważną, aby porównać różne zanieczyszczenia pod względem ich toksyczności i oddziaływania na środowisko. Emisja równoważna bazuje na tzw. współczynnikach wagowych, przypisanych do danych substancji. To wielkość ogólna wydzielających się zanieczyszczeń pochodzących z określonego źródła, przeliczona na emisję dwutlenku siarki. Emisję równoważną obliczono poprzez zsumowanie iloczynu rzeczywistych emisji poszczególnych zanieczyszczeń pochodzących z ocenianego źródła i ich współczynników toksyczności, według poniższego wzoru:

$$E_R = \sum_{T=1}^n E_T \cdot K_T = \sum_{T=1}^n E_T \cdot \frac{D_{SO_2}}{D_T} \quad (2)$$

gdzie:

- E_R – emisja równoważna źródła emisji zanieczyszczeń [kg/rok]
- E_T – emisja rzeczywista zanieczyszczenia o indeksie T [kg/rok]
- K_T – współczynnik toksyczności zanieczyszczenia o indeksie T [-]

Współczynnik toksyczności, wskazany we wzorze 2, określono jako iloraz dopuszczalnej średniorocznej wartości stężenia dwutlenku siarki D_{SO_2} do dopuszczalnej średniorocznej wartości stężenia danego zanieczyszczenia D_T . Jego wartości określono na podstawie danych z rozporządzenia (Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska, 2021).

W celu identyfikacji oddziaływania poszczególnych wariantów na środowisko oraz ich porównania, określono redukcję emisji zanieczyszczeń (efekt ekologiczny) jako różnicę pomiędzy wielkością emisji ze spalania węgla (wariant bazowy) i biomasy wraz z OZE (w zależności od przyjętego wariantu), zgodnie z zależnością (3).

$$EE_{ROZEn} = E_{R,W0} - E_{R,OZEn} \left[\frac{kg}{rok} \right] \text{ lub } \quad (3)$$

$$EE_{ROZEn} = \frac{E_{R(W0-OZEn)} \cdot 100}{E_{R,W0}}, \%$$

gdzie:

- EE_{Rn} – efekt ekologiczny, redukcja emisji zanieczyszczeń [kg/rok] lub [%]
- $E_{R,W0}$ – całkowita emisja równoważna dla wariantu bazowego [kg/rok]
- $E_{R,OZEn}$ – całkowita emisja równoważna dla analizowanego wariantu z OZE [kg/rok]
- n – numer wariantu z OZE [-]
- $E_{R(W0-OZEn)}$ – różnica pomiędzy całkowitą emisją równoważną w wariantie bazowym i w analizowanym wariantie z OZE [kg/rok]

Wyniki analizy środowiskowej

W tabelach od 2 do 5 zestawiono uzyskane wyniki dotyczące przeprowadzonej analizy środowiskowej. Wszystkie obliczenia wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną w punkcie 3. Tabela 2 zawiera zestawienie wskaźników emisji dla każdego analizowanego zanieczyszczenia, z podziałem na rodzaj zastosowanego nośnika energii w budynku.

Dane zaprezentowane w tabeli 2 pokazują, że w przypadku zastosowania paliwa z OZE, takich jak słońce czy wiatr, dla każdego z rozpatrywanych zanieczyszczeń, wartości wskaźnika WT wyniosły 0. W przypadku paliw kopalnych oraz biomasy, najwyższymi wartościami wskaźnika emisji zanieczyszczeń charakteryzuje się węgiel kamienny. Tylko w przypadku CO_2 produkcja energii elektrycznej wykazuje wyższe wartości w porównaniu do biomasy o ponad 30%, a w odniesieniu do węgla kamiennego o prawie 42%. Najbardziej zbliżonymi wartościami emisji, dla tych trzech rodzajów paliwa, charakteryzowały się tlenki azotu. W odniesieniu do węgla kamiennego biomasa generowała o 33% niższe emisje NO_x , a energia elektryczna o 22%. Dla pozostałych zanieczyszczeń różnice wyniosły średnio 93% na korzyść biomasy i energii elektrycznej. Wartości wskaźników WT zamieszczone w tabeli 2, wyraźnie pokazują, jak rodzaj przyjętego nośnika energii, wpływa na późniejsze ilości generowanych do środowiska zanieczyszczeń.

