

POSZERZONE STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Thermo-Ecological Cost assessment for renewable energy systems

Autorka:

Agnieszka SZOSTOK

Promotor:

Wojciech STANEK



**Politechnika
Śląska**

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Wstęp

Celem niniejszego poszerzonego streszczenia jest syntetyczne przedstawienie najważniejszych treści zawartych w rozprawie. Streszczenie zawiera następujące elementy:

- zakres,
- cele i tezy rozprawy,
- opis przedmiotu badań,
- główne wyniki i wnioski,
- odwołania do głównych publikacji,
- podsumowanie wkładu własnego.

Prezentowana rozprawa doktorska została sporządzona w języku angielskim. Jej podstawę stanowił zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów.

Zakres

Rozprawa doktorska pt. *Thermo-Ecological Cost assessment for renewable energy systems* składa się z pięciu rozdziałów. Poniżej zaprezentowano opisy i zakres poszczególnych części rozprawy.

Rozdział otwierający (Chapter 1) wprowadza w tematykę rozprawy, przedstawiając tło, motywację oraz ramy teoretyczne. Rozpoczyna się od omówienia globalnego zapotrzebowania na energię oraz rosnącego znaczenia odnawialnych źródeł energii (OZE). Następnie wprowadza metodologię Kosztu Termoeekologicznego (TEC), przedstawiając jego definicję, równania bilansowe oraz praktyczne zastosowania. W rozdziale zaprezentowano również profile zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepło i chłód, które stanowią podstawę dla dalszej analizy technicznej i środowiskowej. Na końcu rozdziału opisano główne komponenty mikrosieci, w tym: moduł fotowoltaiczny (PV), kolektor słoneczny, moduł fotowoltaiczno-termiczny (PV/T), turbinę wiatrową, pompę ciepła, chłodziarkę adsorpcyjną oraz magazyn energii.

Następna część (Chapter 2) przedstawia pierwszy etap badań przeprowadzonych w ramach rozprawy. Rozdział opiera się na artykule *Thermo-ecological analysis - The comparison of collector and PV to PV/T system* będącym załącznikiem nr 1 do Rozprawy. Rozdział przedstawia sposób wyznaczania Kosztu Termoeekologicznego (TEC) dla systemu PV/T – zagadnienia wcześniej nieopisanego w literaturze. W badaniu zaprezentowano zastosowanie metodologii Kosztu Termoeekologicznego do oceny technologii hybrydowej PV/T oraz porównano ją z konwencjonalnymi systemami PV i kolektorami słonecznymi. Omówiono również metody podziału paliwa pomiędzy produkcję ciepła a energii elektrycznej. Następnie oceniono efektywność energetyczną oraz zweryfikowano korzyści środowiskowe wynikające z zastosowania systemów hybrydowych tj. PV/T. Opisane wyniki stanowią podstawę do dalszej integracji systemu PV/T w modelu mikrosieci analizowanej w kolejnych rozdziałach.

Artykuł *Thermo-ecological analysis of the power system based on renewable energy sources integrated with energy storage system* stanowiący załącznik nr 2 został opisany w rozdziale 3 (Chapter 3). Skupia się na analizie różnych konfiguracji źródeł odnawialnych w mikrosieci. W ramach tego etapu prac przeprowadzono ocenę działania systemu w konkretnych warunkach klimatycznych uwzględniając zastosowanie systemu magazynowania energii. Do tych analiz wykorzystano wskaźnik Kosztu Termoeologicznego (TEC). Porównano konfiguracje jednorodne i mieszane, wykazując optymalne zestawienia pod względem odporności systemu na zmienność warunków zewnętrznych oraz jego efektywności środowiskowej. Wyniki wskazują na korzyści płynące z łączenia uzupełniających się źródeł odnawialnych źródeł energii oraz magazynowania energii.

Kolejny rozdział (Chapter 4) opiera się na artykule *Thermo-ecological assessment of microgrid supported with renewable energy* (załącznik nr 3). W tej części rozszerzono zakres analizy mikrosieci multigeneracyjnej opartej na OZE. W poprzednich analizach skupiano się na energii elektrycznej, natomiast na tym etapie prac w analizę włączono również ciepło i chłód użytkowy. Wykorzystano dwa narzędzia: Analizę Termoeconomiczną (TEA), łączącą efektywność egzergetyczną i kosztową, oraz Koszt Termoeologiczny (TEC), odzwierciedlający obciążenie środowiskowe wynikające z wykorzystania zasobów. Rozdział zawiera analizę przepływów egzergetycznych oraz zmienności pracy systemu w ujęciu dobowym i sezonowym. Wyniki pokazują, że TEC lepiej odzwierciedla zrównoważony charakter mikrosieci multigeneracyjnych (w zakresie optymalizacji zasobów, redukcji emisji i odporności systemu) niż TEA.

Podsumowanie wyników i wniosków zaprezentowano w rozdziale piątym (Chapter 5). Podkreślono rolę Kosztu Termoeologicznego (TEC) jako spójnego narzędzia do oceny różnych technologii OZE oraz konfiguracji mikrosieci. Wskazano na zalety systemów hybrydowych oraz znaczenie sezonowej komplementarności. Wykazano również korzyści płynące z magazynowania energii dla odporności i zrównoważonego rozwoju systemów energetycznych.

Do rozprawy doktorskiej zostały dołączone także: lista literatury cytowanej w pracy (Bibliography), streszczenie pracy w języku angielskim (Abstract) oraz streszczenie w języku polskim (Streszczenie).

Cele i tezy rozprawy

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie i zastosowanie metody Kosztu Termoeologicznego (TEC) do oceny systemów energetycznych opartych na odnawialnych źródłach energii. By zrealizować cel główny wyznaczono następujące cele szczegółowe:

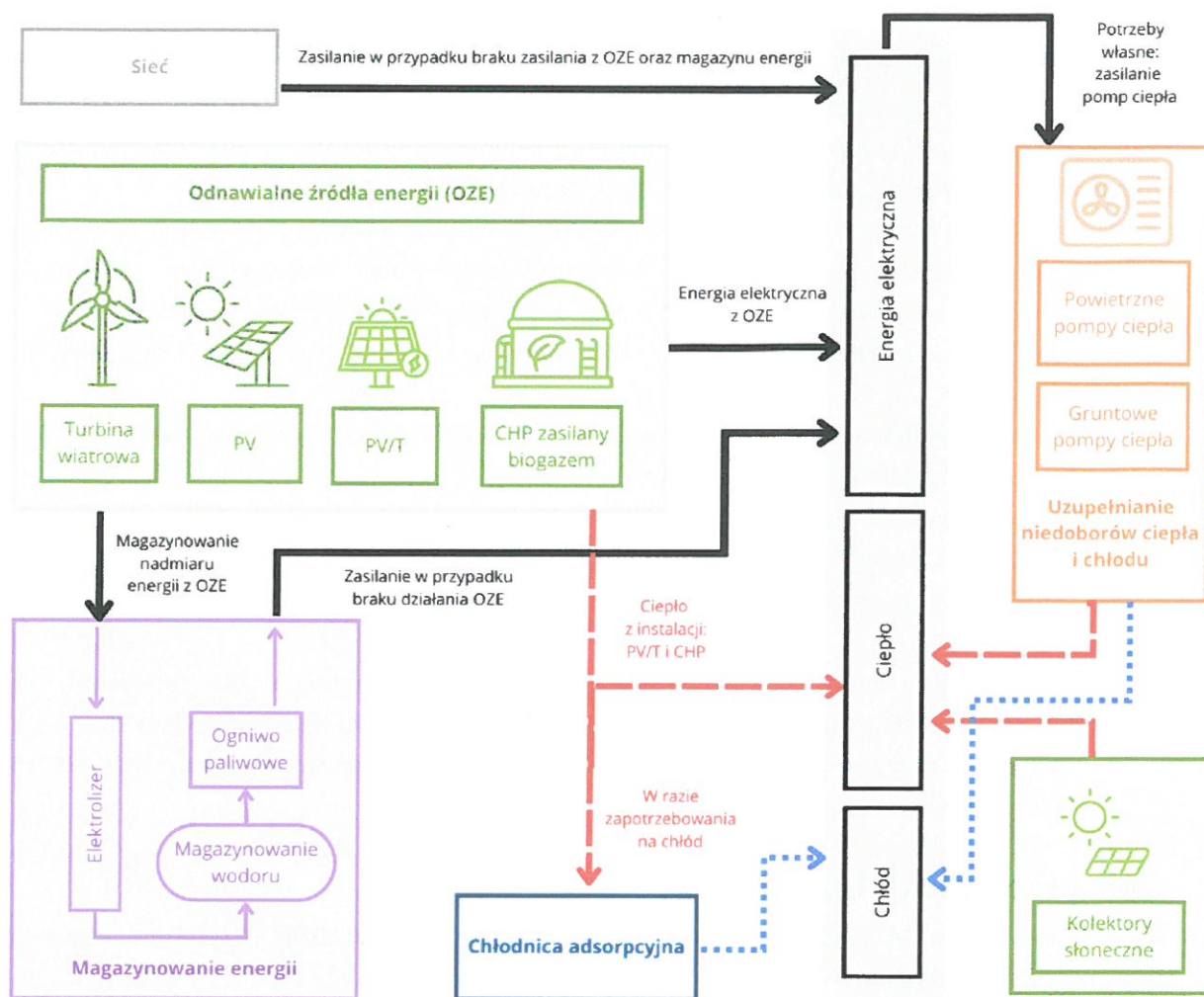
- Określenie wartości TEC dla systemu fotowoltaiczno-termicznego PV/T. Dane te nie były wcześniej dostępne w literaturze, a ich wyznaczenie było kluczowe, aby możliwe było kontynuowanie dalszych badań nad siecią, w której system PV/T był przewidziany.
- Opracowanie metody podziału Kosztu Termoeologicznego w systemach hybrydowych takich jak PV/T.
- Porównanie technologii solarnych (PV, kolektor słoneczny, PV/T) pod kątem wartości TEC oraz konsumpcji zasobów nieodnawialnych.
- Zasymulowanie oraz analiza mikrosieci opartej na wielu źródłach OZE współpracującej z systemem magazynowania energii.
- Wyznaczanie wartości TEC dla mikrosieci wytwarzającej energię elektryczną, ciepło i chłód użytkowy.
- Wyznaczenie optymalnych konfiguracji miksu energetycznego dla mikrosieci, które minimalizują TEC i maksymalizują niezależność od zewnętrznej sieci energetycznej.
- Wskazanie korzyści środowiskowych i zasobowych wynikających z integracji różnych źródeł OZE oraz technologii magazynowania energii.