W tabeli 3 zestawiono rzeczywiste emisje zanieczyszczeń ET dla analizowanych wariantów. Wartości określono oddzielnie dla każdego systemu zasilania budynku w energię z rozbiorem na poszczególne rodzaje zanieczyszczeń oraz łącznie dla budynku.

Jak pokazują dane zamieszczone w tabeli 3, największą emisją całkowitą charakteryzuje się wariant bazowy W0, generując znaczne ilości CO_2 , CO i pyłów. Produkcja ciepła z biomasy wiąże się z emisją CO_2 na poziomie 3121,3875 kg/rok i 2447,269 kg/rok odpowiednio dla wariantów OZE1 i OZE2. Spalanie równoważnej energetycznie ilości węgla kamiennego powoduje emisję na zbliżonym poziomie, wyższym tylko o ok. 6% w porównaniu z biomasą w OZE2. Natomiast węgiel generuje niższe emisje o około 16% w odniesieniu do biomasy w OZE1. Dopiero wariant OZE3 charakteryzował się wyraźnie zmniejszoną emisją CO_2 z biomasy, o ponad 73%, w porównaniu z wariantem W0. Wynikało to przede wszystkim ze znacznego udziału

Tabela 2. Wskaźniki emisji poszczególnych zanieczyszczeń (WT) w zależności od rodzaju zastosowanego paliwa, Źródło: opracowanie własne
Table 2. Emission factors of individual pollutants (WT) depending on the type of fuel used, Source: authors' own study

Rodzaj paliwa	Jednostka	Rodzaj zanieczyszczenia						
		SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	Pył	Sadza	B-a-P
Węgiel kamienny	kg/GJ	0,56	0,17	5,04	96,37	0,48	8·10 ⁻³	2,8·10 ⁻⁴
Energia elektryczna	kg/kWh / kg/GJ	4,4·10 ⁻⁴ 0,122	4,8·10 ⁻⁴ 0,133	2,7·10 ⁻⁴ 0,075	0,597 165,835	1,4·10 ⁻⁵ 3,9·10 ⁻³	3·10 ⁻⁶ 8,3·10 ⁻⁴	0,000 0,000
Biomasa	kg/GJ	0,007	0,113	0,537	115,0	0,048	3·10 ⁻⁴	2,5·10 ⁻⁵
Słońce	kg/GJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wiatr	kg/GJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 3. Zestawienie emisji zanieczyszczeń ET poszczególnych systemów oraz całkowitej w budynku dla analizowanych wariantów, Źródło: opracowanie własne
Table 3. Summary of pollutant emissions ET of individual systems and the total emissions for the building for the analysed variants, Source: authors' own study

Wariant	System	Rodzaj zanieczyszczenia							Σ _{Zaniecz}
		SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	pył	sadza	B-a-P	
		kg/rok							
W0	CO	8,6345	2,6212	77,7102	1485,9001	7,4010	0,1233	0,0043	1582
	CWU	6,5653	1,9930	59,0880	1129,8226	5,6274	0,0938	0,0076	1203
	EE	1,5575	1,6835	0,9555	2089,5000	0,0490	0,0105	0,0000	2094
	Σ _{Sys.}	16,7573	6,2977	137,7537	4705,2227	13,0774	0,2276	0,0119	4879
OZE1	CO	0,1079	1,7423	8,2798	1773,1505	0,7401	0,0046	0,0004	1784
	CWU	0,0821	1,3248	6,2957	1348,2370	0,5627	0,0035	0,0003	1357
	EE	0,7788	0,8418	0,4778	1044,7500	0,0245	0,0053	0,0000	1047
	Σ _{Sys.}	0,9687	3,9089	15,0533	4166,1375	1,3273	0,0134	0,0007	4187
OZE2	CO	0,1079	1,7423	8,2798	1773,1505	0,7401	0,0046	0,0004	1784
	CWU	0,0410	0,6624	3,1478	674,1185	0,2814	0,0176	0,0001	679
	EE	0,3894	0,4209	0,2389	522,3750	0,0123	0,0026	0,0000	523
	Σ _{Sys.}	0,5383	2,8256	11,6666	2969,6440	1,0337	0,0248	0,0005	2986
OZE3	CO	0,0677	0,4515	1,5804	456,515	0,2258	0,0000	0,0001	459
	CWU	0,0352	0,2345	0,8207	237,0551	0,1172	0,0000	0,0000	238
	EE	0,3894	0,4209	0,2389	522,3750	0,0123	0,0026	0,0000	523
	Σ _{Sys.}	0,4923	1,1069	2,6400	1215,9451	0,3553	0,0026	0,0001	1221