Opis przedmiotu badań

Przedmiotem badań była sieć oparta na odnawialnych źródłach energii (OZE). W systemie zastosowano następujące technologie:

- turbiny wiatrowe,
- technologie solarne tj. panele fotowoltaiczne (PV), hybrydowe moduły fotowoltaiczno-termiczne PV/T oraz kolektory słoneczne,
- silnik kogeneracyjny (silnik CHP) zasilany biogazem wytwarzanym w biogazowni,
- pompy ciepła (gruntowe i powietrzne),
- system magazynowania energii (elektrolizer, magazyn wodoru i ogniwa paliwowe).

Analizowana mikrosieć stanowi system trigeneracyjny, obejmujący źródła energii elektrycznej, ciepła i chłodu. Magazynowanie energii elektrycznej zostało zastosowane w celu umożliwienia możliwie najdłuższej autonomicznej pracy systemu, a różnorodność źródeł energii ma na celu zmniejszenie zależności od pojedynczej zmiennej pogodowej. Schemat działania analizowanej mikrosieci przedstawiono na poniższym rysunku (Rysunek 1).



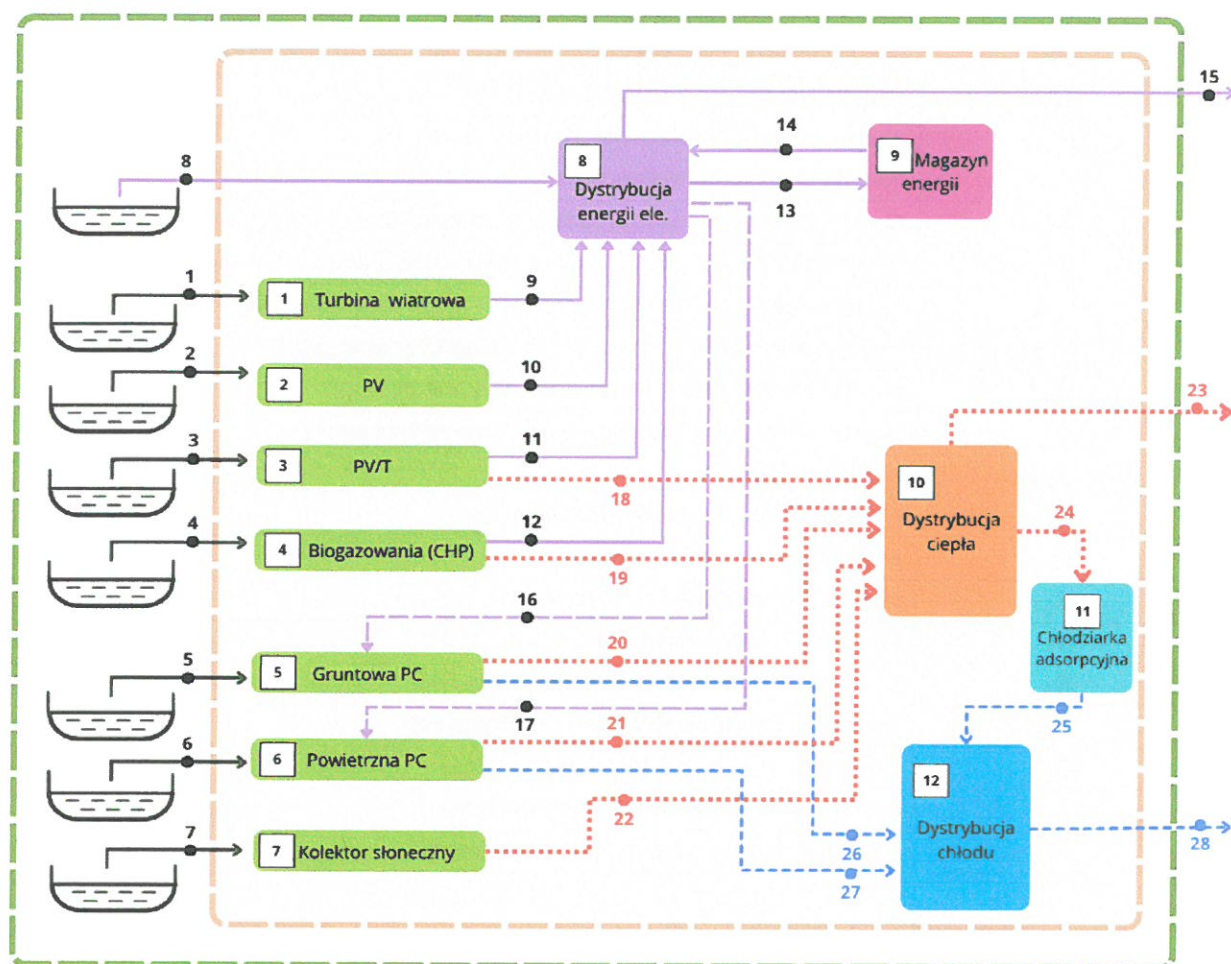
Rysunek 1. Schemat działania mikrosieci

W mikrosieci energia elektryczna jest wytwarzana przez turbinę wiatrową, panele fotowoltaiczne, panele PV/T oraz silnik kogeneracyjny zasilany biogazem. Energia elektryczna pochodząca z odnawialnych źródeł energii (OZE) jest w pierwszej kolejności wykorzystywana do pokrycia bieżącego zapotrzebowania odbiorców końcowych. Nadwyżka energii wytworzonej przez OZE kierowana jest do systemu magazynowania energii, który składa się z elektrolizera, magazynu wodoru oraz ogniwa paliwowego. W sytuacji, gdy odnawialne źródła energii nie pokrywają aktualnego zapotrzebowania mikrosieci, energia pobierana jest z magazynu. Jeśli jest to niewystarczające, a bieżące zużycie przekracza łączną produkcję z OZE oraz dostępne zasoby w magazynie, energia elektryczna jest pobierana z zewnętrznej sieci energetycznej.

Ciepło również jest wytwarzane w systemie. Pochodzi ono z systemu PV/T oraz z biogazowni. System obejmuje także kolektory słoneczne, które zapewniają produkcję ciepłej wody użytkowej (głównie w miesiącach letnich). Ciepło z systemu PV/T oraz biogazowni może być również wykorzystywane do celów chłodniczych dzięki zastosowaniu w systemie chłodziarki adsorpcyjnej.

W przypadkach, gdy ilość ciepła generowanego w systemie nie pokrywa bieżącego zapotrzebowania, wykorzystywane są pompy ciepła (powietrzne i gruntowe). Ich zastosowanie pozwala na kompensację niedoborów zarówno ciepła, jak i chłodu. Praca poszczególnych elementów systemu została

zasymulowana w oparciu o rzeczywiste warunki pogodowe charakterystyczne dla Katowic (Polska).
Rysunek 2 przedstawia przepływy egzergetyczne w analizowanym systemie.