Σ_{Sys.} – łączna emisja danego zanieczyszczenia ze wszystkich systemów zasilania budynku w energię (CO, CWU, EE); Σ_{zaniecz} – suma wszystkich zanieczyszczeń generowanych z danego systemu

Σ_{Sys.} – total emissions of a given pollutant from all building energy supply systems (CO - space heating, CWU - domestic hot water, EE - electricity);

Σ_{Pollutants} – sum of all pollutants generated by a given system

pompy ciepła do ogrzewania i przygotowywania ciepłej wody użytkowej. Mimo, iż rzeczywista emisja CO₂ podczas spalania biomasy jest dość wysoka, nie jest ona wliczana do bilansu gazów cieplarnianych ze względu na fakt, że rośliny w trakcie wegetacji wiążą ten gaz z atmosfery. Zamyka to obieg dwutlenku węgla w środowisku, nie przyczyniając się do wzrostu jego zawartości w atmosferze. Powoduje to korzystniejszy efekt środowiskowy przy zastosowaniu biomasy do produkcji ciepła niż paliwa konwencjonalnego.

Porównując poszczególne systemy zasilania w energię to w wariantcie bazowym największy udział w emisji CO₂ miała produkcja energii elektrycznej. W odniesieniu do systemu dostarczającego ciepło do ogrzewania emisja CO₂ była mniejsza o niecałe 30% (604 kg/rok) a dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej o 46% (960 kg/rok), w porównaniu z energią elektryczną. Podobną zależność zaobserwowano w wariantcie OZE3, choć na

znacznie niższych poziomach zanieczyszczeń. Tu również emisja CO₂ była mniejsza w odniesieniu do emisji z produkcji EE, dla systemu CO o około 16% (66 kg/rok), a dla systemu CWU o prawie 55% (285 kg/rok). W przypadku pozostałych zanieczyszczeń, emisja z produkcji energii elektrycznej w W0, były na zdecydowanie niższym poziomie niż w pozostałych dwóch systemach. W przypadku wariantów OZE1 i OZE2, emisja CO₂ z systemu EE była najmniejsza, a dla systemu CO miała największy udział. Emisja CO₂ była mniejsza o: 1251 kg/rok (71%) i 1099 kg/rok (62%) dla EE i 728 kg/rok (41%) i 425 kg/rok (24%) dla CWU, odpowiednio dla OZE2 i OZE1 w porównaniu do systemu ogrzewania w tych wariantach. W przypadku wszystkich analizowanych wariantów, w w odniesieniu do emisji NO_x, uzyskano najbardziej zbliżone wartości, z tendencją malejącą w kierunku wariantu OZE3.

Każdy kolejny z wariantów OZE powoduje zredukowanie poszczególnych, jak i całkowitej emisji zanieczyszczeń,

Tabela 4. Dopuszczalne stężenia, współczynniki toksyczności oraz emisja równoważna dla poszczególnych zanieczyszczeń dla każdego z rozpatrywanych wariantów, Źródło: opracowanie własne

Table 4. Permissible concentrations, toxicity factors, and equivalent emissions for individual pollutants for each of the analysed variants, Source: authors' own study

Wielkość	Jednostka	Rodzaj zanieczyszczenia					Łączna emisja
		SO2	NOx	Pył	Sadza	B-a-P	
DSO2	μg/m ³	20					
DT		20	40	40	8	1·10 ⁻³	
K		1	0,5	0,5	2,5	2·10 ⁻⁴	
ER,W0	kg/rok	16,7573	3,1489	6,5387	0,5691	238,6087	265,6227
ER,OZE1		0,9687	1,9544	0,6637	0,0335	13,5713	17,1916
ER,OZE2		0,5383	1,4128	0,5169	0,0621	10,6403	13,1704
ER,OZE3		0,4923	0,5534	0,1776	0,0066	2,0000	3,2299

Tabela 5. Bezpośredni efekt ekologiczny w poszczególnych wariantach OZE, Źródło: opracowanie własne

Table 5. Direct ecological effect in individual renewable energy variants, Source: authors' own study

Emisja	EE _{R,OZE1}		EE _{R,OZE2}		EE _{R,OZE3}	
	kg/rok	%	kg/rok	%	kg/rok	%
SO ₂	15,7886	94,22	16,2190	96,79	16,26503	97,06
NO _x	2,3889	37,93	3,472142	55,13	5,19085	82,42
CO	122,7004	89,07	126,0871	91,53	135,1137	98,08
CO ₂	539,0852	11,46	1735,579	36,89	3489,278	74,16
Pył	11,7501	89,85	12,04368	92,10	12,72215	97,28
Sadza	0,2142	94,12	0,202804	89,09	0,225015	98,85
B-a-P	0,011252	94,31	0,011398	95,54	0,01183	99,16

w odniesieniu do W0. Wariant OZE1 ogranicza w sposób umiarkowany ilość zanieczyszczeń, charakteryzując się wciąż wysokim poziomem emisji CO₂ pochodzącym ze spalania biomasy. W wariantcie tym ograniczono całkowitą emisję o 692 kg/rok, co stanowiło około 14%. Wariant OZE2 spowodował dalsze zmniejszenie ilości zanieczyszczeń o 1893 kg/rok, czyli o 39%. Zmniejszenie to osiągnięto dzięki ograniczeniu produkcji energii elektrycznej z sieci systemowej, którą dodatkowo wspomogła energia pochodząca z wiatru oraz zredukowaniu zapotrzebowania na ciepło do przygotowania ciepłej wody użytkowej z biomasy na korzyść kolektorów słonecznych. Wariant OZE3 wykazał największą redukcję emisji zanieczyszczeń, która spadła do poziomu 1221 kg/rok, osiągając 75% zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko. Użytkano to głównie poprzez zastosowanie pompy ciepła do wspomagania ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz pełnej integracji OZE.

Tabela 4 zawiera emisje równoważne oraz dane dotyczące stężeń i toksyczności analizowanych zanieczyszczeń dla każdego wariantu. Emisja równoważna jest pewnego rodzaju wskaźnikiem, łączącym różne zanieczyszczenia w jedną wartość porównawczą, z zastosowaniem tzw. współczynników szkodliwości, dzięki czemu możliwe jest porównanie różnych źródeł energii oraz ocena całkowitego wpływu instalacji na środowisko. W ostatniej tabeli 5 zaprezentowano efekt ekologiczny, jaki uzyskano w poszczególnych wariantach wykorzystujących OZE oraz stopień redukcji poszczególnych zanieczyszczeń. Analiza danych przedstawionych w tabeli 4 i 5 obejmuje

je ocenę bezpośredniego efektu ekologicznego, określonego na podstawie emisji równoważnej zastosowania trzech wariantów wykorzystujących OZE. Porównaniu poddano redukcję emisji siedmiu kluczowych zanieczyszczeń: SO₂, NO_x, CO, CO₂, pyłu, sadzy oraz B-a-P. Wyniki zaprezentowano zarówno w jednostkach masy (kg/rok), jak również w procentach, co pozwala określić względną efektywność poszczególnych rozwiązań. W każdym wariantcie OZE uzyskano bardzo wysoką redukcję emisji SO₂. Średnio zredukowano ją o 96%, co stanowi niemal całkowite ograniczenie oddziaływania tego zanieczyszczenia na środowisko. Największym zróżnicowaniem wartości redukcji emisji, pośród analizowanych wariantów OZE, charakteryzują się NO_x. Najwyższą skuteczność zmniejszenia ich negatywnego oddziaływania uzyskano w wariantcie OZE3, na poziomie ponad 82%. Natomiast warianty OZE1 i OZE2 zmniejszają bezpośredni efekt ekologiczny odpowiednio o 38% i 55%. Zróżnicowanie wartości emisji NO_x wynika z różnic technologicznych oraz