Rysunek 2. Strumienie egzergetyczne w analizowanym systemie

Strumienie 1–8 przedstawiają egzergetę dostarczaną z zewnątrz systemu, w tym energię wiatru, promieniowanie słoneczne dla paneli PV i modułów PV/T, egzergetę chemiczną do produkcji biogazu, spalane następnie w silniku kogeneracyjnym, ciepło z gruntu i powietrza dla pomp ciepła, promieniowanie słoneczne dla kolektorów oraz energię elektryczną z sieci w razie niedoboru. Strumienie te trafiają do odpowiednich komponentów mikrosieci. Oznaczenia i opis wszystkich strumieni egzergetycznych zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Oznaczenia i wyjaśnienia strumieni egzergetycznych w analizowanym systemie

Strumień	Opis
$\dot{B}_1$	energia wiatru wykorzystywana w turbinie wiatrowej
$\dot{B}_2$	promieniowanie słoneczne wykorzystywane przez panele PV do produkcji energii elektrycznej
$\dot{B}_3$	promieniowanie słoneczne wykorzystywane przez hybrydowy moduł PV/T do produkcji energii elektrycznej
$\dot{B}_4$	energia chemiczna wykorzystywana do produkcji biogazu, a następnie ciepła i energii elektrycznej w silniku CHP
$\dot{B}_5$	ciepło gruntu wykorzystywane w pompie ciepła gruntowej

Strumień	Opis
$\dot{B}_6$	ciepło powietrza wykorzystywane w pompie ciepła powietrznej
$\dot{B}_7$	promieniowanie słoneczne wykorzystywane przez kolektor słoneczny do produkcji ciepła
$\dot{B}_8$	energia elektryczna z sieci zewnętrznej (w przypadku niedoboru w systemie)
$\dot{B}_9$	energia elektryczna wytworzona przez turbinę wiatrową
$\dot{B}_{10}$	energia elektryczna wytworzona przez system PV
$\dot{B}_{11}$	energia elektryczna wytworzona przez system PV/T
$\dot{B}_{12}$	energia elektryczna wytworzona przez silnik CHP zasilany biogazem
$\dot{B}_{13}$	energia elektryczna dostarczana do systemu magazynowania energii
$\dot{B}_{14}$	energia elektryczna wytworzona przez system magazynowania energii
$\dot{B}_{15}$	energia elektryczna dostarczana do odbiorców końcowych
$\dot{B}_{16}$	energia elektryczna zasilająca gruntową pompę ciepła
$\dot{B}_{17}$	energia elektryczna zasilająca powietrzną pompę ciepła
$\dot{B}_{18}$	ciepło z modułu PV/T
$\dot{B}_{19}$	ciepło z silnika CHP zasilanego biogazem
$\dot{B}_{20}$	ciepło z pompy ciepła gruntowej
$\dot{B}_{21}$	ciepło z pompy ciepła powietrznej
$\dot{B}_{22}$	ciepło z kolektorów słonecznych
$\dot{B}_{23}$	ciepło dostarczane do odbiorców końcowych
$\dot{B}_{24}$	ciepło kierowane do chłodziarki adsorpcyjnej
$\dot{B}_{25}$	użyteczny chłód z chłodziarki adsorpcyjnej
$\dot{B}_{26}$	użyteczny chłód z gruntowej pompy ciepła
$\dot{B}_{27}$	użyteczny chłód z powietrznej pompy ciepła

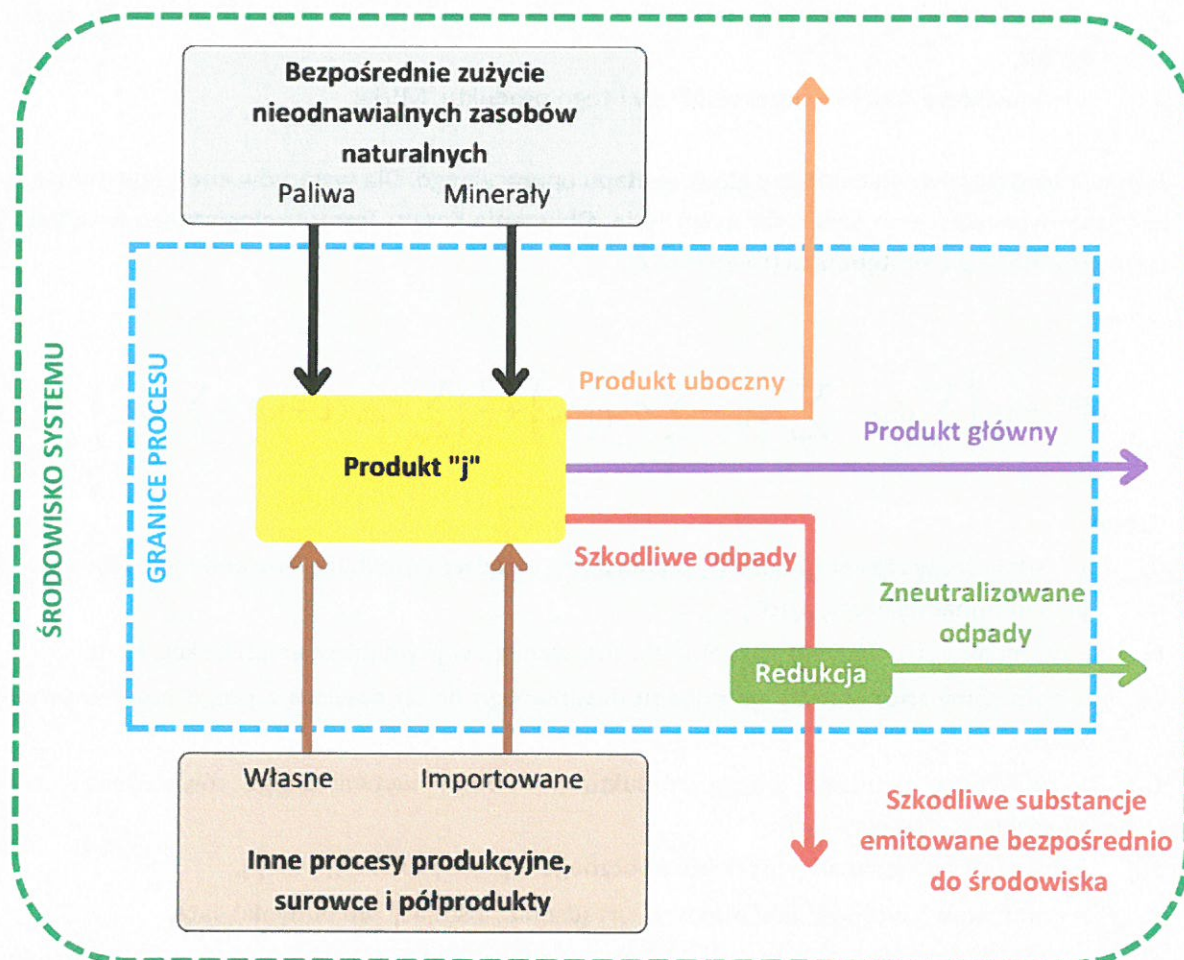
W analizowanym systemie każdemu komponentowi odpowiadają określone strumienie paliwa i produktów. Pozwala to na przeprowadzenie szczegółowej analizy przepływów energii oraz identyfikację miejsc strat energetycznych i potencjalnych możliwości optymalizacji. Strumienie wychodzące z poszczególnych komponentów trafiają następnie do systemów dystrybucji energii elektrycznej, ciepła lub chłodu. Wszystkie zależności pomiędzy strumieniami przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Równania paliw i produktów dla komponentów systemu

No.	Komponent	Paliwo (Fuel)	Produkt (Product)
1	Turbina wiatrowa	$F_1 = \dot{B}_1$	$P_1 = \dot{B}_9$
2	PV	$F_2 = \dot{B}_2$	$P_2 = \dot{B}_{10}$
3	PV/T	$F_3 = \dot{B}_3$	$P_1 = \dot{B}_{11} + \dot{B}_{18}$
4	Biogazownia z silnikiem kogeneracyjnym	$F_4 = \dot{B}_4$	$P_3 = \dot{B}_{12} + \dot{B}_{19}$
5	Pompa ciepła gruntowa	$F_5 = \dot{B}_5 + \dot{B}_{16}$	$P_5 = \dot{B}_{20} + \dot{B}_{26}$
6	Pompa ciepła powietrzna	$F_6 = \dot{B}_6 + \dot{B}_{17}$	$P_6 = \dot{B}_{21} + \dot{B}_{37}$
7	Kolektor słoneczny	$F_7 = \dot{B}_7$	$P_7 = \dot{B}_{32}$

No.	Komponent	Paliwo (Fuel)	Produkt (Product)
8	Dystrybucja energii elektrycznej	$F_8 = \dot{B}_8 + \dot{B}_9 + \dot{B}_{10} + \dot{B}_{11} + \dot{B}_{12} + \dot{B}_{14}$	$P_8 = \dot{B}_{13} + \dot{B}_{15} + \dot{B}_{16} + \dot{B}_{17}$
9	Magazyn energii	$F_9 = \dot{B}_{13}$	$P_9 = \dot{B}_{14}$
10	Dystrybucja ciepła	$F_{10} = \dot{B}_{18} + \dot{B}_{19} + \dot{B}_{20} + \dot{B}_{21} + \dot{B}_{22}$	$P_{10} = \dot{B}_{23} + \dot{B}_{24}$
11	Chłodziarka adsorpcyjna	$F_{11} = \dot{B}_{25}$	$P_{11} = \dot{B}_{21}$
12	Dystrybucja chłodu	$F_{12} = \dot{B}_{25} + \dot{B}_{26} + \dot{B}_{27}$	$P_{12} = \dot{B}_{28}$

Do analizy systemu jako narzędzie wiodące wybrano Koszt Termoeologiczny (ang. *Thermo-Ecological Cost* – TEC). Odpowiada on skumulowanemu zużyciu egzergii nieodnawialnej potrzebnej do wytworzenia danego produktu. W analizie TEC uwzględnia się także zużycie egzergii potrzebnej do kompensacji szkód środowiskowych wynikających z emisji szkodliwych substancji (odpadów). Na rysunku 3 zobrazowano ideę bilansu Kosztu Termoeologicznego (TEC).



Rysunek 3. Koncepcja równania bilansu TEC

Jednostkowy Koszt Termoeologiczny można, więc, zdefiniować jako sumę trzech wyrazów równania (1). Pierwszy wyraz równania odnosi się do egzergii nieodnawialnych zasobów naturalnych

bezpośrednio zużywanych w procesie b_{sj} . Drugi wyraz równania obejmuje Koszt Termoeologiczny szkodliwych substancji ζ_k wytwarzanych w procesie. Oba te elementy przyczyniają się do wzrostu wartości TEC. Trzeci wyraz równania, związany z produktami ubocznymi f_{ij} może zmniejszać wartość wskaźnika operacyjnego TEC ρ_i lub zwiększać go, gdy zużycie i-tego materiału na jednostkę j-tego produktu głównego jest znaczące.

$$\rho_j = \sum_s b_{sj} + \sum_k p_{kj} \zeta_k - \sum_i (f_{ij} - a_{ij}) \rho_i \quad (1)$$

Gdzie:

- b_{sj} – energia s-tego nieodnawialnego zasobu naturalnego bezpośrednio zużywanego w rozpatrywanym procesie na jednostkę j-tego produktu, MJ/kg,
- ζ_k – Koszt Termoeologiczny k-tej szkodliwej substancji, MJ/kg,
- p_{kj} – ilość k-tej szkodliwej substancji z j-tego procesu, kg,
- f_{ij} – współczynnik produkcji ubocznej i-tego produktu na jednostkę j-tego produktu głównego, np. kg/kg lub kg/MJ,
- a_{ij} – współczynnik zużycia i-tego materiału na jednostkę j-tego produktu głównego, np. kg/kg lub kg/MJ,
- ρ_i – jednostkowy Koszt Termoeologiczny i-tego produktu, MJ/kg.

Zaprezentowane równanie dotyczy głównie etapu operacyjnego. Dla systemów energetycznych istotne jest także wprowadzenie innych faz cyklu życia. Obliczenie Kosztu Termoeologicznego w całym cyklu życia prezentuje się następująco (równanie 2):

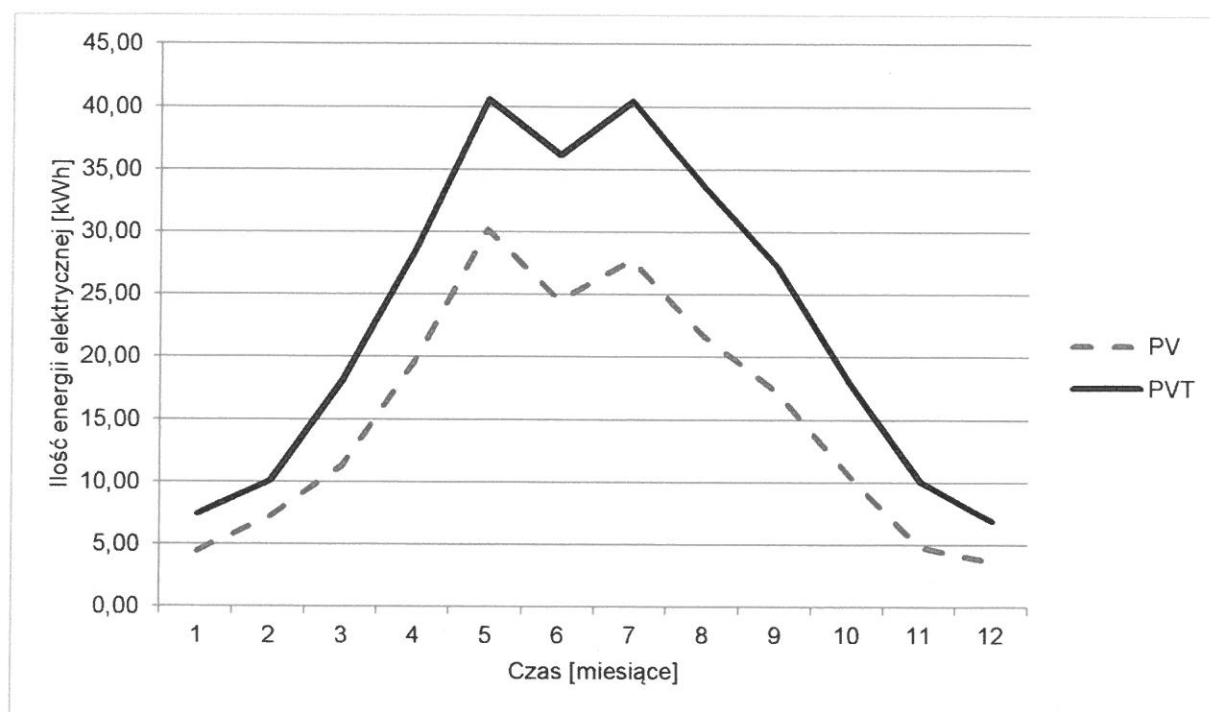
$$\rho_j^{LCA} = \theta_n \left(\sum_i \dot{G}_i \rho_i + \sum_k \dot{P}_k \zeta_k - \sum_u \dot{G}_u \rho_j s_{ju} \right) + \frac{1}{\tau_j} \left(\sum_l G_l \rho_l (1 - u_l) + \sum_r G_r \rho_r \right) \quad (2)$$

Gdzie:

- θ_n – średni roczny czas eksploatacji j-tej maszyny, urządzenia, instalacji lub budynku, czyli czas pracy przy nominalnej mocy, h/rok,
- $\dot{G}_i$ – nominalny strumień i-tego materiału zużywanego w j-tym procesie produkcji, kg/h,
- $\dot{P}_k$ – nominalny strumień k-tego odpadu uwalnianego do środowiska z j-tego procesu produkcji, kg/h,
- $\dot{G}_u$ – nominalny strumień u-tego produktu ubocznego wytwarzanego równocześnie z j-tym produktem głównym, kg/h,
- s_{ju} – wskaźnik zastępowania produktu ubocznego u przez produkt główny j,
- τ_j – nominalna żywotność j-tej maszyny, urządzenia, instalacji lub budynku, lata,
- G_l – ilość i-tego materiału użytego do budowy j-tej maszyny, urządzenia, instalacji lub budynku, kg,
- u_l – przewidywany wskaźnik odzysku i-tego materiału po zakończeniu fazy eksploatacji j-tej maszyny, urządzenia, instalacji lub budynku, kg/kg,
- G_r – ilość r-tego materiału użytego do konserwacji j-tej maszyny, urządzenia, instalacji lub budynku, kg.

Główne wyniki

W niniejszym rozdziale przedstawiono główne wyniki przeprowadzonych badań w podziale na poszczególne etapy. W pierwszej części analizie poddano systemy solarne. W przeglądzie literatury stwierdzono lukę badawczą dotyczącą braku wartości Kosztu Termoeologicznego (TEC) dla systemu fotowoltaiczno-termicznego (ang. Photovoltaic/Thermal PV/T). Moduł PV/T to urządzenie hybrydowe, które jednocześnie produkuje energię elektryczną i ciepło z promieniowania słonecznego. W ramach badań przeprowadzono również porównanie z innymi technologiami solarnymi: modułem fotowoltaicznym (PV) oraz kolektorem słonecznym. Wyniki symulacji wskazały, że roczna produkcja energii z modułu PV/T wynosi 267,07 kWh i jest to około 1,5 razy większa niż uzysk z systemu PV. Na rysunku 4 zaprezentowano miesięczną produkcję energii elektrycznej z systemów PV/T i PV.



Rysunek 4. Produkcja energii elektrycznej z systemów PV/T i PV w podziale na miesiące

Analizując uzysk ciepła zaobserwowano, że w tym przypadku kolektorów był on wyższy niż w module PV/T. Kolektor słoneczny wytwarza 2191,49 kWh ciepła rocznie, podczas gdy system PV/T – 540,84 kWh.

Następnie dokonano obliczeń Kosztu Termoeologicznego dla modelu PV/T. Uwzględniono egzergię użytych materiałów zarówno wykorzystanych do budowy kolektora jak i dodatkowego wyposażenia. W kalkulacjach zawarto także okres eksploatacji instalacji oraz potencjał odzysku materiałów po demontażu instalacji. Uzyskana wartość TEC dla systemu PV/T wyniosła 0,253 [MJ/MJ].

Ze względu na kogenerację (jednoczesną produkcję energii elektrycznej i ciepła przez moduł PV/T), w algorytmie obliczeniowym uwzględniono również alokację Kosztów Termoeologicznych. Zaproponowano dwa sposoby przydziału paliwa pomiędzy produkcję ciepła a energii elektryczną:

- Pierwszy podział opierał się na koszcie egzergetycznym, który definiuje się jako całkowite zużycie egzergii związane z wytworzeniem użytecznego produktu. Na podstawie jednostkowego TEC PV/T można było określić, jaka część energii słonecznej jest przypisana kolejno do produkcji ciepła i energii elektrycznej w systemie PV/T.

- W drugim podziale wykorzystano podejście Kosztu Termoeologicznego (TEC), stosując proporcjonalne wskaźniki TEC dla technologii konwencjonalnych (zastępczych).

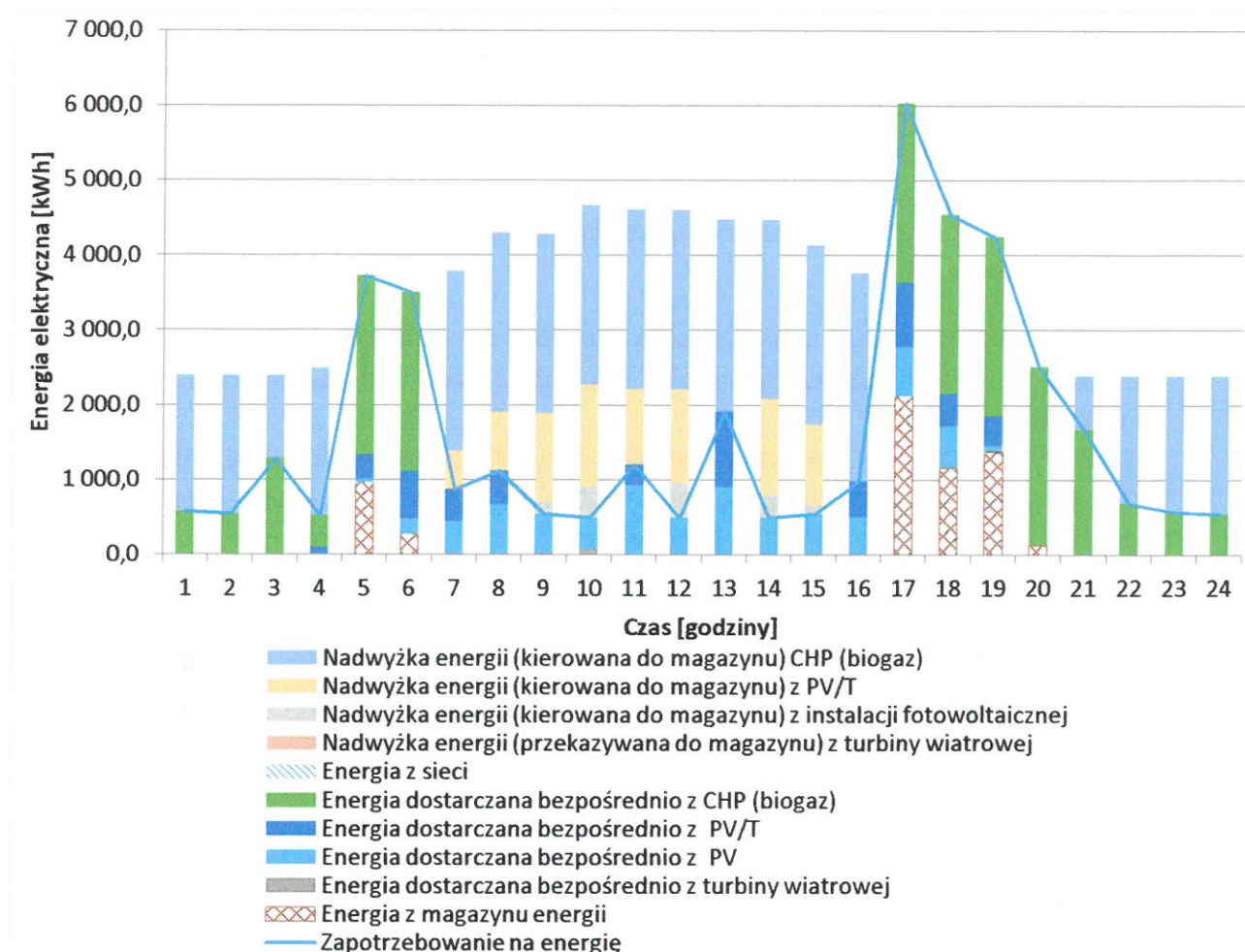
W tabeli 3 zaprezentowano wyniki przeprowadzonych obliczeń. Koszt Termoeologiczny energii elektrycznej w systemie PV/T wynosi 0,153 (pierwszy podział) lub 0,193 (drugi podział), co jest wartością niższą niż w przypadku klasycznego PV (0,26) i zdecydowanie niższą od systemów opartych na węglu (dla elektrowni węglowych jego wartość wynosi (4,39).

Tabela 3. Analiza Kosztu Termoeologicznego systemu PV/T

TEC [MJ/MJ]	Pierwszy podział	Drugi podział
Koszt Termoeologiczny energii elektrycznej	0,153	0,193
Koszt Termoeologiczny użytecznego ciepła	0,100	0,060

W dalszej części dokonano analizy reprezentatywnych dni dla czterech pór roku: wiosny, lata, jesieni i zimy. Celem było zaobserwowanie zmian wartości wskaźnika TEC dla PV/T w ciągu roku oraz przyjrzenie się jak zaproponowane alokacje Kosztu Termoeologicznego zachowują się dla różnych wartości produkcji energii elektrycznej i ciepła. Zaobserwowano, że w podziale drugim wartości TEC zachowywały większą stabilność i były bliższe średniej rocznej niż w pierwszym podziale.

W drugiej części badań symulowano i analizowano różne miksy energetyczne. Celem było określenie optymalnej konfiguracji współpracujących ze sobą instalacji OZE. W analizie uwzględniono także system magazynowania energii. Zbadano potencjał integracji technologii magazynowania energii w różnych scenariuszach miksu energetycznego. Wydajność każdego źródła energii odnawialnej oraz systemu magazynowania analizowano na podstawie danych godzinowych. Poniżej zaprezentowano przykład. Rysunek 5 przedstawia letni dzień o wysokiej produkcji energii z odnawialnych źródeł. W okresach częściowego niedopasowania między zapotrzebowaniem a podażą energii z OZE (np. rano lub popołudniu) deficyt był pokrywany przez system magazynowania energii. Wyniki te uzyskano dla scenariusza obejmującego cztery źródła odnawialne pracujące jednocześnie (turbina wiatrowa 4,0 MW, PV/T 4,0 MW, PV 4,0 MW oraz silnik CHP zasilany biogazem 3,0 MW).



Rysunek 5. Godzinowe zużycie i wytwarzanie energii elektrycznej dla przykładowego dnia

Analiza obejmowała różne konfiguracje miksu odnawialnych źródeł energii. W pierwszym kroku analizowano sieć opartą tylko na jednym typie OZE, a następnie badano miks dwóch, trzech lub czterech typów źródeł. Nominalna moc każdego układu wynosiła przy każdej analizie 15 MW.

Przy produkcji z jednego typu OZE zaobserwowano charakterystyczne cechy poszczególnych źródeł. Informacje te zostały wykorzystane do budowania bardziej skomplikowanych miksów. W miksach z dwoma źródłami (np. PV/T + wiatr lub biogaz + PV/T) zaobserwowano poprawę komplementarności sezonowej. System PV/T + biogaz pokrywał zapotrzebowanie niemal przez cały rok, z niewielkim udziałem energii pobieranej z sieci. Dodanie trzeciego źródła dodatkowo poprawiło wydajność. Systemy z trzema źródłami (np. PV + PV/T + biogaz lub PV/T + wiatr + biogaz) wykazały jeszcze większą odporność, choć w zimie nadal występowały niedobory przy niewystarczającej pojemności magazynów. Najlepsze wyniki uzyskano w konfiguracji z czterema źródłami energii. System obejmujący PV, PV/T, turbinę wiatrową i silnik zasilany biogazem zapewnił najbardziej korzystny efekt. Zasilanie z sieci było potrzebne jedynie na początku i pod koniec zimy.

Dla pogłębienia analizy zastosowano Koszt Termoekologiczny. System oparty na jedynie na panelach PV wykazywał najniższe wartości TEC latem, co odzwierciedlało wysoką produkcję OZE i efektywne wykorzystanie magazynów energii. Podobny wzorzec sezonowy obserwowano dla PV/T, jednak z jeszcze niższym TEC latem dzięki wyższej sprawności systemu. W systemie opartym na sile wiatru wartości TEC pozostawały stosunkowo wysokie przez cały rok, z lokalnym minimum w marcu, gdy warunki wietrzne były najbardziej sprzyjające. Natomiast system biogazowy osiągał najniższy roczny TEC, bo oferował najbardziej stabilne warunki zasilania.

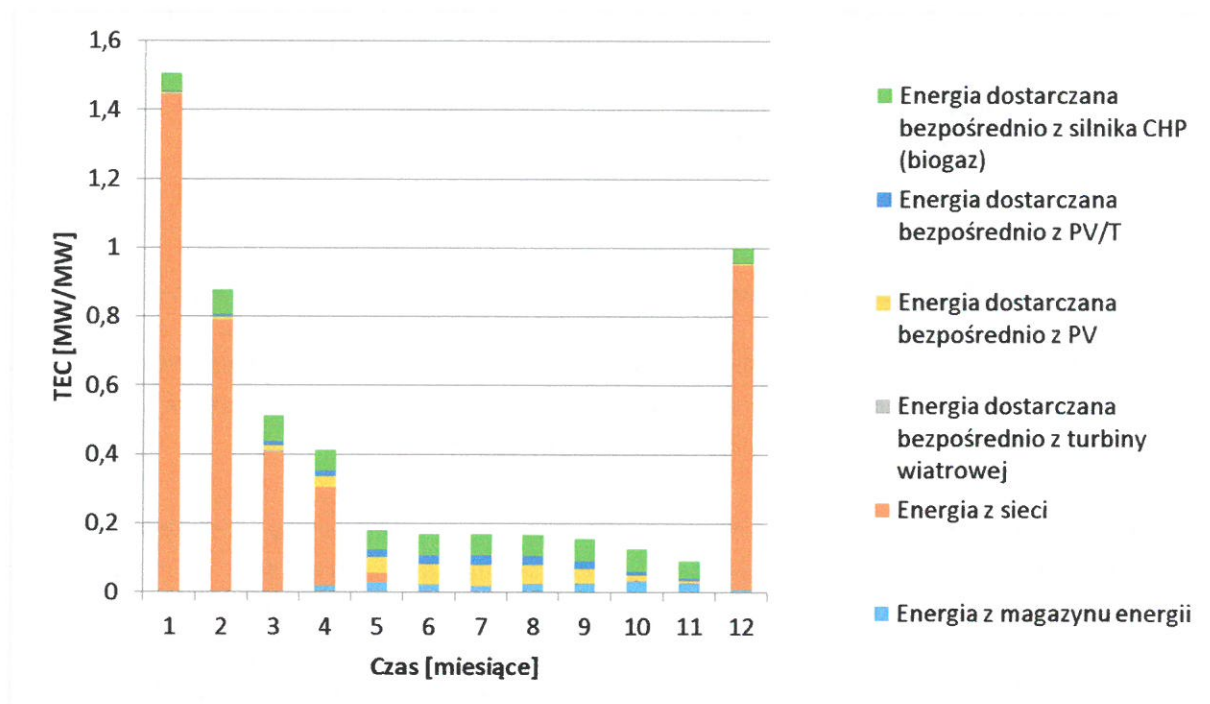
W drugim etapie analizowano systemy dwóch typów źródeł i uzyskano następujące wyniki:

- Konfiguracja "PV/T + wiatr" wykazywała stosunkowo wysokie wartości TEC z powodu częstego uzupełniania energii z sieci, poprawiając się jedynie podczas letnich szczytów produkcji PV/T.
- W miksie "PV/T + biogaz" TEC stopniowo malał wraz ze wzrostem udziału OZE i wykorzystania magazynu energii.
- System "wiatr + biogaz" osiągał najniższe wartości TEC latem i utrzymywał korzystne wyniki jesienią dzięki magazynowi energii.

Analiza trzech typów źródeł współpracujących ze sobą przyniosła następujące wyniki:

- Miks "wiatr + PV/T + biogaz" osiągał wartości TEC poniżej 1 przez większość roku, co wskazuje na silną komplementarność źródeł.
- System "PV + PV/T + wiatr" charakteryzował się wyższym TEC ze względu na ciągłe korzystanie z sieci.
- Najlepsze wyniki uzyskano dla miksu "PV + PV/T + biogaz", z TEC poniżej 1 przez 11 miesięcy i spadkiem poniżej 0,2 między majem a listopadem.

Ostatnim etapem był miks energetyczny oparty na czterech typach odnawialnych źródeł energii, który zaprezentowano na rysunku 6.



Rysunek 6. Koszt Termoeologiczny (TEC) – produkcja energii w oparciu o cztery typy OZE (turbina wiatrowa 4,0 MW, PV/T 4,0 MW, PV 4,0 MW i biogaz 3,0 MW)

Konfiguracja oparta na czterech typach OZE (PV, PV/T, wiatr i biogaz) wykazała niskie wartości TEC przez cały rok. Jedynie w styczniu TEC przekroczył wartość 1,5, co odzwierciedlało znaczne pobory energii z sieci podczas niskiej produkcji OZE i niewystarczającej ilości zmagazynowanego wodoru. W grudniu TEC wzrósł blisko wartości 1 z powodu opróżnienia magazynu i braku nadwyżek energii, by uzupełnić zapasy wodoru.

W dalszych badaniach przeprowadzono analizę 28 strumieni egzergii. Spośród nich osiem strumieni stanowi dopływy do systemu, natomiast trzy odpowiadają strumieniom wyjściowym energii elektrycznej, ciepła i chłodu dostarczanych do odbiorców końcowych. Strumienie omówiono w punkcie „Opis przedmiotu badań” niniejszego streszczenia.

Przeprowadzona analiza pozwoliła na przedstawienie stanu systemu w postaci wartości strumieni egzergii dla każdej godziny w roku. Tabela 4 zawiera przykładowy zestaw danych dla jednej reprezentatywnej godziny (3 kwietnia, godz. 8:00). Tabela ilustruje, w jaki sposób w danym momencie zarządzane są strumienie egzergii, odzwierciedlając zarówno produkcję, jak i konsumpcję w mikro sieci. Wyniki te są istotne dla zrozumienia bilansu między wytwarzaniem energii odnawialnej, magazynowaniem a pokryciem zapotrzebowania.

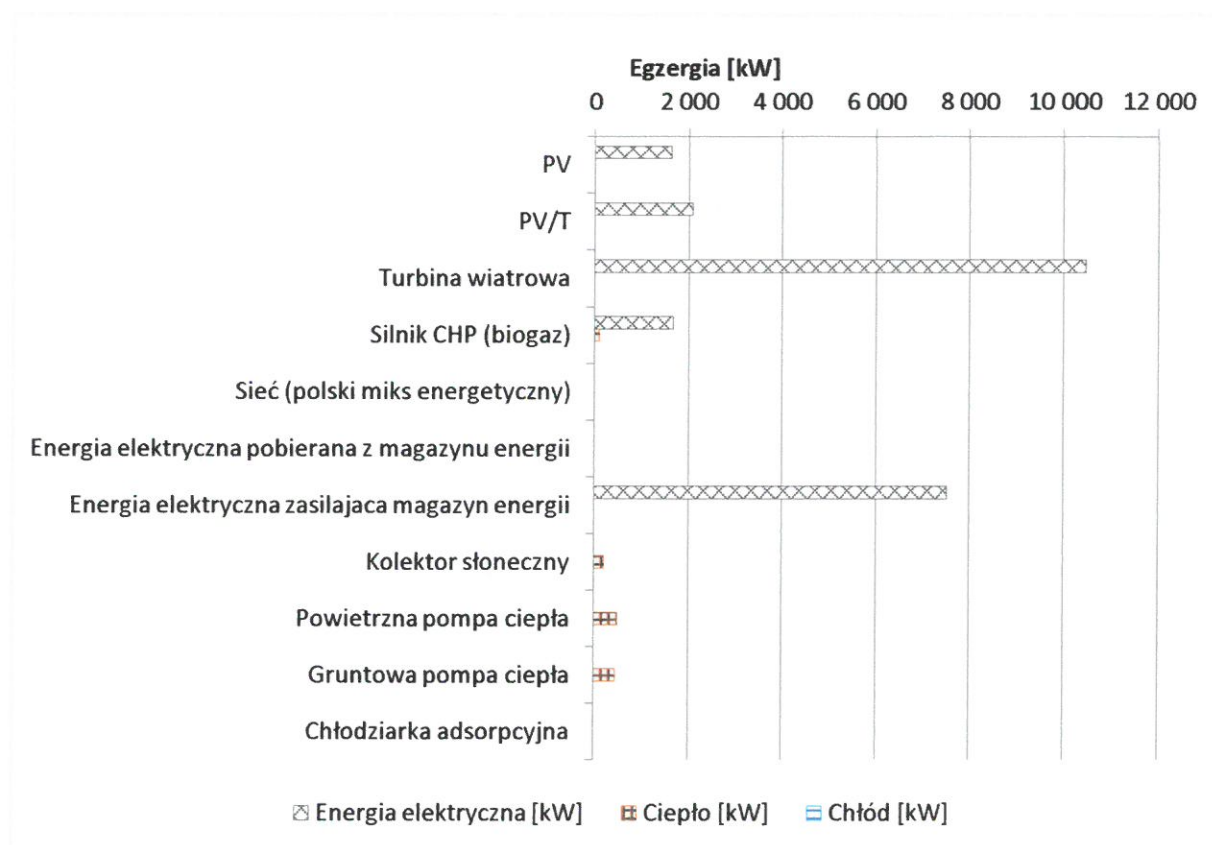
Tabela 4. Strumienie egzergii

Nazwa	Paliwo	Produkt	Sprawność egergety- czna	Stopień nieodwraca- lności układu	Koszt egzergetycz- ny	Koszt Termoekolog iczny
Skrót	F	P	η_B	I	k*	(TEC)
Jednostka	kW	kW	-	kW	-	-
Energia elektryczna						
PV	13 233,2	1 621,5	0,1	11 611,8	8,2	0,3
PV/T	13 233,2	2 082,7	0,2	11 150,6	6,4	0,2
Turbina wiatrowa	36 087,6	10 465,4	0,3	25 622,2	3,4	0,1
Silnik kogeneracyjny zasilany biogazem	1 459,1	830,6	0,6	628,5	1,8	0,7
Sieć (polski miks energetyczny)	0,0	0,0	-	-	-	-
Energia elektryczna pobierana z magazynu energii	0,0	0,0	-	-	-	-
Energia elektryczna zasilająca magazyn energii	9 328,1	7 531,5	0,8	1 796,6	1,2	0,1
Ciepło						
PV/T	0,0	0,0	-	-	-	-
Kolektor słoneczny	1 320,0	209,2	0,2	1 110,9	6,3	0,6
Silnik kogeneracyjny zasilany biogazem	505,3	305,5	0,6	199,8	1,7	0,3
Powietrzna pompa ciepła	2 559,6	486,9	0,2	2 072,7	5,3	4,0
Gruntowa pompa ciepła	1 424,4	445,4	0,3	979,0	3,2	2,4
Chłód						
Chłodziarka adsorpcyjna	0,0	0,0	-	-	-	-
Powietrzna pompa ciepła	0,0	0,0	-	-	-	-
Gruntowa pompa ciepła	0,0	0,0	-	-	-	-

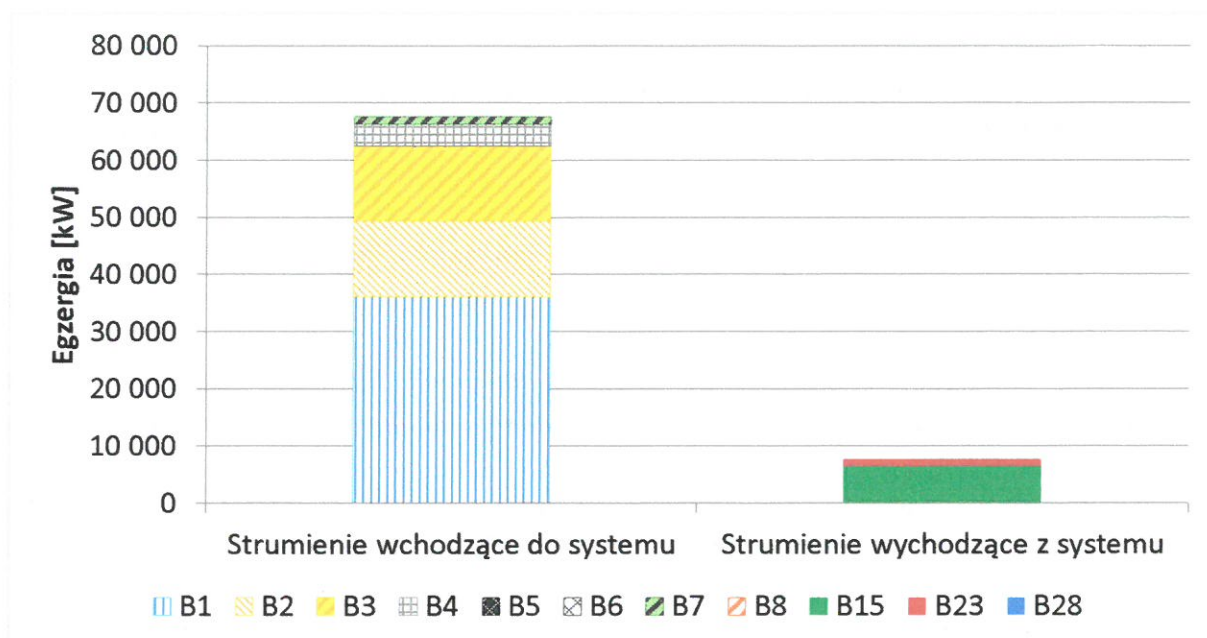
W analizie wybrano reprezentatywne momenty (godziny) w ciągu roku. W ich wyborze uwzględniono następujące czynniki:

- Sezonowe zmiany w produkcji energii – różnice w wytwarzaniu energii elektrycznej, ciepła i chłodu w zależności od pory roku.
- Dobowe wahania w produkcji – zmienność np. natężenia promieniowania słonecznego oraz siły wiatru w ciągu dnia.
- Sezonowe różnice w zapotrzebowaniu na energię – zmiany w potrzebach na energię elektryczną, ciepło i chłód w zależności od miesiąca i godziny dnia.
- Bilans między produkcją a zużyciem – możliwość obserwacji nadwyżek lub deficytów energii w systemie.

Jednym z analizowanych przypadków był 3 kwietnia o godzinie 8:00. W tym momencie roku głównym źródłem energii elektrycznej była turbina wiatrowa. System wytworzył nadmiar energii elektrycznej, który został skierowany do magazynu energii. Produkcja ciepła była głównie zapewniona przez silnik kogeneracyjny zasilany biogazem. Niedobory ciepła zostały pokrywane przez produkcję z pomp ciepła i kolektorów słonecznych. W tym okresie roku nie było zapotrzebowania na chłód, więc nie odnotowano żadnego strumienia chłodu użytkowego. Rysunek 7 pokazuje wartości egzergii dla analizowanej godziny, natomiast Rysunek 8 przedstawia strumienie egzergii wpływające do systemu i wychodzące z niego. Można zaobserwować, że w tym momencie roku system gromadził energię: łączna egzergia dopływająca znacznie przewyższała strumienie odpływające, co skutkowało magazynowaniem energii.



Rysunek 7. Wartości egzergii dla 3 kwietnia, godz. 8:00



Rysunek 8. Strumień dopływający do systemu i strumień wychodzący z systemu – 3 kwietnia, godz. 8:00

Wśród innych reprezentatywnych przypadków warto opisać skrótowo wybrane dni (godziny) w trakcie kolejnych pór roku: w lecie, jesieni i zimie:

- 28 lipca, godz. 14:00 (lato, duże wartości promieniowania słonecznego):
 - głównymi źródłami energii elektrycznej były systemy PV i PV/T, wspierane przez silnik kogeneracyjny zasilany biogazem,
 - ciepło pochodziło z PV/T, kolektorów słonecznych oraz silnika kogeneracyjnego zasilanego biogazem,
 - nadwyżka ciepła była kierowana do chłodziarki adsorpcyjnej, umożliwiając produkcję chłodu,
 - dodatkowe zapotrzebowanie na chłód (nie pokryte z chłodziarki) zaspokajane było przez pompy ciepła.
- 6 października, godz. 15:00 (jesień):
 - energia elektryczna generowana przez PV, PV/T i silnik kogeneracyjny zasilany biogazem oraz zmagazynowana w magazynie energii nie wystarczała na pokrycie potrzeb wymagana była energia z sieci.
 - ciepło pochodziło z PV/T, silnika kogeneracyjnego zasilanego biogazem, kolektorów słonecznych oraz pomp ciepła.
 - brak zapotrzebowania na chłód.
- 15 grudnia, godz. 22:00 (zima, noc):
 - brak generacji ze źródeł wiatrowych i słonecznych (PV, PV/T, kolektory).
 - energia elektryczna pochodziła głównie z silnika kogeneracyjnego zasilanego biogazem, uzupełniana przez magazyn energii i sieć zewnętrzną.
 - ciepło zapewniał silnik kogeneracyjny w połączeniu z pompami ciepła.
 - brak zapotrzebowania na chłód.

Wnioski

W niniejszym punkcie streszczenia przedstawiono główne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz analiz zaprezentowanych w rozprawie. Poniższe punkty stanowią syntetyczne podsumowanie najważniejszych ustaleń:

- W toku przeprowadzonych analiz wykazano, że analiza TEC jest narzędziem umożliwiającym kompleksową ocenę kosztów środowiskowych związanych z funkcjonowaniem systemów energetycznych.
- Ważnym wynikiem zaprezentowanych badań są kalkulacje TEC dla system PV/T (wcześniej niedostępne w literaturze) wraz z zastosowaniem alokacji Kosztów Termoeologicznych na energie elektryczną i ciepło.
- Przeprowadzona analiza Kosztów Termoeologicznych wykazała, że energia elektryczna i ciepło wytwarzane w systemie PV/T mają współczynnik TEC poniżej 1. Zatem energia zasobów wykorzystanych do wytworzenia produktu jest niższa niż wartość energii tego produktu.
- Analiza TEC wykazała, że systemy hybrydowe tj. systemy fotowoltaiczno-termiczne PV/T generują niższe koszty środowiskowe w porównaniu do klasycznych systemów fotowoltaicznych (PV) oraz kolektorów słonecznych.
- Badania wykazały, że ze względu na wciąż obecny udział zasobów nieodnawialnych w produkcji końcowym (np. zużytych na produkcję elementów do systemów energetycznych) dla żadnej obecnie znanej technologii wytwarzania energii nie jest możliwe osiągnięcie zerowego współczynnika TEC.
- Uzyskane wyniki wskazały, że przy porównywaniu różnych systemów energetycznych (OZE i systemów konwencjonalnych) analiza globalna (określenie Kosztu Termoeologicznego) pozwoliła na właściwą ocenę i porównanie systemów. Dzięki TEC możliwe jest jednoznaczne określenie wpływu procesu na wyczerpywanie się zasobów nieodnawialnych.
- Przeprowadzone badania wskazały, że nawet przy porównywaniu podobnych systemów energetycznych (takich jak PV i PV/T) korzystniejszy jest wybór TEC jako narzędzia analitycznego. Obejmuje on bowiem wpływ OZE na zasoby nieodnawialne i znacznie trafniej wskazuje wpływ systemu na środowisko. W przypadku tradycyjnie podawanej efektywności jest to jedynie możliwość oceny samego procesu, a nie umiejscowienia go w kontekście szerszego systemu, takim jak środowisko (Ziemia).
- Kolejnym istotnym wnioskiem jest ograniczona użyteczność tradycyjnej analizy termoeonomicznej (TEA). W systemach hybrydowych wyniki TEA mogą błędnie sugerować maksymalizację wykorzystania zasobów zewnętrznych (bez uwzględnienia ich pochodzenia) i minimalizację przetwarzania energii w systemie. Z kolei Koszt Termoeologiczny zapewnia jasną ocenę zasobów dostarczanych do systemu.
- Wykorzystanie analizy termoeologicznej dało wskazówki jak umiejętnie projektować miks energetyczny, tak, aby wpływ na środowisko i wyczerpywanie zasobów był najniższy. Uzyskane wyniki pokazały jaki miks energetyczny zapewnił najlepsze warunki dla stabilności mikro sieci przy jednoczesnej najniższej konsumpcji zasobów.
- Obserwacje dowodzą potencjału TEC jako ważnego narzędzia do oceny i optymalizacji systemów energetycznych, co stanowi istotny wkład w rozwój analityki ujmującej szerszy kontekst - jakim jest środowisko (Ziemia).
- Dane, które uzyskujemy za pomocą analizy TEC pozwalają osadzić analizowane systemy w ujęciu planetarnym. Umożliwia to wskazanie na oddziaływanie systemu na szerszy kontekst środowiskowy, co jest bardzo wartościowe w kontekście współczesnych wyznań tj. zmiana klimatu, wyczerpywanie zasobów zależność od importu surowców, degradacja środowiska itd. Wymagają one

kompleksowych badania i optymalizacji procesów w skali planetarnej. Odpowiedzią na te potrzeby są analizy pozwalające na globalne ujęcie tj. zaprezentowana analiza TEC.

- Otrzymane dane mogą być wykorzystane przy opracowywaniu polityk publicznych dotyczących efektywnego wykorzystania zasobów i wykorzystania odnawialnych źródeł energii i systemów magazynowania.
- Zaprezentowane badania rzucają nowe światło na projektowanie zrównoważonych mikrosieci. Dają wskazówki w zakresie projektowania elastycznych systemów bazujących na źródłach podlegających dynamice dziennej i sezonowej.
- Wśród ograniczeń zaprezentowanych badań należy wymienić w szczególności omówienie tylko jednego regionu. Analizowane zastosowanie TEC dla jednej lokalizacji pozwoliło ująć specyficzne lokalne uwarunkowania. W przyszłości warto rozszerzyć badania na inne lokalizacje i zastosować analizę porównawczą uzyskanych wyników TEC. Umożliwi to lepsze zrozumienie różnic regionalnych oraz identyfikację wzorców najbardziej zrównoważonych rozwiązań.
- W dalszych badaniach warto byłoby uwzględnić także zmianę klimatu i jej wpływ na mikrosieć. Pozwoliłby, by to na rozważenie korzyści zastosowania analizy TEC dla systemów energetycznych w zmieniających się warunkach klimatycznych. Takie badania mogłyby dostarczyć ważnych informacji w kontekście strategii adaptacyjnych i projektowania odpornej infrastruktury energetycznej.
- W kontekście przedstawionych wyników, dalsze badania mogłyby się również skupić na sposobach uzyskania jak najniższych wartości TEC. Osiągnięcie TEC na poziomie 0 jest nierealne ze względu na zależność od zasobów nieodnawialnych i koszty środowiskowe, jednak dalsze badania nad uzyskaniem najbardziej zrównoważonych opcji i miksów są niezwykle ważne.
- Dalsze analizy mogłyby zostać poszerzone o optymalizację technologii integracji i magazynowania energii odnawialnej. Obiecującymi kierunkami mogą być tutaj możliwości bardziej zrównoważanej produkcji komponentów energetycznych czy wydajne procesy odzyskiwania i recyklingu.
- Interesującym kierunkiem rozwoju badań byłoby również włączenie w analizę aspektów społecznych transformacji energetycznej. Wśród potencjalnych tematów, które warto wziąć pod uwagę jest akceptacja społeczna nowych technologii. Istotną kwestią do rozważenia jest także wpływ inwestycji energetycznych na lokalne społeczności i sprawiedliwość transformacji. Uwzględnienie tych czynników może znacząco wzbogacić ocenę efektywności i trwałości wdrażanych rozwiązań.

Odwołania do głównych publikacji

Rozprawa składa się z trzech monotematycznych artykułów wymienionych poniżej. Pełne teksty artykułów zostały dołączone jako załączniki do rozprawy doktorskiej (Załączniki 1-3). W treści rozprawy artykuły były przywoływane za pomocą cyfr rzymskich (I-III):

- I. Agnieszka Szostok, Wojciech Stanek, *Thermo-ecological analysis - The comparison of collector and PV to PV/T system*, Renewable Energy, Volume 200, 2022, Pages 10-23, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.070>.
- II. Agnieszka Szostok, Wojciech Stanek, *Thermo-ecological analysis of the power system based on renewable energy sources integrated with energy storage system*, Renewable Energy, Volume 216, 2023, 119035, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119035>.
- III. Wojciech Stanek, Agnieszka Szostok, *Thermo-ecological assessment of microgrid supported with renewable energy*, Energy, Volume 314, 2025, 134256, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134256>.

Podsumowanie wkładu własnego

Poniżej przedstawiono elementy, które stanowią samodzielny i oryginalny wkład autorki w rozwój badań nad analizą TEC. Wkład ten obejmuje wszystkie etapy pracy badawczej, począwszy od sformułowania problemu, poprzez realizację badań, aż po interpretację wyników i publikację rezultatów. Do wkładu własnego autorki zaliczyć należy w szczególności:

- sformułowanie problemu i hipotez zaprezentowanych badań oraz określenie kierunków analizy,
- dokonanie przeglądu literatury i określenie luk badawczych,
- opracowanie koncepcji poszczególnych badań wraz z zaproponowaniem odpowiedniej metodyki ich przeprowadzenia, w tym: dobór narzędzi metod (np. analizy TEC, TEA, charakterystyk poszczególnych komponentów) oraz kryteriów ocen,
- samodzielne zaprojektowanie mikrosieci, przeprowadzanie symulacji i analiz różnych miksów energetycznych,
- dokonanie po każdej symulacji oceny wyników i ich interpretacji wraz z krytyczną oceną rezultatów oraz zaproponowaniem dalszych kierunków badań,
- wyznaczanie Kosztu Termoeologicznego dla system fotowoltaiczno-termicznego PV/T, którego wartość wcześniej nie występowała w literaturze,
- zaproponowanie podziałów TEC w systemach hybrydowych zarówno dla pojedynczego systemu energetycznego (PV/T) jak i dla sieci multigeneracyjnej, gdzie współpracował zespół odnawialnych źródeł energii,
- opracowanie zastosowania Kosztu Termoeologicznego dla sieci multigeneracyjnej w celu zwiększania jej zrównoważenia i zmniejszenia konsumpcji zasobów nieodnawialnych,
- aktywny udział w przygotowaniu wskazanych w poprzednim podpunkcie publikacji,
- wyciągnięcie wniosków końcowych i sformułowanie tez niniejszej rozprawy.

Podsumowując, rozprawa doktorska stanowi oryginalny i samodzielny wkład autorki w rozwój badań nad analizą TEC. Obejmuje on przygotowanie koncepcji, realizację badań i ich interpretację. Ponadto wyniki badań były regularnie publikowane, przyczyniając się do rozwoju wiedzy w zakresie analizy Kosztu Termoeologicznego. Stanowią także bazę dla dalszych badań w tej dziedzinie.