z zastosowanych rozwiązań w zakresie spalania w danym wariantcie. Efektywność redukcji CO₂ jest również zróżnicowana, jednak znacznie niższa niż w przypadku pozostałych zanieczyszczeń. Podobnie jak w przypadku pozostałych zanieczyszczeń wariant OZE3 wykazał najwyższą redukcję CO₂ (74%). Wariant OZE1 zmniejszył tylko o około 11% bezpośredni efekt ekologiczny, co stanowiło najniższy wynik spośród wszystkich zanieczyszczeń w każdym z analizowanych wariantów. Pośredni efekt uzyskano w wariantcie OZE2, na poziomie 37%. Różnice te wynikały przede wszystkim z różnego udziału OZE w całkowitym bilansie energii oraz ograniczenia spalania paliw kopalnych. Redukcja emisji CO jest wysoka we wszystkich wariantach. Średnie zmniejszenie bezpośredniego oddziaływania na środowisko kształtowało się na poziomie 93%, co świadczy o znacznym ograniczeniu niecałkowitego spalania paliw. W przypadku pyłu zawieszonego i sadzy uzyskano bardzo wysoki efekt redukcji emisji, który rośnie wraz z udziałem OZE. Ograniczenie negatywnego wpływu tych substancji na środowisko zredukowano średnio o około 94%. Tak znaczące ograniczenie emisji cząstek stałych, szczególnie pyłu PM_{2,5}, powinno pozytywnie wpłynąć na układ oddechowy ludzi. Wszystkie warianty OZE uzyskały bardzo wysokie efekty redukcji w odniesieniu do najbardziej toksycznego związku, jakim jest benzo(a)piren. W przypadku wariantu OZE3 udało się niemal całkowicie wyeliminować emisję tej substancji do środowiska, osiągając ponad 99% skuteczność. Warianty OZE1 i OZE2 zapewniają średnio około 95% redukcji emisji B-a-P, co również jest wynikiem korzystnym ekologicznie.

Wnioski

Przeprowadzone w pracy analizy wykazały, że zastosowanie odnawialnych źródeł energii w wariantach OZE1-OZE3 prowadzi do znaczącej redukcji emisji zanieczyszczeń w porównaniu do wariantu bazowego W0. Największe korzyści środowiskowe osiągnięto w wariantcie OZE3, w którym kombinacja biomasy, kolektorów słonecznych, paneli fotowoltaicznych, energii wiatrowej oraz pompy ciepła pozwoliła na obniżenie całkowitych emisji z 4879 kg/rok do jedynie 1221 kg/rok. Wariant ten cechuje się szczególnie niską emisją CO₂, pyłów, sadzy oraz benzo(a)pirenu, co czyni go najbardziej przyjaznym dla środowiska oraz zdrowia człowieka. Wykazał on największą redukcję emisji CO₂, o 74%, co odpowiadało ilości prawie 3,5 tysiąca kg tego gazu w ciągu roku, który nie został wyemitowany do atmosfery. Charakteryzował się również najniższymi emisjami wszystkich pozostałych zanieczyszczeń. Wprowadzenie technologii OZE skutecznie poprawia jakość powietrza i zmniejsza emisję gazów cieplarnianych. Jednak największą różnicę przynosi zastosowanie pompy ciepła w wariantcie OZE3, która eliminuje spalanie paliw stałych (znacznie minimalizuje potrzebę spalania biomasy i w pełni zastępuje paliwa kopalne). Dzięki temu dobrze wpisują się w zrównoważony rozwój oraz w znacznym stopniu przybliżają cały system budowlano-instalacyjny do standardów zeroemisyjnych. Warianty OZE1 i OZE2 można określić jako tzw. warianty przejściowe. Wykazują one znaczną poprawę względem wariantu bazowego, redukując emisje SO₂, pyłów i substancji rakotwórczych nawet o 90%, jednak wciąż charakteryzują się znacznymi emisjami CO₂ i CO ze spalania biomasy, nie osiągając niskoemisyjności na poziomie rozwiązań zaproponowanych w wariantcie OZE3. Najbardziej emisyjnym wariantem jest wariant bazowy W0. Charakteryzuje się wysokimi emisjami cząstkowymi CO₂, pyłów, sadzy i B(a)P, jak i całkowitą emisją zanieczyszczeń. Przekłada się to na największy wpływ na środowisko, zdrowie ludzkie czy jakość ekosystemu. Inwestycja w pompę ciepła w połączeniu z OZE daje największy efekt redukcji emisji zanieczyszczeń. Przy pewnych ograniczeniach ekonomicznych lub technicznych, warto również rozważyć pozostałe warianty OZE, jednak należy pamiętać, że ich potencjał redukujący ilość emitowanych zanieczyszczeń jest znacznie niższy. Aby w pełni świadomie wybrać najlepsze rozwiązanie dla danego budynku, należałoby również uwzględnić analizę ekonomiczną, która wskaże możliwości finansowe danego przedsięwzięcia, w całym cyklu jego istnienia, uwzględniając zarówno koszty inwestycyjne oraz późniejsze koszty eksploatacyjne.

Źródło finansowania

Badania naukowe sfinansowano z subwencji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.*

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.*

Bibliografia

- Maduta, C., Melica, G., D'Agostino, D., & Bertoldi, P. (2022). Towards a decarbonised building stock by 2050: The meaning and the role of zero emission buildings (ZEBs) in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 44, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101009>
- Szymańska, E. J., Kubacka, M., Woźniak, J., & Polaszczyk, J. (2022). Analysis of residential buildings in Poland for potential energy renovation toward zero-emission construction. *Energies*, 15(24), 9327. <https://doi.org/10.3390/en15249327>
- Szczotka, K., Szymiczek, J., & Michalak, P. (2022). Analiza wpływu zastosowania odnawialnych źródeł energii na charakterystykę energetyczną budynku jednorodzinne. *Rynek Energii*.
- Tomczuk, K., & Rosiak, M. (2025). Analiza strat ciepła budynku mieszkalnego w kontekście termomodernizacji – studium przypadku. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 1(7–8), 26–30. <https://doi.org/10.15199/9.2025.7-8.5>
- Sowa, S. (2018). Odnawialne źródła energii jako czynnik wpływający na poprawę efektywności energetycznej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*. 105: 187-195. <https://doi.org/10.24425/124381>
- Chwieduk, D., & Jaworski, M. (Eds.). (2018). *Energetyka odnawialna w budownictwie: magazynowanie energii*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kaczor, J., & Machowska, M. (2022). Analiza możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii na potrzeby schroniska górskiego. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 53. <https://doi.org/10.15199/9.2022.6.5>
- Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami. (2025a). Wskaźniki emisyjności CO₂, SO₂, NO_x, CO i pyłu całkowitego dla energii elektrycznej na podstawie informacji zawartych w Krajowej bazie o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji za 2024 rok. https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/aktualnosci/2025/142_Wskazniki_emisyjnosci_2025.pdf (Dostęp z 17.01.2026)
- Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami. (2025b). Wskaźniki emisji zanieczyszczeń ze spalania paliw dla źródeł o nominalnej mocy cieplnej do 5 MW, zastosowane do automatycznego wyliczenia emisji w raportach do Krajowej bazy za lata 2022-2024. https://krajowabaza.kobize.pl/docs/MATERIAL_wskazniki_male_zrodla_spalania_paliw_2022-2024.pdf (Dostęp z 17.01.2026)
- Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 12 kwietnia 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. 2021 poz. 845. (2021). Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej.