

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Jacek Roman

**UKŁADY ZGAZOWANIA ODPADÓW KOMUNALNYCH
W HYBRYDOWYCH INSTALACJACH ODNAWIALNYCH
ŹRÓDEŁ ENERGII**

Promotor:

dr hab. inż. Bartosz Ceran, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Robert Wróblewski

Poznań, 2025

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	3
1.1. Hybrydowe instalacje OZE.....	3
1.2. Instalacje zgazowania paliwa z odpadów	3
1.3. Przegląd literatury.....	4
1.4. Teza, cel i zakres pracy.....	6
2. Skrócony opis metodologii analiz hybrydowych instalacji OZE	7
2.1. Struktura analiz.....	7
2.2. Studium przypadku	8
2.4. Metodologia wyznaczania wskaźników energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych	12
2.5. Metodologia analiz wielokryterialnych	14
3. Wyniki analiz.....	16
3.1. Wyniki analiz HIOZE A	16
3.2. Wyniki analiz HIOZE B	19
3.3. Wyniki analiz wielokryterialnych.....	21
4. Wnioski.....	26
Literatura.....	28

1. Wprowadzenie

1.1. Hybrydowe instalacje OZE

W ostatnich latach sektor wytwarzania energii elektrycznej poddany jest procesowi transformacji, która ma na celu jego dekarbonizację. W ramach rezygnacji ze źródeł zaliczanych do emisyjnych, wykorzystujących paliwa kopalne, odchodzi się od energetyki centralnej, bazującej na dużych blokach węglowych. Ich miejsce w systemie elektroenergetycznym zajmują źródła rozproszone, w znacznej mierze wykorzystujące źródła odnawialne (OZE), w większości niesterowalne, takie jak elektrownie wiatrowe lub fotowoltaiczne. Generacja w nich jest stochastycznie zmienna, a czas wykorzystania mocy znamionowej jest kilkukrotnie niższy niż elektrowni konwencjonalnych. Zmienność generacji ma negatywne przełożenie na pracę systemu elektroenergetycznego. Koniecznością stają się wielkie inwestycje w infrastrukturę sieciową oraz w instalacje magazynujące energię elektryczną. Widocznym kierunkiem zmian w podejściu do OZE w wielu krajach na świecie jest wzrost zainteresowania współdzieleniem przyłącza – czyli *cable pooling*'iem. Pomysł bazuje na podłączeniu kilku rodzajów źródeł energii elektrycznej do jednego przyłącza, zakładając przewymiarowanie całkowitej mocy zainstalowanej w stosunku do mocy przyłączeniowej. W efekcie bez rozbudowy infrastruktury sieciowej zwiększa się wartość generowanej energii elektrycznej. Z drugiej strony, może dojść do przekroczenia mocy przyłączeniowej i w efekcie ograniczenia generacji.

W Polsce, w nowelizacji ustawy o OZE w 2023 [1] roku zawarto rozwiązanie nazwane hybrydową instalacją odnawialnego źródła energii (HIOZE). Według ustawy, HIOZE musi spełniać kilka warunków. Po pierwsze, może zawierać jedynie odnawialne źródła energii. Żadne z urządzeń, wchodzące w jej skład, nie może mieć mocy znamionowej wyższej niż 80% całkowitej mocy zainstalowanej. Instalacja musi zawierać magazyn energii elektrycznej, a udział energii przekazanej do systemu za pośrednictwem tego magazynu musi wynosić co najmniej 5% całkowitego wolumenu. Ostatnim warunkiem jest czas wykorzystania mocy przyłączeniowej o wartości co najmniej 5256 h/rok. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na wymaganą wysoką wartość, zastosowanie źródeł sterowalnych i niezależnych od pogody jest korzystne [65]. W przeciwnym wypadku konieczne jest znaczne przewymiarowanie mocy wytwórczej, co zwiększa prawdopodobieństwo redukcji generacji. Ustawa o OZE umożliwia stosowanie w HIOZE różnych typów źródeł sterowalnych i niezależnych od pogody. Jednymi z nich są instalacje termicznego przetwarzania odpadów (ITPO), które mogą pracować zarówno w wysokosprawnej kogeneracji, jak i służyć wyłącznie do generacji energii elektrycznej.

1.2. Instalacje zgazowania paliwa z odpadów

Wszystkie nowoczesne państwa zmagają się z problemem rosnącej ilości odpadów, których istotna część ma pochodzenie komunalne. Odpady komunalne zawierają cały przekrój różnych frakcji, których zawartości w strumieniu są zmienne. W efekcie są jednymi z najtrudniejszych rodzajów odpadów do zagospodarowania. Zgodnie z ustawą [2], wszystkie odpady, które nie mogą zostać poddane ponownemu użyciu lub recyklingowi powinny podlegać innym formom odzysku, w tym także odzyskowi energii. Pomimo działania w Polsce kilku ITPO nadal znaczna część frakcji energetycznej odpadów nie jest zagospodarowana. Metody odzysku energii z odpadów komunalnych dzielą się na: biologiczne (z odpadów organicznych) oraz termiczne (z wysokoenergetycznych frakcji odpadów). Frakcja wysokokaloryczna (papier i tektura, opakowania wielomateriałowe, tworzywa sztuczne, drewno, tekstylia) stanowi 34,5% strumienia odpadów zmieszanych, co według różnych szacunków odpowiada od 2,93 do 4,5 mln ton rocznie (z czego 1,8 mln ton jest obecnie zagospodarowywane) [3,4]. Obecnie wszystkie działające i budowane ITPO w Polsce wykorzystują technologię bezpośredniego spopielenia odpadów. W USA oraz

w Azji (szczególnie w Japonii) wykorzystywane są również pozostałe typy instalacji np. instalacje zgazowania odpadów. W Polsce prowadzone są badania nad takimi instalacjami [5,6], a nawet podejmowane są próby komercjalizacji.

Zgazowanie jest procesem termochemicznym w którym dochodzi do konwersji paliw stałych do postaci gazowej. Proces zachodzi pod wpływem czynnika zgazowującego. Istotą procesu jest to, aby ilość tlenu była mniejsza niż stechiometrycznie niezbędna do spalania całkowitego i zupełnego. W efekcie nie jest możliwe całkowite utlenienie paliwa. Powstały gaz zawiera: składniki palne (głównie: CO, H₂, CH₄) oraz niepalne (CO₂, H₂O, N₂), a także zanieczyszczenia i smoły. Gaz jest niskokaloryczny – przy zgazowaniu biomasy jego wartość opałowa wynosi od 4 do 12 MJ/Nm³ [7]. Jedną z największych zalet procesu jest możliwość wykorzystania produktu (syngazu) w silnikach gazowych (w szczególności z zapłonem iskrowym). Silniki charakteryzują się wysoką sprawnością i elastycznością w szerokim zakresie pracy, łatwą regulacją i krótkim czasem rozruchu [8]. Dzięki temu możliwe jest ich zastosowanie w hybrydowych instalacjach wytwórczych. Jednakże, zasilanie silników syngazem wiąże się z wieloma trudnościami eksploatacyjnymi, ponieważ silniki wymagają określonych właściwości paliwa. W przypadku instalacji zgazowania odpadów spełnienie ich jest utrudnione ale nie niemożliwe.

Obecnie wykorzystuje się kilka typów reaktorów zgazowania. Różnią się one budową, panującym wewnątrz ciśnieniem oraz czynnikiem zgazowującym. W zależności od zastosowanego reaktora różnić się będzie skład i kaloryczność syngazu. Ze względu na prostotę konstrukcji i niskie koszty, w przypadku niewielkich instalacji najczęściej stosowane są reaktory ze złożem stałym, współprądowe, wykorzystujące powietrze jako czynnik zgazowujący i pracujące przy wartości ciśnienia zbliżonej do ciśnienia atmosferycznego. Reaktory takie produkują gaz o niskiej kaloryczności, który jednakże jest czystszy niż w innych typach gazogeneratorów, co ułatwia wykorzystanie gazu w silnikach [9,10]. Z tych względów, w pracy założono wykorzystanie gazogeneratora tego typu.

1.3. Przegląd literatury

Na podstawie przeglądu autor stwierdza, że w literaturze proponowane jest wykorzystanie zgazowania biomasy lub odpadów we współpracy z innymi źródłami w ramach hybrydowych systemów wytwarzania energii elektrycznej. Publikacje można podzielić na trzy grupy. Pierwszą z nich jest analiza pojedynczych układów hybrydowych pod kątem zastosowania ich w wybranym scenariuszu np. w celu elektryfikacji [11], zasilenia odbiorców w krajach z zawodną pracą systemu elektroenergetycznego [12] lub zmniejszenia poboru energii elektrycznej z systemu [13]. Druga grupa publikacji obejmuje porównanie układów wykorzystujących instalacje zgazowania biomasy z układami nie zawierającymi takich instalacji. Wyniki większości analiz wskazują na pozytywny wpływ instalacji zgazowania na pracę systemu hybrydowego. W aspekcie ekonomicznym jest wykorzystanie gazogeneratora z silnikiem jest korzystniejsze niż magazynów energii [14], biogazowni [15], lub instalacji pirolizy odpadów [16]. Pozwala również zapewnić właściwy poziom pokrycia zapotrzebowania odbiorcy [16,17]. Autorzy badań zwracają jednak uwagę na emisję CO₂ i wysokie koszty inwestycyjne instalacji z gazogeneratorami [18,19]. Ostatnia grupa publikacji zawiera natomiast różne metodologie doboru parametrów źródeł w hybrydowych instalacjach wytwórczych. Prace badawcze z tego zakresu zgrupowano i przedstawiono w tabeli 1.

W większości przedstawionych w tabeli publikacji analizowane są układy pracujące w trybie *off-grid*. Zgazowanie biomasy lub odpadów często jest proponowane jako odpowiedź na problemy z dostępem do energii elektrycznej. W kilku publikacjach [20,23,29,30,34,39] uwzględniono połączenie z systemem elektroenergetycznym jedynie

w celu uzupełnienia poboru energii przez odbiorcę (w wypadku, gdy nie wystarcza energii z systemu hybrydowego). W kolejnych artykułach założono sprzedaż nadwyżek energii z instalacji hybrydowej do systemu elektroenergetycznego [21,22,33]. Jedynie w poprzedniej pracy [24] autora rozprawy przeanalizowano sprzedaż energii do systemu elektroenergetycznego jako kluczowy element działania instalacji hybrydowej, który dodatkowo obwarowany był wymaganiami wynikającymi z przepisów polskiego prawa.

Tabela 2. Przegląd literatury w zakresie doboru parametrów w instalacjach hybrydowych.

Praca	Kryteria analizy				Elementy instalacji hybrydowej					Tryb pracy
	EN/T	EK	ŚR	Inne	Paliwo	PV	WT	BME	Inne	
[20]	-	+	-	-	Odpady	+	-	+	Biogazownia	On-grid
[13]	+	-	-	-	Odpady	+	+	-	-	Off-grid
[21]	+	-	+	-	Odpady	+	+	+	-	On-grid
[22]	-	+	-	-	Odpady	+	+	+	-	On-grid
[23]	+	+	+	-	Odpady	+	+	-	MS	On-grid
[24]	+	+	+	-	Odpady	+	+	+	-	On-grid
[25]	-	+	-	-	Biomasa	+	-	+	-	Off-grid
[26]	+	+	+	Społeczne	Biomasa	+	+	+	Diesel	Off-grid
[27]	-	+	-	-	Biomasa	+	+	+	-	Off-grid
[28]	-	+	-	-	Biomasa	+	+	+	-	Off-grid
[29]	-	+	-	-	Biomasa	+	+	+	MS	On-grid
[30]	-	+	-	-	Biomasa	+	+	+	Kocioł elektryczny, MS	On-grid
[31]	+	+	-	-	Biomasa	+	-	+	-	Off-grid
[32]	-	+	-	-	Biomasa	+	-	+	Hydroenergia	Off-grid
[33]	-	+	-	-	Biomasa	+	-	-	Diesel	On-grid off-grid
[34]	-	+	-	-	Biomasa	+	-	+	-	On-grid
[35]	-	+	-	-	Biomasa	+	+	+	-	Off-grid
[18]	+	+	+	-	Biomasa	+	+	+	Diesel	Off-grid
[36]	-	+	-	-	Biomasa	+	-	+	-	Off-grid
[37]	-	+	-	-	Biomasa	+	+	+	Diesel	Off-grid
[38]	-	+	-	-	Biomasa	+	-	+	-	Off-grid
[39]	+	+	+	-	Biomasa	-	-	-	MS, ORC	On-grid
[40]	+	+	+	Społeczne	Biomasa	+	-	+	Diesel, Hydroenergia	Off-grid

gdzie, + oznacza, że kryterium z danej grupy (lub dane źródło energii) było uwzględnione w analizie, - oznacza, że kryterium z danej grupy (lub dane źródło energii) nie było uwzględnione w analizie, EN/T – grupa kryteriów energetycznych lub technicznych, EK – grupa kryteriów ekonomicznych, ŚR – grupa kryteriów środowiskowych, BME – baterijny magazyn energii, MS – magazyn syngazu.

Jedynie w czterech publikacjach [18,26,39,40] zastosowano metody wielokryterialne. W pozostałych przypadkach, jeżeli wykorzystywano więcej niż jedno kryterium, analizę i dobór parametrów układu przeprowadzano dla każdego z kryteriów osobno. Na podstawie tych badań można stwierdzić, które rozwiązanie było najkorzystniejsze według pojedynczego kryterium, a następnie wyznaczyć optymalne rozwiązanie według kolejnego wskaźnika. Zasada ta jest obecna zarówno we wcześniejszych publikacjach autora rozprawy [23,24], jak i w innych wymienionych publikacjach [21,31]. Metody wielokryterialne pozwalają natomiast na połączoną analizę uwzględniającą pełen zakres kryteriów. Dodatkowo umożliwiają dobranie wartości wag kryteriów decyzyjnych. Dzięki temu, dobór parametrów układu hybrydowego wynika z preferencji danego inwestora lub badacza. W trzech przypadkach metody wielokryterialne służyły do analizy układów *off-grid* [18,26,40]. W czwartym [39] analizowano trigeneracyjny układ w którym system elektroenergetyczny był wykorzystywany jedynie jako źródło dodatkowej energii. Nie analizowano w nim sprzedaży energii elektrycznej.

1.4. Teza, cel i zakres pracy

Instalacje hybrydowe służące do generowania energii elektrycznej można opisać równaniami bilansowymi. Ze względu na niestabilność warunków meteorologicznych, analiza musi powinna uwzględniać zmienność pogody w czasie. Kluczowe zatem stają się rozkłady mocy w każdym analizowanym okresie. Ze względu na niestabilny charakter pracy źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych, nie jest możliwe wykorzystanie w pełni mocy przyłączeniowej. W celu zwiększenia wartości czasu wykorzystania mocy przyłączeniowej HIOZE niezbędne są źródła sterowalne i magazyny energii. Jednocześnie, generacja w źródłach fotowoltaicznych i wiatrowych (nieemisyjnych) powinna mieć pierwszeństwo względem pozostałych instalacji. Konieczne jest zatem powiązanie mocy źródeł OZE oraz baterijnego magazynu energii (BME) i agregatu silnikowego (ICE) w ramach analizy HIOZE. W pracy wykorzystano współczynniki, które są stosunkami:

- mocy agregatu silnikowego, zintegrowanego z instalacją zgazowania odpadów, do mocy niesterowalnych źródeł OZE – określanego przez współczynnik P_{ICE}/P_{PV+TW} ,
- mocy baterijnego magazynu energii, przy określonej wartości współczynnika szybkości ładowania i rozładowania C-rate, do mocy niesterowalnych źródeł OZE – określanego przez współczynnik P_{BME}/P_{PV+TW} .

Właściwy dobór wartości współczynników jest kluczowym zagadnieniem, wpływającym zarówno na możliwość spełnienia wymagań prawnych, jak i na wartości wskaźników energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych definiujących pracę instalacji. Wykorzystanie współczynników pozwala również uogólnić wyniki, które mogą być zastosowane do instalacji o innych mocach ale przy analogicznych wartościach współczynników P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} .

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej przyjęto następującą tezę:

Dobór wartości współczynników P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} dla hybrydowej instalacji OZE składającej się z instalacji fotowoltaicznej, turbin wiatrowych, baterijnego magazynu energii oraz instalacji zgazowania odpadów komunalnych, pracującej według założeń cable pooling'u, jest zadaniem, które można rozwiązywać za pomocą wielokryterialnych metod podejmowania decyzji z uwzględnieniem różnych kryteriów z grupy technicznych, ekonomicznych oraz środowiskowych.

Sformułowano również cel badań:

Celem pracy jest opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na przeprowadzenie wielokryterialnej analizy porównawczej wariantów projektowych HIOZE i zbadanie wpływu wag zdefiniowanych kryteriów na aspekty techniczne, ekonomiczne oraz środowiskowe związane z jej eksploatacją.

Jako miarę efektów energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych należy wskazać następujące wskaźniki energetyczne (czas wykorzystania mocy zainstalowanej, wartość ograniczonej energii elektrycznej ze źródeł niesterowalnych), ekonomiczne (łączne nakłady inwestycyjne, różnicę między ceną sprzedaży, a kosztami wytwarzania energii elektrycznej) i środowiskowe (jednostkowy wskaźnik emisji CO₂, różnicę między masą odpadów komunalnych dostępnych lokalnie, a ich zużyciem w instalacji hybrydowej).

Praca obejmuje swym zakresem analizę hybrydowych instalacji OZE składających się z instalacji fotowoltaicznej, turbin wiatrowych, baterijnego magazynu energii oraz instalacji zgazowania odpadów komunalnych zintegrowanej z agregatem silnikowym. Praca podzielona jest na dwie części: teoretyczną oraz modelowo-symulacyjną. W pierwszej z nich

zaprezentowano przegląd literatury obejmujący dotychczasowe osiągnięcia naukowców w dziedzinie analizy hybrydowych systemów wytwórczych, przedstawiono obecny stan systemu elektroenergetycznego w Polsce i scharakteryzowano technologię zgazowania paliwa z odpadów. W drugiej części opracowano modele matematyczne, przeprowadzono symulacje i dokonano analiz wielokryterialnych hybrydowych instalacji OZE. W tej części przeanalizowano dwie konfiguracje HIOZE: sprzedającą energię elektryczną jedynie do systemu elektroenergetycznego (scenariusz A) oraz pokrywającej zapotrzebowanie odbiorcy przemysłowego i sprzedającą do systemu jedynie nadwyżki (scenariusz B).

2. Skrócony opis metodologii analiz hybrydowych instalacji OZE

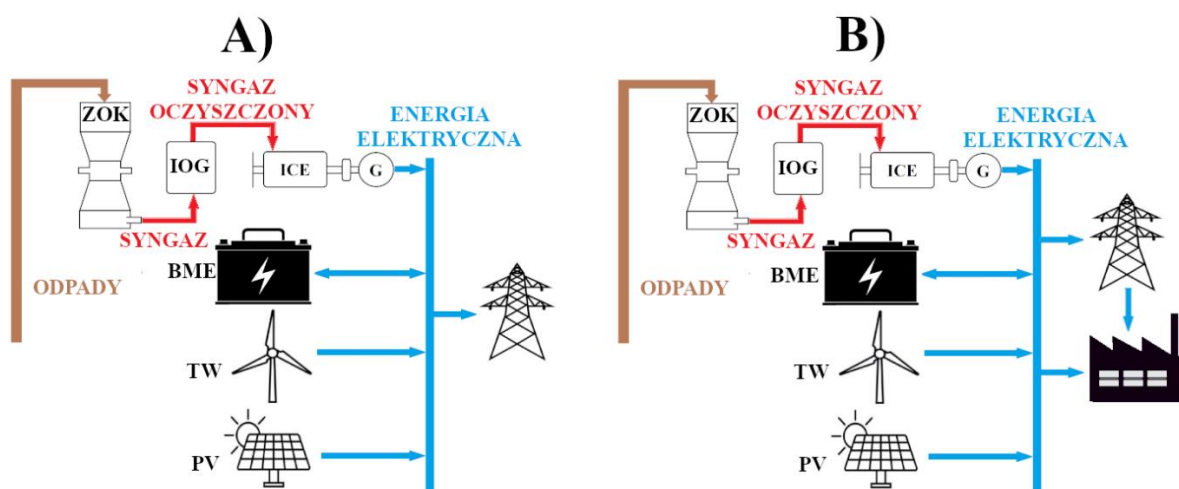
2.1. Struktura analiz

Zaproponowana metoda oparta jest na analizie wielokryterialnej. Analizę podzielono na sześć etapów. Pierwszym etapem jest określenie zakresu analiz. W ramach tego kroku określana jest moc przyłączeniowa układu, oraz zakresy mocy źródeł i magazynów (zakładana jest również wartość współczynnika C-rate) energii elektrycznej. Kolejnym etapem jest dokonanie badań symulacyjnych każdego rozkładu parametrów HIOZE w zakresie analiz. Parametrami układu są moc źródeł niesterowalnych P_{PV+TW} oraz wynikające z niej wskaźniki określające stosunek mocy ICE oraz BME do mocy źródeł PV i turbin wiatrowych (P_{ICE}/P_{PV+TW} oraz P_{BME}/P_{PV+TW}). Na podstawie uzyskanych wyników stwierdza się czy układy spełniają wymagania ustawowe (niespełnienie któregoś z nich powoduje wyłączenie danego rozwiązania dalszych rozważań). Następnie, obliczane są wartości wskaźników energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych. Wykorzystując te wartości, przeprowadzana jest analiza wielokryterialna. Jej efektem jest wyznaczenie wartości syntetycznego miernika oceny. Na tej podstawie szeregowane są rozwiązania i tworzony jest ranking preferencji pozwalający na wybór najkorzystniejszego z rozwiązań.

W pracy zaproponowano układy hybrydowe składające się ze źródeł fotowoltaicznych, turbin wiatrowych, baterijnego magazynu energii oraz instalacji zgazowania odpadów komunalnych zintegrowanej z agregatem silnikowym. Analizie poddano dwie konfiguracje układu:

- Scenariusz A: HIOZE sprzedająca energię do systemu elektroenergetycznego – oznaczana jako HIOZE A,
- Scenariusz B: HIOZE pracująca w celu pokrycia zapotrzebowania odbiorcy przemysłowego w ramach linii bezpośredniej oraz sprzedaży nadwyżek do systemu elektroenergetycznego – oznaczana jako HIOZE B.

Schematy koncepcyjne obu układów przedstawiono rysunku 1. W przypadku HIOZE A jedynym odbiorcą energii elektrycznej wyprodukowanej w instalacji hybrydowej jest system elektroenergetyczny. Produkcja energii elektrycznej musi charakteryzować się parametrami wynikającymi z definicji hybrydowej instalacji OZE zawartej w ustawie o OZE i opisane w rozdziale 1.1. Ponadto maksymalna moc elektryczna przekazywana do systemu jest równa mocy przyłączeniowej. W wypadku przekroczenia tej wartości, generacja jest ograniczana. Transfer energii elektrycznej może być skierowany jedynie od hybrydowej instalacji do systemu elektroenergetycznego. Magazynowana jest jedynie energia pochodząca z instalacji hybrydowej. Nie jest możliwe magazynowanie energii z systemu elektroenergetycznego. Priorytet mają źródła nieemisyjne. Układ zgazowania wykorzystywany jest w celu maksymalizacji generacji energii elektrycznej.



Rys. 1. Schematy koncepcyjne układów: A) HIOZE A, B) HIOZE B
gdzie, ZOK – zgazowarka frakcji energetycznych odpadów komunalnych, IOG – instalacja
oczyszczania gazu, TW – turbiny wiatrowe i PV – źródła fotowoltaiczne.

W HIOZE A w pierwszej kolejności do systemu elektroenergetycznego wprowadzana jest energia elektryczna pochodząca ze źródeł fotowoltaicznych i turbin wiatrowych. W przypadku przekroczenia mocy przyłączeniowej, nadwyżka kierowana jest do magazynu energii elektrycznej. W przypadku, gdy suma mocy źródeł niesterowalnych jest mniejsza niż moc przyłączeniowa, w zależności od sytuacji magazyn może być: ładowany (gdy uruchomiona generacja przekracza moc przyłączeniową), rozładowywany (gdy suma generacji z OZE i ICE jest mniejsza niż moc przyłączeniowa) lub nieobciążony. Silnik jest uruchamiany po wystąpieniu różnicy między mocą źródeł niesterowalnych, a zadeklarowaną mocą przyłączeniową (oraz mocą ładowania baterii). Różnica musi być wyższa niż minimalna moc z jaką pracować może silnik. Bateria magazyn energii oraz agregat silnikowy nie mogą przekroczyć swojej mocy znamionowej. W przypadku magazynu dodatkowymi ograniczeniami są: maksymalny i minimalny stopień naładowania.

W przypadku HIOZE B priorytetem jest zasilenie odbiorcy przemysłowego w ramach linii bezpośredniej. Nadwyżki energii elektrycznej sprzedawane są do systemu elektroenergetycznego w ramach HIOZE. Z tego względu, w kontekście sprzedaży energii do systemu elektroenergetycznego, muszą być spełnione takie same wymagania jak w HIOZE A. Dodatkowo, obowiązują takie same wytyczne dotyczące maksymalnej mocy przesyłanej do systemu elektroenergetycznego, priorytetu OZE nad zgazowaniem jak w HIOZE A. Różnicą jest wymiana energii z siecią elektroenergetyczną. O ile nadal nie jest możliwy transfer energii z systemu elektroenergetycznego do BME, tak odbiorca może być zasilany również z sieci elektroenergetycznej. Główną różnicą w algorytmach działania obu konfiguracji jest to, że w przypadku HIOZE B, zmienna jest wartość maksymalnej mocy, która może zostać odebrana z instalacji hybrydowej. Zależy ona zarówno od zadeklarowanej mocy przyłączeniowej jak i zapotrzebowania odbiorcy przemysłowego, którego wartość jest zmienna w czasie. Rozdział obciążeń pomiędzy części składowe HIOZE następuje według algorytmu analogicznego do HIOZE A. Na koniec generacja w instalacji hybrydowej jest rozdzielana pomiędzy odbiorcę przemysłowego oraz system elektroenergetyczny.

2.2. Studium przypadku

W HIOZE A: określono moc przyłączeniową $P_{PRZYŁ}$ (oraz maksymalny wolumen generowanej energii elektrycznej); moc zainstalowana OZE wynosi 100-300% mocy przyłączeniowej z krokiem odpowiadającym 50% $P_{PRZYŁ}$; znamionowa moc elektryczna

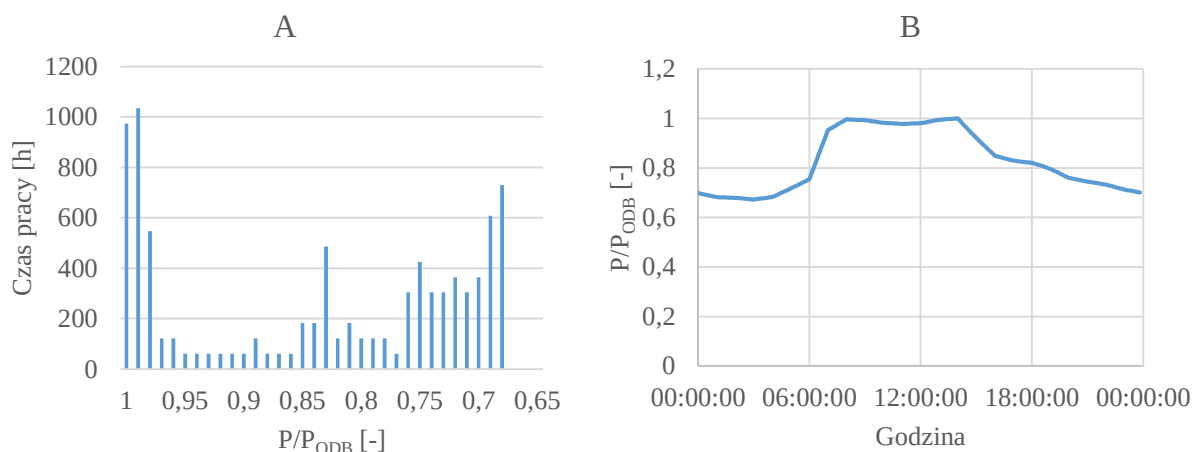
układu zgazowarka-silnik gazowy wynosi 5-100% mocy przyłączeniowej z krokiem co 5%; znamionowa moc elektryczna magazynu wynosi 5-100% mocy przyłączeniowej z krokiem co 5%. Założono, że wszystkie BME charakteryzują się wskaźnikiem C-rate na poziomie 0,5. W HIOZE B: określono maksymalne zapotrzebowanie na moc odbiorcy przemysłowego oraz roczny przebieg zapotrzebowania (na tej podstawie obliczono $P_{PRZYŁ}$ tak, aby maksymalny wolumen generowanej energii elektrycznej był równy otrzymanemu w HIOZE A); moce zainstalowana OZE, ICE oraz moc i pojemność BME są analizowane w takich samych przedziałach jak w HIOZE A. Parametry układów dla których przeprowadzono analizę zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Szczegółowe parametry analizowanych układów

HIOZE	$P_{PRZYŁ}$	P_{ODB}	E_{max}	P_{PV+TW}		P_{ICE}		P_{BME}		K_{BME}	
	MW	MW	MWh	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
				MW	MW	MW	MW	MW	MW	MWh	MWh
A	2	-	17520	6	2	2	0,1	2	0,1	4	0,2
B	0,754	1,5	17520	6	2	2	0,1	2	0,1	4	0,2

gdzie, P_{ODB} – maksymalny pobór mocy odbiorcy przemysłowego, E_{max} – suma energii możliwej do przekazania do systemu elektroenergetycznego i odbiorcy, K_{BME} – znamionowa pojemność BME.

W celu poprawnego oddania charakteru odbiorcy przemysłowego, w badaniach wykorzystano jako wzór standardowe profile zużycia energii na 2021 rok dla grupy odbiorców B pochodzące od operatora sieci dystrybucyjnej Enea Operator [41]. Na rysunku 2, przedstawiono roczny rozkład zapotrzebowania.



Rys. 2. Zapotrzebowanie odbiorcy przemysłowego: A) histogram roczny, B) średnioroczny przebieg dobowy.

Wsadem do układu zgazowania są odseparowane frakcje energetyczne zmieszanych odpadów komunalnych czyli pre-RDF. Skład morfologiczny tych frakcji określono na podstawie raportu IOS-PIB [4]. Następnie, wykorzystując dane zawarte w publikacji [42] oszacowano średni skład pierwiastkowy paliwa z odpadów. Wyniki zamieszczono w tabeli 3. Odpady charakteryzują się dużą zmiennością składu (nawet te, które poddano procesowi selekcji jak w przypadku pre-RDF). W celu uwzględnienia w analizie zmienności składu paliwa, w programie Scilab, zaimplementowano generator liczb pseudolosowych. W każdej godzinie analizowanego roku skład odpadów różni się od siebie. Założono, że zawartość każdego z pierwiastków zmienia się o maksymalnie $\pm 10\%$ od wartości średniej.

W przypadku wykorzystania energetycznego odpadów istotną kwestią jest ich dostępność na danym obszarze. Sprowadzanie ich z dalszych rejonów nie jest zasadne, gdyż wymaga ponoszenia kosztów (środowiskowych oraz ekonomicznych) przy transporcie paliwa o stosunkowo małej gęstości i kaloryczności. Z tego względu w badaniu przyjęto

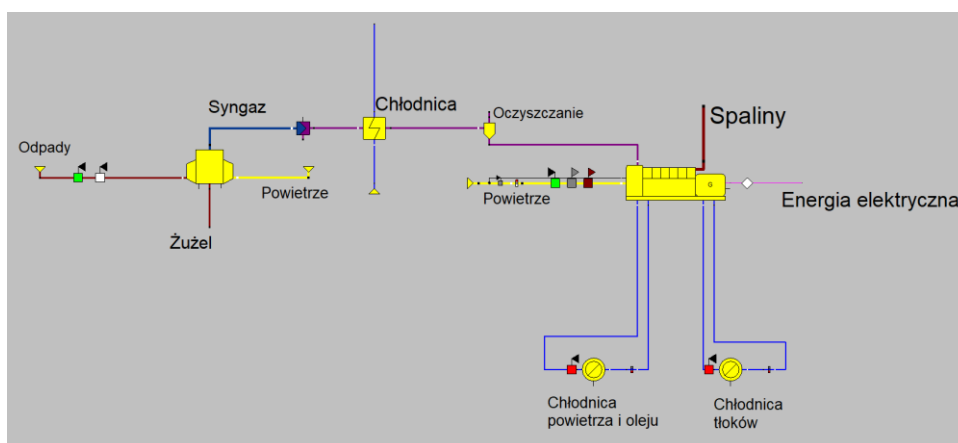
wartość rocznego strumienia masy odpadów dostępnego na obszarze bliskim HIOZE. Wartość tą określono na podstawie danych pochodzących z GUS [43]. Odpowiada ona medianie masy frakcji energetycznych zmieszanych odpadów komunalnych pochodzących z powiatu w województwie wielkopolskim. Na podstawie analizy z lat 2010-2023 wyznaczono wartość wynoszącą 15305,71 ton odpadów zmieszanych zebranych w ciągu roku. Z tej wartości, zakładając 34,5% [4] przypadające na frakcję energetyczną, otrzymano wartość 5280,47 ton frakcji palnych odpadów komunalnych.

Tabela 3. Średni skład frakcji energetycznej zmieszanych odpadów komunalnych

Składnik	Udział frakcji	Skład pierwiastkowy							
		H ₂ O	C	H	O	N	S	Popiół	Cl
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Papier i tektura	37,10	25,00	30,25	3,99	31,00	0,13	0,13	9,50	0,00
Tworzywa sztuczne	46,67	8,00	54,45	7,30	21,74	0,97	1,07	4,29	2,18
Drewno	1,74	20,00	38,24	5,20	35,46	0,40	0,04	0,64	0,01
Opakowania wielomateriałowe	4,93	4,71	43,17	5,88	43,36	0,17	0,08	2,64	0,00
Tekstylia	9,57	10,00	39,54	3,91	34,97	0,79	0,82	9,96	0,02
Średni skład pierwiastkowy		14,55	43,21	5,64	27,74	0,59	0,63	6,62	1,02

2.3. Model instalacji hybrydowej

Modele wszystkich elementów składowych wykonano w programie Ebsilon®Proffesional. Na rysunku 3 zamieszczono schemat modelu zgazowarka – silnik tłokowy – generator.



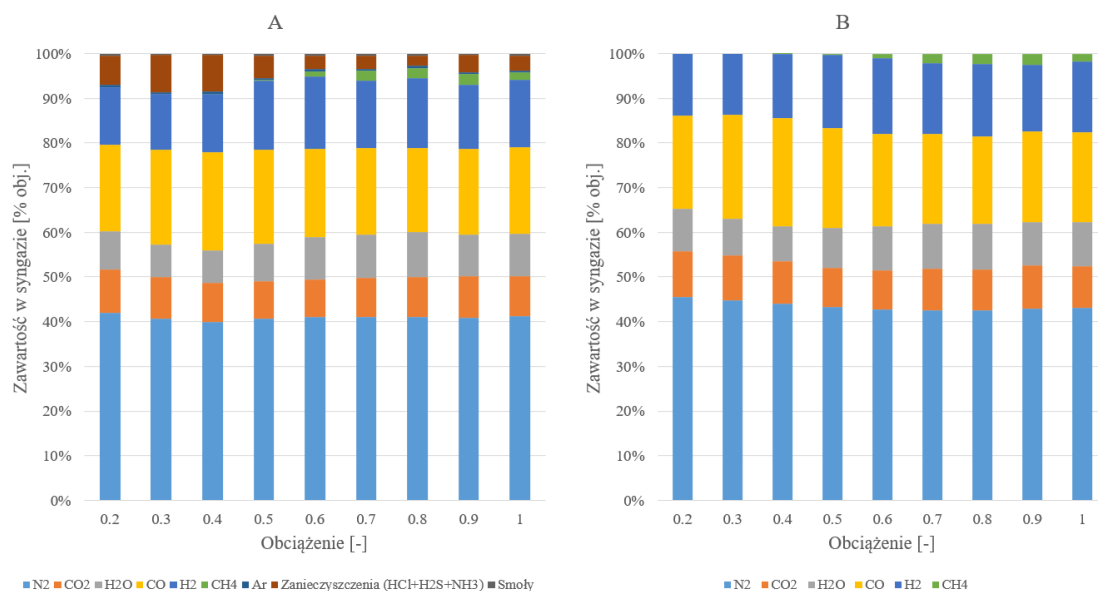
Rys. 3. Model zgazowarki z agregatem silnikowym.

Zgazowarkę zamodelowano przy pomocy pojedynczego komponentu *Biomass gasifier*. Komponent wykorzystuje równania konwersji tlenku węgla z parą wodną oraz kod *Chemical Equilibrium with Applications* opracowany przez NASA [44]. W celu dobrania odpowiednich wartości powyższych parametrów, wykorzystano genetyczny algorytm optymalizacyjny zaimplementowany w oprogramowaniu. Jego celem była minimalizacja odchyleń między wartościami docelowymi, a uzyskiwanymi w wyniku symulacji. Jako docelowe parametry pracy zgazowarki przyjęto wartości literaturowe, pozyskane z pracy [45]. W pracy tej, na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczono m. in. sprawność zgazowania, wartość opałową gazu, współczynnik nadmiaru powietrza, temperaturę w poszczególnych strefach reakcji. Parametry są przedstawione w szerokim zakresie obciążenia. Dodatkowo dostępny jest skład gazu przy obciążeniu znamionowym. Aby jak najlepiej dobrać parametry modelu, wykorzystano skład pierwiastkowy drewna sosnowego (drewno sosnowe było wykorzystane w badaniu [45]) pochodzący z pracy [46]. Uzyskane wyniki porównano z danymi literaturowymi i przedstawiono w tabeli 4. Następnie, dokonano symulacji w celu wyznaczenia składu i kaloryczności syngazu oraz sprawności

zgazowania pre-RDF. Jako paliwo wykorzystano odpady o składzie przedstawionym w tabeli 3. Zmiany składu gazu przy zmianie obciążenia przedstawiono na wykresie 4.

Tabela 4. Walidacja modelu zgazowarki

Obciążenie	Q _w		η		λ		Temperatura gazu	
%	MJ/Nm ³		-		-		°C	
	Literatura	Model	Literatura	Model	Literatura	Model	Literatura	Model
100	5.675	5.730	0.694	0.696	0.260	0.258	550	531
90	5.750	5.749	0.713	0.712	0.251	0.251	538	541
80	5.800	5.780	0.716	0.716	0.249	0.249	526	527
70	5.800	5.801	0.713	0.712	0.251	0.252	516	526
60	5.775	5.731	0.703	0.700	0.262	0.261	505	506
50	5.750	5.738	0.688	0.687	0.278	0.274	497	496
40	5.675	5.699	0.665	0.665	0.299	0.277	489	472
30	5.550	5.553	0.636	0.636	0.325	0.283	480	466
20	5.375	5.402	0.600	0.604	0.358	0.289	473	456
Zawartość w syngazie oczyszczonym								
N ₂		CO ₂		CO		H ₂		CH ₄
% obj.		% obj.		% obj.		% obj.		% obj.
Literatura	Model	Literatura	Model	Literatura	Model	Literatura	Model	Literatura
41.0	42.6	11.6	11.8	25.8	24.8	19.5	18.7	2.2



Rys. 4. Skład syngazu przy zmiennym obciążeniu i zgazowaniu odpadów: A) syngaz surowy, B) syngaz oczyszczony.

Modele źródeł energii elektrycznej oparto na charakterystykach rzeczywistych urządzeń. Agregat gazowy zamodelowany został na bazie charakterystyk eksploatacyjnych silnika CG 132B-12. Ze względu na wykorzystanie niskokalorycznego gazu, sprawność znamionowa wynosi 35%. W przypadku paneli PV wykorzystano model JAM66S30-500/MR. Na podstawie kart katalogowych przyjęto współczynnik zmiany napięcia względem temperatury wynoszący -0,275 %/°C i współczynnik zmiany natężenia względem temperatury panelu równy 0,045 %/°C. Efektem tego jest ujemny temperaturowy współczynnik mocy. Turbiny wiatrowe zamodelowano na podstawie turbin GE 2.5–120. Zamodelowany magazyn charakteryzuje się następującymi parametrami: C-rate równe 0,5 A/Ah, napięcie pojedynczej baterii równe 10 V, pojemność pojedynczej baterii równa 100 Ah, rezystancja wewnętrzna baterii równa 0,02 Ω, zakres pracy magazynu 10%-100% pojemności.

2.4. Metodologia wyznaczania wskaźników energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych

Pierwszym krokiem analiz jest sprawdzenie zgodności działania HIOZE z ustawą o OZE. Na podstawie wyników symulacji obliczono wartości czasu wykorzystania mocy przyłączeniowej (wzór 1 dla HIOZE A i wzór 2 dla HIOZE B) oraz udział magazynu w całkowitej energii elektrycznej przesyłanej do systemu elektroenergetycznego (wzór 3 dla HIOZE A i wzór 4 dla HIOZE B). W ramach dalszej analizy uwzględniono jedynie te układy, które spełniają warunki ustawy (wzór 5).

$$T_{wyk} = \frac{E_{HIOZE}}{P_{PRZYŁ}} \quad (1)$$

$$T_{wyk} = \frac{E_{SYS}}{P_{PRZYŁ}} \quad (2)$$

$$\sigma_{MAG} = \frac{E_{BME}^r}{E_{HIOZE}} 100\% \quad (3)$$

$$\sigma_{MAG} = \frac{\sum_{o=1}^{52560} P_{BME}^{r,o,SYS} \Delta t}{E_{SYS}} 100\% \quad (4)$$

$$T_{wyk} \geq 5256 h \wedge \sigma_{MAG} \geq 5\% \quad (5)$$

Gdzie, T_{wyk} – czas wykorzystania mocy przyłączeniowej [h], $P_{PRZYŁ}$ – moc przyłączeniowa [MW], E_{HIOZE} – roczna generacja energii w instalacji hybrydowej [MWh] Δt – długość pojedynczego okresu [h], E_{BME}^r – roczna energia elektryczna pochodząca z rozładowywania BME [MWh], E_{SYS} – energia elektryczna z HIOZE sprzedawana do systemu elektroenergetycznego [MWh], $P_{BME}^{r,o,SYS}$ – moc z BME trafiająca do systemu elektroenergetycznego [MW], σ_{MAG} – udział energii przekazanej poprzez BME w całkowitej wartości energii przesyłanej do systemu elektroenergetycznego [%].

W kolejnym kroku, w układach spełniających zależność przedstawioną we wzorze 5, wyznaczono zużycie paliwa (wzór 6), wartość ograniczanej generacji energii elektrycznej wynikającą z przekroczenia mocy przyłączeniowej w poszczególnych okresach (wzór 7), a w układzie HIOZE B także wartość energii elektrycznej trafiającej z HIOZE do systemu elektroenergetycznego (wzór 8) oraz do odbiorcy (wzór 9).

$$B_{OK} = \sum_{o=1}^{52560} B_{OK}^o \Delta t \quad (6)$$

$$E_{nad} = \sum_{o=1}^{52560} P_{nad}^o \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$E_{SYS} = \sum_{o=1}^{52560} P_{SYS}^o \Delta t \quad (8)$$

$$E_{ODB} = \sum_{o=1}^{52560} (P_{PV}^o + P_{WT}^o + P_{ICE}^o + P_{BME}^{r,o} - P_{BME}^{l,o} - P_{SYS}^o - P_{nad}^o) \Delta t \quad (9)$$

Gdzie, B_{OK} – roczne zużycie odpadów [kg], B_{OK}^o – strumień masy odpadów w okresie o [kg/h], E_{nad} – roczna wartość ograniczanej generacji energii elektrycznej [MWh], P_{nad}^o – nadwyżka mocy OZE nad moc przyłączeniową i moc ładowania magazynu w okresie o [MW], E_{SYS} – energia elektryczna z HIOZE sprzedawana do systemu elektroenergetycznego [MWh], P_{ODB}^o – zapotrzebowanie odbiorcy na moc w okresie o [MW], P_{SYS}^o – moc HIOZE na przyłączy do systemu elektroenergetycznego w okresie o [MW], E_{ODB} – energia elektryczna z HIOZE zasilająca odbiorcę przemysłowego [MWh],

P_{PV}^o – moc PV w okresie o [MW], P_{nad}^o – nadwyżka mocy OZE nad moc przyłączeniową i moc ładowania magazynu w okresie o [MW], P_{TW}^o – moc turbin wiatrowych w okresie o [MW], P_{ICE}^o – moc silnika gazowego w okresie t [MW], $P_{BME}^{r,o}$ – moc rozładowania BME w okresie o [MW], $P_{BME}^{l,o}$ – moc ładowania BME w okresie o [MW].

W kolejnym etapie wyznaczono wartości wskaźników ekonomicznych instalacji. W tym celu obliczono całkowite nakłady inwestycyjne (CAPEX) według wzoru 10 oraz roczne koszty eksploatacyjne (OPEX) według wzoru 11. Na podstawie tych parametrów oraz generacji energii w HIOZE wyznaczano jednostkowy koszt wytwarzania energii elektrycznej (LCOE) według wzoru 12.

$$CAPEX = \sum_{t=0}^N (K_{in_PV}^t + K_{in_TW}^t + K_{in_BME}^t + K_{in_ZOK}^t + K_{in_ICE}^t + K_{in_IOG}^t + K_{in_poz}^t)(1+r)^{-t} \quad (10)$$

$$OPEX_t = (K_{e_PV}^t + K_{e_TW}^t + K_{e_BME}^t + K_{e_ZOK}^t + K_{e_ICE}^t + K_{e_IOG}^t + k_{CO2}M_{CO2} - k_{OK}B_{OK})(1+r)^{-t} \quad (11)$$

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^N OPEX_t(1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^N E_{HIOZE}(1+r)^{-t}} \quad (12)$$

Gdzie, $CAPEX$ – całkowite koszty inwestycyjne [PLN], $K_{in_PV}^t$ – koszty inwestycyjne instalacji PV w roku t [PLN], $K_{in_TW}^t$ – koszty inwestycyjne turbin wiatrowych w roku t [PLN], $K_{in_BME}^t$ – koszty inwestycyjne BME w roku t [PLN], $K_{in_ZOK}^t$ – koszty inwestycyjne instalacji zgazowania w roku t [PLN], $K_{in_ICE}^t$ – koszty inwestycyjne silnika w roku t [PLN], $K_{in_IOG}^t$ – koszty inwestycyjne instalacji oczyszczania gazu w roku t [PLN], $K_{in_poz}^t$ – pozostałe koszty inwestycyjne instalacji zgazowanie – silnik gazowy (w tym koszty pośrednie, budowy, projektu itp.) [PLN], $OPEX_t$ – całkowite koszty eksploatacyjne w roku t [PLN], $K_{e_PV}^t$ – koszty eksploatacyjne instalacji PV w roku t [PLN], $K_{e_WT}^t$ – koszty eksploatacyjne turbin wiatrowych w roku t [PLN], $K_{e_BME}^t$ – koszty eksploatacyjne BME w roku t [PLN], $K_{e_ZOK}^t$ – koszty eksploatacyjne instalacji zgazowania w roku t [PLN], $K_{e_ICE}^t$ – koszty eksploatacyjne silnika w roku t [PLN], $K_{e_IOG}^t$ – koszty eksploatacyjne instalacji oczyszczania gazu w roku t [PLN], r – stopa dyskonta [-], t – analizowany rok, $LCOE$ – jednostkowy koszt wytwarzania energii elektrycznej [PLN/MWh], k_{CO2} – koszt uprawnień do emisji CO₂ [PLN/t], M_{CO2} – roczna emisja CO₂ [t], k_{OK} – koszt odpadów „na bramie” [PLN/t].

W każdym z rozwiązań przyjęto, że proces inwestycji trwa 1 rok, a eksploatacja 20 lat. Dodatkowo, ze względu na fakt, że zarówno silnik jak i BME mają krótszy czas życia niż 20 lat, założono, że w okresie eksploatacji dojdzie do wymiany tych elementów. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne związane z poszczególnymi elementami układu obliczono na podstawie równań kosztów pochodzących z literatury: koszty zgazowarki z pracy [47], koszty instalacji oczyszczania gazu z pracy [48], koszty agregatu gazowego oraz pozostałe koszty instalacji zgazowania z pracy [7], koszty źródeł niesterowalnych z raportu [49], a koszty BME z [50].

Maksymalna cena energii elektrycznej sprzedawanej do systemu w ramach HIOZE jest określana przez przepisy prawne [1]. Przyjęto, że cena maksymalna będzie uwzględniana jako cena sprzedaży energii elektrycznej w dalszych analizach. W celu zobrazowania opłacalności instalacji, wyznaczono zysk lub stratę na pojedynczej jednostce energii. Obliczoną ją jako różnicę między:

- ceną ustawową a LCOE – HIOZE A (wzór 13),

- średnią ważoną ceny ustawowej oraz ceny zakupu przez przedsiębiorstwo a LCOE – HIOZE B (wzór 14).

$$\Delta C = C_{ust} - LCOE \quad (13)$$

$$\Delta C = \frac{C_{ust}E_{SYS} + C_{ODB}E_{ODB}}{E_{SYS} + E_{ODB}} - LCOE \quad (14)$$

Gdzie, C_{ust} – cena ustawowa [PLN/MWh], ΔC – różnica między kosztami produkcji, a cenami sprzedaży energii elektrycznej [PLN/MWh].

W analizie założono, że układ będzie włączony w system EU ETS, a zatem ponosi dodatkowe koszty emisji CO₂. O ile dotychczas instalacje przetwarzające odpady zwolnione są z tego obciążenia, tak wewnątrz Unii Europejskiej trwają prace nad włączeniem ITPO w EU ETS [53]. Ze względu na fakt, że część pre-RDF podlega biodegradacji (i w efekcie uznawana jest za odnawianą), objęta opłatami będzie emisja jedynie z pozostałych frakcji. Wartości pozostałych parametrów niezbędnych w analizie ekonomicznej przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wejściowe parametry ekonomiczne

Parametr	Wartość	Jednostka
Stopa dyskonta	4,35	%
Cena zakupu energii elektrycznej przez przedsiębiorstwo C_{ODB} [51]	502,20	PLN/MWh
Koszt uprawnień do emisji CO ₂ [52]	277,21	PLN/t
Część odpadów uznawana za odnawialną	42	%
Czas inwestycji	1	Rok
Czas eksploatacji	20	Lat
Czas życia BME	10	Lat
Czas życia ICE	60000	h
Koszt odpadów “na bramie”	350	PLN/t
Kurs euro	4.25	PLN/EUR
Kurs dolara	3.75	PLN/USD

Jako ostatnie wyznaczono wskaźniki środowiskowe. Oddziaływanie instalacji na środowisko odbywa się przez emisję CO₂ oraz przez utylizację frakcji energetycznych odpadów komunalnych. Jednostkowy wskaźnik emisji CO₂ liczony jest według wzoru 15, a drugi wskaźnik – różnica między odpadami dostępnymi lokalnie, a ich wykorzystaniem według wzoru 16.

$$Ef_{CO_2} = \frac{\sum_{i=1}^{52560} 600 \cdot M_{CO_2}^i}{E_{HIOZE}} \quad (15)$$

$$\Delta B = \left| B_{OK}^{lok} - \frac{B_{OK}}{1000} \right| \quad (16)$$

Gdzie, Ef_{CO_2} – wskaźnik emisji CO₂ [kg/MWh], $M_{CO_2}^i$ – strumień masy CO₂ w okresie i [kg/s], ΔB – różnica między frakcją palną odpadów dostępną lokalnie, a jej wykorzystaniem [t], B_{OK}^{lok} – roczna masa frakcji palnej odpadów dostępna lokalnie [t].

2.5. Metodologia analiz wielokryterialnych

W pracy wykorzystano metodę TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*). Bazuje ona na kryterium syntetycznym wyznaczanym przez agregację wartości kryteriów poszczególnych wariantów decyzyjnych. Pozwala na stworzenie rankingu preferencji analizowanych wariantów [54]. Wyznaczane są warianty: idealny (PIS – Positive Ideal Solution) oraz antyidealny (NIS – Negative Ideal Solution). Następnie obliczane są odległości analizowanych scenariuszy od obu skrajnych wariantów. Na tej podstawie wyznacza się wartość syntetycznego wskaźnika oceny (jak najmniejsza

odległość od PIS i jak największa od NIS [55]), który umożliwia stworzenia rankingu porównawczego wszystkich scenariuszy i wybór najkorzystniejszego.

Zastosowaną w pracy metodę można podzielić na szereg etapów [54,56]: wybór parametrów decyzyjnych → wyznaczenie wartości parametrów według wzorów opisanych w poprzednich podrozdziałach i stworzenie macierzy decyzyjnej $D=[d_{ij}]$ → wyznaczenie wektora wag $W=[w_1, \dots, w_n]$ → standaryzacja macierzy decyzyjnej $Z=[z_{ij}]$ według wzoru 17 (wykorzystując średnią $\bar{d}$ oraz odchylenie standardowe σ) → wyznaczenie znormalizowanej ważonej macierzy decyzyjnej $V=[v_{ij}]_{mn}$ na podstawie macierzy z_{ij} oraz wektora W (wzór 18) → na podstawie macierzy V wyznaczenie wariantu idealnego $PIS=[v_1^+, \dots, v_n^+]$ (wzór 19) oraz antyidealnego $NIS=[v_1^-, \dots, v_n^-]$ (wzór 20) → obliczenie odległości i -tego wariantu od PIS (wzór 21) oraz NIS (wzór 22) → wyznaczenie miernika syntetycznego (wzór 23).

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{d_{ij} - \bar{d}}{\sigma} & \text{dla kryteriów typu zysk} \\ \frac{\bar{d} - d_{ij}}{\sigma} & \text{dla kryteriów typu strata} \end{cases} \quad (17)$$

$$v_{ij} = w_j z_{ij} \quad (18)$$

$$v_j^+ = \begin{cases} \max v_{ij} & \text{dla kryteriów typu zysk} \\ \min v_{ij} & \text{dla kryteriów typu strata} \end{cases} \quad (19)$$

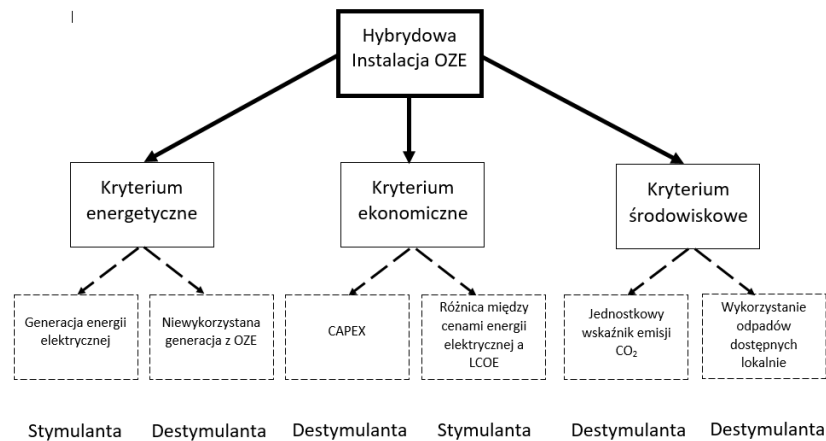
$$v_j^- = \begin{cases} \min v_{ij} & \text{dla kryteriów typu zysk} \\ \max v_{ij} & \text{dla kryteriów typu strata} \end{cases} \quad (20)$$

$$o_i^+ = \sum_{j=1}^n \sqrt{(v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (21)$$

$$o_i^- = \sum_{j=1}^n \sqrt{(v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (22)$$

$$T = \frac{o_i^-}{o_i^+ + o_i^-} \quad (23)$$

Do przeprowadzenia analizy wielokryterialnej HIOZE postanowiono wykorzystać trzy kategorie kryteriów decyzyjnych: energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe. Dzięki temu możliwe jest holistyczna analiza takiej instalacji z punktu widzenia inwestora. Wewnątrz tych kategorii zdecydowano się przyjąć po dwa wskaźniki. Schemat przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Schemat analizy wielokryterialnej

Wykorzystane w analizie wskaźniki można podzielić na stymulanty – im wyższa wartość tym jest korzystniejsza, oraz destymulanty – im niższa wartość tym jest korzystniejsza. W tabeli 6 scharakteryzowano krótko wybrane wskaźniki.

Tabela 6. Charakterystyka wskaźników

Numer wskaźnika	Wskaźnik	Kategoria	Znaczenie
K1	Generacja energii elektrycznej	Stymulanta	Im większa sprzedaż energii do systemu oraz (w HIOZE B) większe pokrycie zapotrzebowania odbiorcy przemysłowego tym korzystniejszy jest badany układ.
K2	Niewykorzystana generacja z OZE	Destymulanta	Wskaźnik określa generację z niesterowalnych OZE, która musi zostać ograniczona ze względu na przekroczenie mocy przyłączeniowej. Im wyższa wartość tym więcej wyprodukowanej energii jest ograniczane, a w efekcie mniej opłacalne jest grupowanie źródeł w ramach HIOZE.
K3	CAPEX	Destymulanta	Im niższa wartość nakładów inwestycyjnych tym lepiej. Wyższe nakłady powodują ograniczenie możliwości inwestycyjnych jedynie do podmiotów dysponujących odpowiednimi środkami lub posiadającymi możliwość do zaciągnięcia odpowiednio wysokich kredytów.
K4	Różnica między cenami energii elektrycznej a LCOE	Stymulanta	Wartości dodatnie wskaźnika obrazują, że układ przynosi zyski. Im wyższa wartość tym wyższy zysk na każdej wyprodukowanej w HIOZE jednostce energii elektrycznej.
K5	Jednostkowy wskaźnik emisji CO ₂	Destymulanta	W dobie dekarbonizacji, redukcja emisji CO ₂ jest kluczowa. Wskaźnik obrazuje średnią masę CO ₂ wyemitowaną z przetwarzania pre-RDF w odniesieniu do każdej wyprodukowanej w HIOZE jednostki energii elektrycznej.
K6	Wartość bezwzględna różnicy między lokalnym pre-RDF a jego wykorzystaniem	Destymulanta	Parametr określa stopień wykorzystania dostępnej lokalnie frakcji energetycznej odpadów komunalnych. Najkorzystniejsze jest całkowite wykorzystanie – a w efekcie domknięcie systemu gospodarki odpadami. Wykorzystanie większej ilości odpadów niż dostępna lokalnie również nie jest korzystne ze względu na konieczność dostarczenia ich z dalszych obszarów.

Celem analiz jest zarówno wybór najkorzystniejszych rozwiązań w świetle danych kryteriów jak i zbadanie wpływu wag poszczególnych kryteriów na wyniki. W efekcie, zarówno w HIOZE A jak i HIOZE B, przeprowadzono analizy dla 42 wariantów rozkładu wag na poszczególne kryteria. pierwszym wariantcie wszystkie wagi mają równą wartość. Następnie, w wariantach 2-7 po kolei wyłączano z analizy poszczególne kryteria poprzez przypisanie im wagi równej 0. Celem tego jest sprawdzenie wpływu braku uwzględnienia w analizie poszczególnych kryteriów. Kolejnym etapem jest przewymiarowanie (dwu-, trzy-, cztero- i pięciokrotne) pojedynczego kryterium względem pozostałych. W wariantach 8-11 przewymiarowano w ten sposób wagę kryterium K₁, w wariantach 12-15 K₂, w wariantach 16-19 K₃, w wariantach 20-23 K₄, w wariantach 24-27 K₅, a w wariantach 28-31 K₆. Dziewięć kolejnych wariantów rozkładu wag opiera się na przewymiarowaniu całych grup kryteriów energetycznych (warianty 32-34), ekonomicznych (warianty 35-37) i środowiskowych (warianty 38-40). Dwa ostatnie warianty stosunków wag zostały określone dla dwóch grup inwestorów, którzy mogą być zainteresowani wykorzystaniem opisywanej HIOZE. Przy doborze wag w wariantcie 41 kierowano się zakładanymi preferencjami komercyjnego inwestora (3:1:2:3:2:1), a w wariantcie 42 preferencjami inwestora komunalnego (2:1:3:1:2:3).

3. Wyniki analiz

3.1. Wyniki analiz HIOZE A

W celu sprawdzenia czy przy danym zestawie wartości parametrów HIOZE (P_{PV+TW} , P_{ICE}/P_{PV+TW} , P_{BME}/P_{PV+TW}) możliwe jest spełnienie wymagań ustawowych wyznaczono czas

wykorzystania mocy przyłączeniowej oraz udział energii przekazanej poprzez magazyn w całkowitej energii elektrycznej sprzedanej do systemu elektroenergetycznego. Następnie, po nałożeniu na siebie obu wynikowych matryc, jako spełniające wymagania (i w efekcie jedyne rozpatrywane dalej) uznawano te które spełniają oba warunki zgodnie z zapisem: $(T_{wyk} \geq 5256) \wedge (\sigma_{MAG} \geq 5\%)$. W tabeli 7 zebrano wyniki dotyczące spełnienia wymagań ustawowych w analizowanych wariantach w HIOZE A. W dalszej części, analizowane są jedynie HIOZE, które spełniają kryteria ustawowe. Na podstawie wyników zawartych w poniższej tabeli można stwierdzić, że ich liczba rośnie logarytmicznie tzn. wzrost liczby rozwiązań spełniających warunki graniczne jest większy przy zmianach w obszarze niewielkich wartości P_{PV+TW} i zmniejsza się przy wyższych wartościach. Jednakże, tendencja rosnąca jest zachowana.

Tabela 7. Podsumowanie doboru parametrów ICE i BME pod kątem spełnienia warunków ustawowych w HIOZE A.

P_{PV+TW}	$P_{PRZYŁ}$	Wartości minimalne		Wartości maksymalne		Liczba rozwiązań spełniających wymagania
		P_{ICE}/P_{PV+TW}	P_{BME}/P_{PV+TW}	P_{ICE}/P_{PV+TW}	P_{BME}/P_{PV+TW}	
MW	MW	-	-	-	-	-
2	2	0,650	0,400	0,900	1,000	56
3	2	0,300	0,167	0,667	0,667	162
4	2	0,125	0,125	0,500	0,500	202
5	2	0,080	0,120	0,400	0,400	213
6	2	0,033	0,100	0,317	0,333	219

Jako pierwsze wyznaczono wartości czasu wykorzystania mocy przyłączeniowej. W każdym z wariantów mocy P_{PV+TW} , najwyższymi wartościami T_{wyk} charakteryzują się HIOZE w których moc BME jest jak najwyższa, a moc ICE jest oddalona zarówno od wartości minimalnych jak i maksymalnych. Wynika to z faktu, że przy mniejszych mocach agregatu silnikowego, nie ma możliwości całkowitego pokrycia mocy przyłączeniowej przez źródła niesterowalne i ICE. Z tego względu dochodzi do rzadszego ładowania magazynu i w efekcie również mniejszego udziału magazynu w generacji. Przy bardzo wysokich mocach ICE, generacja w nich musi być dodatkowo ograniczana, aby możliwe było wprowadzenie do systemu wystarczającej wartości energii elektrycznej z BME. Ponadto, w tych wariantach wyższe jest minimum techniczne silnika, przez co rzadziej dochodzi do jego załączenia. W przypadku większych mocy i pojemności BME, dla tych samych parametrów pozostałych źródeł w HIOZE, większa wartość energii elektrycznej jest magazynowana, a następnie wykorzystywana gdy zmniejsza się generacja w źródłach niesterowalnych. Z tego powodu widoczna jest stała tendencja rosnącej wartości T_{wyk} , wraz ze wzrostem mocy BME.

Następnie wyznaczono wartość ograniczanej generacji ze względu na przekroczenie mocy przyłączeniowej. Im wyższa jest moc P_{PV+WT} tym więcej energii elektrycznej musi zostać ograniczone. Wzrost jest wykładniczy. Przy mocy źródeł niesterowalnych równej 2 MW, przekraczanie mocy przyłączeniowej niemal nie występuje. Przy mocy równej 3 MW, w zależności od konfiguracji, niewykorzystana energia z OZE zawiera się w przedziale 60-96 MWh rocznie. Przy mocy sumarycznej mocy paneli PV i turbin wiatrowych równej 4 MW zakres wzrasta do 284-492 MWh, przy mocy 5 MW ograniczenie generacji zawiera się w przedziale 914-1338 MWh, a przy mocy 6 MW wynosi do 2455 MWh – co odpowiada pracy HIOZE z mocą przyłączeniową przez 1227,5 godziny. Przy wszystkich analizowanych wariantach widoczne jest, że wzrost mocy ICE jest skorelowany ze wzrostem ograniczanej energii. BME częściej jest naładowany, co przekłada się na mniejszą możliwość przyjęcia energii z OZE. Wraz ze wzrostem mocy i pojemności magazynu energii elektrycznej rosną możliwości zmagazynowania i późniejszego wykorzystania nadmiarowej

energii elektrycznej. W efekcie, zmniejsza się wartość energii, która musi zostać ograniczona. Za większość generacji, która przekracza moc przyłączeniową odpowiadają turbiny wiatrowe. Co ciekawe, im wyższe są moce zainstalowane OZE tym za większą część niewykorzystanej generacji odpowiadają źródła wiatrowe.

W kolejnym kroku wyznaczono wartości CAPEX. Im wyższe są moce zainstalowanych urządzeń tym wyższe są koszty inwestycyjne. Najniższe uzyskane wartości wynoszą 43-44 mln PLN. Uzyskano je w HIOZE charakteryzujących się wartością P_{PV+TW} większą od 2 MW. Wynika to z faktu, że źródła fotowoltaiczne i wiatrowe są tańsze (niż ICE lub BME) jednostkowo, przez co zwiększenie ich kosztów (nawet o 1 lub 2 MW) może być skompensowane przez zmniejszenie kosztów BME lub układu zgazowania. Najwyższe wartości kosztów inwestycyjnych uzyskano dla HIOZE w której sumaryczna moc zainstalowana wszystkich urządzeń wynosi około 10 MW. W stosunku do wartości minimalnych, CAPEX wzrasta do wartości 82 mln PLN. Im wyższe są wartości współczynników P_{ICE}/P_{PV+TW} oraz P_{BME}/P_{PV+TW} tym wyższe są również udziały tych źródeł w całkowitych kosztach inwestycyjnych HIOZE. Udział BME w CAPEX wynosi od niespełna 10%, przy niewielkich wartościach P_{BME}/P_{PV+TW} , do około 45% gdy moce P_{BME} i P_{PV+TW} są sobie równe. Koszty układu odzysku energii z odpadów stanowią natomiast od około 9% do ponad 67% wartości CAPEX. Im wyższa jest wartość współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} tym wyższy jest udział w kosztach.

W następnym kroku wyznaczono różnicę między wartościami cen energii i wartościami LCOE. Najwyższe uzyskane wartości zysku na jednostce energii wynoszą do 115 PLN/MWh. Jest to możliwe w przypadku HIOZE o wartościach $P_{PV+TW} - P_{ICE}/P_{PV+TW} - P_{BME}/P_{PV+TW}$ wynoszących odpowiednio 3 MW – 0,567 – 0,3. W HIOZE w których $P_{PV+TW} = 2$ MW maksymalna wartość zysku na jednej jednostce energii elektrycznej wynosiła 78 PLN, a przy $P_{PV+TW} = 4$ MW wynosiła 71 PLN. Przy większych mocach źródeł niesterowalnych możliwe do uzyskania zyski spadały ze względu na rosnące przewymiarowanie źródeł i zwiększające się w efekcie koszty źródeł. Przy układach w których suma mocy zainstalowanej paneli PV i turbin wiatrowych wynosiła 5 lub 6 MW częstsze są wartości ujemne świadczące o stratach. Widoczne jest jednak, że w świetle przyjętych założeń znaczna część analizowanych konfiguracji będzie opłacalna ekonomicznie, ze względu na możliwość sprzedaży energii po cenach wyższych od kosztów produkcji. Należy również zaznaczyć, że w analizie założono uczestnictwo ITPO w systemie EU ETS, co nie jest obecnie przesądzone. W przypadku utrzymania zwolnienia z opłat za emisje, znacząco wzrosłaby opłacalność instalacji.

W kolejnym etapie wyznaczono środowiskowe wskaźniki pracy instalacji tzn. jednostkowy wskaźnik emisji oraz roczne zużycie odpadów na cele produkcji energii elektrycznej. Widoczne jest, że im wyższa jest wartość P_{PV+TW} tym mniejszy jest jednostkowy wskaźnik emisji, co wynika z faktu, że więcej energii elektrycznej generują źródła nieemisyjne, a mniej jest wytwarzane z odpadów. W efekcie najkorzystniejsze wartości wskaźnika (poniżej 300 kg/MWh, a w jednym przypadku nawet 182 kg/MWh) występują przy największej z analizowanych mocy źródeł niesterowalnych. Najwyższe wartości wskaźnika (najmniej korzystne) są rzędu 900-1000 kg/MWh i występują głównie w konfiguracjach z mocą OZE równą 2 MW oraz pojedyncze przy mocy OZE równej 3 MW. Należy wyraźnie zaznaczyć, że przedstawione tu wartości są wartościami obejmującymi całkowitą emisję CO₂. Ze względu na charakter paliwa – pre-RDF – 42% tej wartości uznawane jest za emisję ze źródła odnawialnego. Oznacza to, że emisja CO₂ ze źródeł nieodnawialnych zawierała się w zakresie 106-589 kg/MWh. Nawet w najmniej korzystnej konfiguracji, wskaźnik jest niższy niż średnioroczny dla energetyki w Polsce. Wartości zużycia odpadów i jednostkowej emisji są ze sobą powiązane. Różnicą jest to, że

wskaźnik emisji odnoszony jest do całkowitej produkcji energii w HIOZE. Pomimo tego, najmniejszymi wartościami zużycia odpadów charakteryzują się konfiguracje z mocą P_{PV+TW} równą 6 MW, a największymi układy z mocą równą 2 i 3 MW. Co ciekawe, widoczne jest więcej wyników z najwyższego przedziału przy mocy równej 3 MW w porównaniu do jednostkowego wskaźnika emisji. Pomimo większego zużycia odpadów, rośnie generacja, co przekłada się na niższy wskaźnik emisji.

3.2. Wyniki analiz HIOZE B

Analogicznie jak w przypadku HIOZE A analizę rozpoczęto od sprawdzenia możliwości spełnienia wymagań ustawowych przez HIOZE. Podsumowanie zakresów rozwiązań spełniających wymagania ustawowe zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8. Podsumowanie zakresu parametrów ICE i BME pod kątem spełnienia warunków ustawowych.

P_{PV+TW}	P_{PRZYL}	Wartości minimalne		Wartości maksymalne		Liczba rozwiązań spełniających wymagania
		P_{ICE}/P_{PV+TW}	P_{BME}/P_{PV+TW}	P_{ICE}/P_{PV+TW}	P_{BME}/P_{PV+TW}	
MW	MW	-	-	-	-	-
2	2	0,650	0,150	1,000	1,000	121
3	2	0,400	0,067	0,667	0,667	164
4	2	0,275	0,050	0,500	0,500	184
5	2	0,180	0,040	0,400	0,400	223
6	2	0,133	0,033	0,333	0,333	242

Widoczny w tabeli 8 jest wzrost liczby rozwiązań spełniających oba warunki graniczne wraz ze wzrostem mocy źródeł niesterowalnych. Niemalże nie zmienia się minimalna moc BME, co powoduje stały spadek minimalnej wartości współczynnika P_{BME}/P_{PV+TW} . Jeszcze bardziej zmniejsza się minimalna wartość współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} , co wynika z faktu, że jednocześnie zwiększa się moc P_{PV+TW} i zmniejsza moc agregatu silnikowego. Maksymalne wartości P_{BME} i P_{ICE} są identyczne przy wszystkich mocach P_{PV+TW} . W dalszej części pracy analizowane są jedynie takie rozwiązania, które spełniają oba warunki ustawowe.

Generacja energii elektrycznej w HIOZE zawiera się w zakresie od 14,18 GWh do 17,43 GWh. Osiągnięcie maksymalnych wartości jest możliwe już w układach o mocy źródeł niesterowalnych równej 2 MW. Im wyższa jest moc agregatu silnikowego tym wyższa jest wartość wygenerowanej energii elektrycznej. Odstępstwem od tej reguły są układy o niewielkich wartościach mocy BME i wysokich wartościach mocy ICE. W tych rozwiązaniach aby uzyskać odpowiedni udział magazynu w generacji, konieczne jest ograniczenie pracy silnika. W efekcie zmniejsza się całkowita produkcja energii elektrycznej. Również wzrost mocy magazynu powoduje wzrost generacji energii elektrycznej. Jednakże nie jest on aż tak wysoki jak w przypadku agregatu silnikowego. Średni wzrost wyprodukowanej energii elektrycznej przy wzroście mocy BME o 0,1 MW wynosi 0,071 GWh, a przy wzroście mocy ICE o 0,1 MW wynosi 0,257 GWh. W przypadku mocy ICE może jednak zdarzyć się sytuacja, że jej wzrost będzie związany ze spadkiem generacji (ze względu warunek udziału energii elektrycznej z magazynu).

Następnie wyznaczono wartości ograniczonej generacji ze względu na przekroczenie mocy przyłączeniowej. Wzrost wartości niewykorzystanej generacji jest ściśle zależny od wzrostu mocy źródeł niesterowalnych. Przy braku przewymiarowania HIOZE względem odbioru, sytuacje w których generacja musi zostać ograniczona niemal się nie zdarzają. Przy wzroście mocy $PV+TW$ do 3 MW wartość niewykorzystanej energii elektrycznej z tych źródeł wynosi od 33 MWh do 46 MWh. Wartości zwiększają się wykładniczo przy dalszym wzroście mocy źródeł niesterowalnych i wynoszą: od 299 MWh do 352 MWh przy wartości

P_{PV+TW} równej 4 MW, od 947 MWh do 1121 MWh przy wartości P_{PV+TW} równej 5 MW, od 1867 MWh do 2174 MWh przy wartości P_{PV+TW} równej 6 MW.

W kolejnym etapie wyznaczono wartości kosztów inwestycyjnych oraz zysku na pojedynczej jednostce energii elektrycznej. CAPEX zawiera się w zakresie od 41,2 mln PLN do 83,9 mln PLN. Najwyższą wartością charakteryzuje się HIOZE o najwyższej łącznej mocy zainstalowanej wynoszącej 10 MW – PV 3 MW, turbiny wiatrowe 3 MW, BME 2 MW i ICE 2 MW. Najmniejsza wartość nie jest jednak przy najmniejszej możliwej mocy. 41,2 mln PLN wynosi CAPEX układu o łącznej mocy 4,5 MW – PV 1,5 MW, turbiny wiatrowe 1,5 MW, BME 0,2 MW i ICE 1,3 MW. Przy mniejszych mocach źródeł niesterowalnych konieczne są wyższe moce zainstalowane magazynu energii oraz instalacji zgazowania z agregatem silnikowym. Układy charakteryzują się zdecydowanie wyższymi kosztami jednostkowymi niż PV czy turbiny wiatrowe. Z tego względu CAPEX wynoszący poniżej 50 mln PLN jest możliwy do uzyskania nawet w układach o mocy źródeł niesterowalnych równej 5 i 6 MW. Najdroższym jednostkowo źródłem energii jest instalacja zgazowania odpadów zintegrowana z silnikiem i generatorem. Wzrost mocy generatora o 0,1 MW skutkuje wzrostem CAPEX o 1,7-2 mln PLN w zależności od momentu w którym dochodzi do koniecznej wymiany silnika. Wzrost mocy magazynu skutkuje wzrostem CAPEX o około 1 mln PLN na każde 0,1 MW.

Ze względu na wyższe ceny energii elektrycznej kupowanej przez odbiorcę przemysłowego niż ceny sprzedaży energii w ramach HIOZE, uzyskane w tej konfiguracji zyski na pojedynczej jednostce energii elektrycznej są wyższe niż w przypadku HIOZE A. Wynoszą one od -8 PLN/MWh (strata) do 235 PLN/MWh. W HIOZE A przedział wynosi od -242 PLN/MWh do 114 PLN/MWh. W przypadku HIOZE B jedyne dwie wartości oznaczające stratę są widoczne przy maksymalnych mocach wszystkich źródeł. Poza nimi wszystkie pozostałe wartości są dodatnie, a instalacje hybrydowe przynoszą zyski. Najwyższe wartości są możliwe do osiągnięcia przy sumarycznej mocy P_{PV+TW} równej 2 MW (115-235 PLN/MWh). Nieco niższe wartości osiągane są przy 3 MW (82-227 PLN/MWh). Im wyższa jest moc źródeł tym mniejsze są zyski. Twierdzenie jest prawdziwe zarówno dla źródeł niesterowalnych jak i dla magazynu oraz instalacji zgazowania. Przy wszystkich mocach P_{PV+TW} najkorzystniejsze wartości osiągane są przy niskich mocach ICE oraz BME. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wzrost mocy BME ma większy negatywny wpływ na jednostkowe zyski na sprzedaży energii, niż wzrost mocy ICE. Pomimo tego, że jednostkowy koszt inwestycyjny instalacji zgazowania jest wyższy niż w przypadku BME, tak przyrost mocy ICE wiąże się ze zdecydowanie większym wzrostem generacji energii niż przyrost mocy i pojemności magazynu.

W ostatnim etapie wyznaczono wartości wskaźników środowiskowych. Najmniej korzystne wartości jednostkowego wskaźnika emisji są przy najmniejszych mocach źródeł niesterowalnych. Im wyższa jest ich moc tym mniejsze są wartości jednostkowego wskaźnika emisji. Wynoszą one od 0,487-0,731 t/MWh przy mocy P_{PV+TW} równej 6 MW do 0,979-1,172 t/MWh przy mocy P_{PV+TW} równej 2 MW. Analogicznie jak w przypadku wskaźnika emisji najwyższe wartości zużycia odpadów są przy mocy P_{PV+TW} równej 2 MW i zmniejszają się wraz ze wzrostem tego parametru. Najbliżej docelowej wartości utylizowanej frakcji pre-RDF są rozwiązania z mocą P_{PV+TW} równą 5 MW i 6 MW. Przy mniejszych wartościach tej mocy wykorzystywane jest zbyt dużo odpadów względem lokalnej dostępności. Im wyższe są wartości mocy ICE tym wyższa jest wartość masy utylizowanych odpadów. Jednostajnej zależności nie ma natomiast przy zmianie mocy BME. W zależności od wartości mocy P_{PV+TW} roczna masa utylizowanych odpadów wynosi od 4,74- 7,94 tysięcy ton przy mocy P_{PV+TW} równej 6 MW do 9,95-12,51 tysięcy ton przy mocy P_{PV+TW} równej 2 MW.

3.3. Wyniki analiz wielokryterialnych

Celem pracy, poza opracowaniem metodologii doboru parametrów HIOZE, jest zbadanie wpływu wag poszczególnych kryteriów na wyniki. Zaprezentowane w poprzednich rozdziałach rankingi różniły się w zależności od konfiguracji układu hybrydowego (HIOZE A i HIOZE B). W celu zobrazowania wpływu wag poszczególnych kryteriów na wybrane parametry obu konfiguracji HIOZE zamieszczono wykresy na rysunku 6. Przedstawiono na nich wartości sumarycznej mocy źródeł niesterowalnych oraz współczynników $P_{ICE}P_{PV+TW}$ i $P_{BME}P_{PV+TW}$. Wartości zostały określone jako średnie arytmetyczne z 10 najkorzystniejszych rozwiązań w każdym z wariantów wag.



Rys 6. Porównanie najkorzystniejszych rozwiązań we wszystkich wariantach wag w zakresie: A) mocy O , B) wartości wskaźnika P_{BME}/P_{PV+TW} oraz C) wartości wskaźnika P_{ICE}/P_{PV+TW} .

Porównując między sobą układy HIOZE A oraz HIOZE B można zauważyć, że w układach, które poza sprzedażą energii do systemu elektroenergetycznego pokrywają zapotrzebowanie odbiorcy, częściej występują wyższe moce źródeł niesterowalnych. Sytuacje w których parametr P_{PV+TW} wyższy jest w HIOZE A występują jedynie przy niewielkim przewymiarowaniu wagi K_1 , w sytuacji gdy kryterium K_4 ma wysoką wagę oraz przy przypisaniu wartości równej 0 kryteriom K_3 i K_6 . W pozostałych przypadkach parametr

P_{PV+TW} ma wyższą wartość w HIOZE B lub w obu konfiguracjach wartości są sobie równe. Widoczne jest również to, że przy przewymiarowaniu wartości kryterium K_6 oraz całej grupy kryteriów środowiskowych różnica między wartościami w obu konfiguracjach HIOZE jest znacząca. W układzie HIOZE A zużycie odpadów zbliżone do docelowego występuje głównie w układach z mocą P_{PV+TW} równą 3 lub 4 MW, a w przypadku HIOZE B z mocą 5 lub 6 MW. Jeszcze większe rozbieżności można zaobserwować na rysunku 6B. Przedstawione na nim są średnie wartości parametru P_{BME}/P_{PV+TW} . We wszystkich przypadkach HIOZE A charakteryzuje się wyższą wartością od HIOZE B. W przypadku pierwszej z konfiguracji, 5% udziału BME musi być w całej wygenerowanej energii elektrycznej (cała energia jest sprzedawana do systemu, więc musi spełniać warunki ustawowe dotyczące hybrydowych instalacji OZE). Natomiast, w przypadku HIOZE B jedynie nadwyżki energii sprzedawane są do systemu, więc mianownik w równaniu służącym do obliczania udziału BME jest mniejszy. Efektem jest zmniejszenie się wymaganych wartości mocy BME przy której następuje spełnienie tego warunku granicznego.

Proporcjonalnie najmniejsze różnice między konfiguracjami (w kontekście parametru P_{BME}/P_{PV+TW}), są w wariantach wag 1:5:1:1:1:1, 1:1:1:4:1:1, 1:1:1:5:1:1, 3:3:1:1:1:1, 4:4:1:1:1:1 i 1:1:4:4:1:1. Ze względu widoczne jest to, że najmniejsze różnice są, gdy kryteria K_2 i K_4 mają wysokie wartości wagi. W przypadku pierwszego z nich, wynika to, z faktu, że zwiększone możliwości magazynowania energii pozwalają na ograniczenie wartości niewykorzystanej energii elektrycznej. W przypadku kryterium K_4 wynika to z pozytywnego wpływu zwiększenia wykorzystania generacji z OZE na opłacalność inwestycji.

O ile moc źródeł niesterowalnych niemal we wszystkich wariantach jest wyższa w HIOZE B, a parametr P_{BME}/P_{PV+TW} w HIOZE A, tak w przypadku parametru P_{ICE}/P_{PV+TW} jest bardziej równomiernie rozłożone. W 19 wariantach wag wyższa jest wartość w HIOZE A. Są to warianty, w których zmienia się waga K_1 , wzrasta waga K_4 , K_6 oraz obu kryteriów środowiskowych na raz. Dodatkowo sytuacja ta zachodzi w wariantach „komunalnym” i „komercyjnym”. W pozostałych 23 przypadkach wyższa jest wartość parametru P_{ICE}/P_{PV+TW} w HIOZE B.

Następnie, w tabeli 9 zaprezentowano trendy zmian parametrów przy zwiększaniu się wartości wag poszczególnych kryteriów.

Tabela 9. Wpływ wag kryteriów na wartości parametrów P_{PV+TW} , P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} .

Wzrost wartości wagi	HIOZE A			HIOZE B		
	P_{PV+TW}	P_{ICE}/P_{PV+TW}	P_{BME}/P_{PV+TW}	P_{PV+TW}	P_{ICE}/P_{PV+TW}	P_{BME}/P_{PV+TW}
K_1	$\wedge$ (2)	$\vee$ (2)	$\uparrow$	$\vee$ (1)	$\uparrow$	$\vee$ (1)
K_2	$\downarrow$	$\uparrow$	$\wedge$ (1)	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
K_3	$\vee$ (3)	$\wedge$ (3)	$\downarrow$	$\vee$ (3)	$\vee$ (1) $\wedge$ (3)	$\vee$ (2) $\wedge$ (3)
K_4	$\downarrow$	$\uparrow$	$\vee$ (3)	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
K_5	$\uparrow$	$\downarrow$	$\wedge$ (2)	$\uparrow$	$\downarrow$	$\vee$ (2)
K_6	$\wedge$ (1-4)	$\vee$ (1)	$\vee$ (2)	$\uparrow$	$\downarrow$	$\vee$ (4)
K_1 i K_2	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
K_3 i K_4	$\downarrow$	$\uparrow$	$\vee$ (2) $\wedge$ (3)	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
K_5 i K_6	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\vee$ (2)

Gdzie, $\uparrow$ - wartość parametru rośnie wraz ze wzrostem wagi danego kryterium, $\downarrow$ - wartość parametru maleje wraz ze wzrostem wagi danego kryterium, $\wedge$ - wartość parametru rośnie wraz ze wzrostem wagi danego kryterium do maksimum, a następnie maleje, $\vee$ - wartość parametru maleje wraz ze wzrostem wagi danego kryterium do minimum, a następnie rośnie. Przy znakach $\wedge$ i $\vee$ w nawiasach znajdują

się liczby mówiące o wartości wagi danego kryterium przy której analizowany parametr osiąga odpowiednio maksimum lub minimum.

Wzrost wartości wagi kryterium pierwszego, w przypadku konfiguracji HIOZE A, jest związany z ujemną korelacją parametrów P_{PV+TW} i P_{ICE}/P_{PV+TW} . Początkowo wartość mocy źródeł niesterowalnych rośnie i maleje jednocześnie wartość P_{ICE}/P_{PV+TW} . Po osiągnięciu maksimum przez pierwszy z tych parametrów i minimum przez drugi przy wadze K_1 równej 2, trendy się odwracają. Wzrost mocy silnika pozwala na uzyskanie większego przyrostu generacji energii elektrycznej niż wzrost mocy PV czy TW. Parametr P_{BME}/P_{PV+TW} wzrasta przy wzroście wagi K_1 niezależnie od wartości pozostałych parametrów. W przypadku HIOZE B sytuacja jest odmienna. Wartość P_{ICE}/P_{PV+TW} rośnie przy wzroście wartości wagi kryterium pierwszego. Widoczny jest również wzrost pozostałych dwóch parametrów. Wartości P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} maleją jedynie przy zmianie wagi K_1 z 0 na równą pozostałym kryteriom. W tym przypadku widoczne jest, że parametry są skorelowane. Im wyższa jest moc źródeł niesterowalnych tym korzystniejsze jest zastosowanie magazynów o wyższej wartości mocy i pojemności aby w większym stopniu wykorzystać generację. Wzrost wartości wagi K_2 w obu konfiguracjach HIOZE skutkuje zmniejszeniem mocy źródeł niesterowalnych (zmniejszenie generacji przekraczającej moc przyłączeniową) i wzrostem wartości P_{ICE}/P_{PV+TW} (utrzymanie właściwego poziomu generacji energii elektrycznej). Różnica między konfiguracjami występuje w zakresie zmian parametru P_{BME}/P_{PV+TW} . O ile w HIOZE B widoczny jest wzrost tej wartości przy wzroście wagi kryterium drugiego, tak w HIOZE A wartość tego parametru rośnie między wariantami 1:0:1:1:1:1 i 1:1:1:1:1:1, a następnie maleje. W przypadku zmian wartości wagi kryterium kosztów inwestycyjnych, w HIOZE B nie ma stałych trendów zmian wartości parametrów P_{BME}/P_{PV+TW} i P_{ICE}/P_{PV+TW} . Zależność między parametrami P_{PV+TW} i P_{ICE}/P_{PV+TW} jest natomiast widoczna w przypadku HIOZE A. Wartość mocy źródeł niesterowalnych osiąga minimum w tym samym punkcie w którym P_{ICE}/P_{PV+TW} osiąga maksimum. Widoczne jest, że do pewnej wartości wagi K_3 bardziej opłacalne jest zwiększanie mocy źródeł charakteryzujących się mniejszymi jednostkowymi kosztami inwestycyjnymi. Jednocześnie ze względu na wysokie koszty inwestycyjne baterii, wartość parametru P_{BME}/P_{PV+TW} maleje przy wzroście wagi K_3 . Wzrost wagi kryterium czwartego oddziałuje podobnie na wartości parametrów układu w HIOZE A i HIOZE B. Wraz ze wzrostem istotności zysków na produkcji jednostki energii elektrycznej, wzrasta wartość P_{ICE}/P_{PV+TW} , a spada moc P_{PV+TW} . Wynika to, z mniejszych kosztów wytwarzania energii w źródle sterowalnym. W przypadku parametru P_{BME}/P_{PV+TW} w konfiguracji HIOZE B widoczna jest dodatnia korelacja ze wzrostem wagi K_4 , natomiast w przypadku HIOZE A wartość tego parametru maleje w zakresie wag 0-3. Również wzrost wartości wagi jednostkowego wskaźnika emisji charakteryzuje się ścisłym związaniem mocy P_{PV+TW} i parametru P_{ICE}/P_{PV+TW} . Wzrost istotności tego kryterium skutkuje wzrostem mocy źródeł bezemisyjnych oraz jednoczesnym spadkiem wartości P_{ICE}/P_{PV+TW} (zarówno w HIOZE A jak i w HIOZE B). Im wyższa jest moc znamionowa OZE tym mniej energii elektrycznej jest produkowane w jedynym źródle emisyjnym w układzie. Parametr P_{BME}/P_{PV+TW} w zależności od konfiguracji, przy mniejszych wartościach wagi K_5 rośnie, a przy większych maleje (HIOZE A) lub odwrotnie (HIOZE B). Zwiększanie wartości wagi kryterium szóstego w przypadku HIOZE B skutkuje wzrostem mocy P_{PV+TW} oraz spadkiem wartości współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} . Parametr P_{BME}/P_{PV+TW} również maleje do czterokrotności wartości pozostałych wag, a następnie rośnie. W przypadku HIOZE A, wszystkie parametry osiągają w analizowanym zakresie swoje minimum lub maksimum. Sumaryczna moc paneli PV i turbin wiatrowych najwyższą wartość osiąga przy wadze równej 1 i zaczyna maleć dopiero przy pięciokrotności wartości wag pozostałych kryteriów. Przy wadze K_6 równej 1 minimum osiąga parametr P_{ICE}/P_{PV+TW} , a przy wadze K_6 równej 2 minimum osiąga parametr

P_{BME}/P_{PV+TW} . Zwiększanie wartości wag obu kryteriów z grupy energetycznej jednocześnie skutkuje wzrostem wartości parametrów P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} przy jednoczesnym spadku mocy P_{PV+TW} . Nie jest to zależne od konfiguracji układu (zależności występują zarówno w HIOZE A jak i HIOZE B). Niemal taki sam charakter zmian wartości tych parametrów występuje przy przewymiarowaniu obu kryteriów ekonomicznych. Jedyną różnicą jest brak możliwości określenia charakteru zmienności w przypadku P_{BME}/P_{PV+TW} . Odwrotne zależności są widoczne przy zwiększaniu wartości wag kryteriów środowiskowych. Moc P_{PV+TW} rośnie, a maleje wartość P_{ICE}/P_{PV+TW} . W przypadku HIOZE A maleje również wartość P_{BME}/P_{PV+TW} . W HIOZE B wartość ta maleje przy zmianie krotności wag 1-2 i rośnie między wartościami wag 2-4.

W tabeli 10 zaprezentowano porównanie wartości parametrów uzyskanych w najkorzystniejszych rozwiązaniach wariantu równych wag oraz wariantów „komunalnym” i „komercyjnym” (3:1:2:3:2:1, 2:1:3:1:2:3). Wykresy radarowe porównujące znormalizowane wartości kryteriów w dwóch ostatnich wariantach przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 10. Porównanie parametrów uzyskanych w najkorzystniejszych rozwiązaniach w wariantach 1:1:1:1:1:1, 3:1:2:3:2:1, 2:1:3:1:2:3.

Parametr	Jednostka	HIOZE A			HIOZE B		
		Wariant równych wag	Wariant komercyjny	Wariant komunalny	Wariant równych wag	Wariant komercyjny	Wariant komunalny
P_{PV+TW}	MW	4	3	4	4	3	5
P_{ICE}/P_{PV+TW}	-	0,200	0,533	0,200	0,300	0,533	0,220
P_{BME}/P_{PV+TW}	-	0,350	0,300	0,350	0,050	0,100	0,040
E_{HIOZE}	GWh	12,87	16,57	12,87	14,93	16,53	14,75
E_{nad}	MWh	405	95	405	332	37	1094
CAPEX	mln PLN	49,92	56,76	49,92	43,11	47,86	45,22
ΔC	PLN/MWh	33,91	113,61	33,91	201,56	208,98	175,82
E_{fCO_2}	t/MWh	0,614	0,889	0,614	0,700	0,883	0,599
ΔB	t	144,7	4833,8	144,7	1896,4	4738,3	790,6

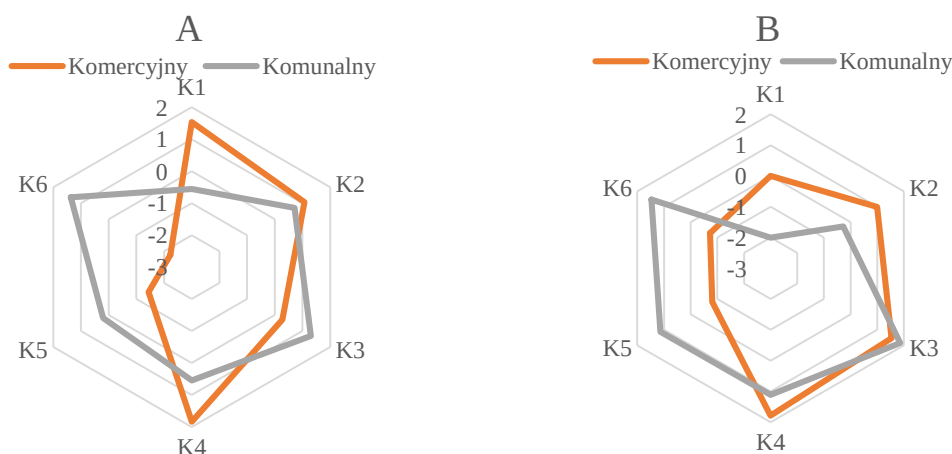
W HIOZE A najkorzystniejsze rozwiązanie w wariantcie równych wag jest identyczne jak w wariantcie komunalnym. Rozwiązanie charakteryzuje się mocą źródeł niesterowalnych równą 4 MW i parametrami P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} równymi odpowiednio 0,2 i 0,35. W układzie tym, całkowita generacja energii elektrycznej wynosi 12,87 GWh. Ze względu na dwukrotne przewymiarowanie mocy źródeł niesterowalnych nad moc przyłączeniową, 405 MWh energii elektrycznej musi zostać ograniczone ze względu na przekroczenie mocy przyłączeniowej. Najkorzystniejsze rozwiązanie w wariantcie komercyjnym charakteryzuje się mniejszą mocą P_{PV+TW} i mniejszą wartością P_{BME}/P_{PV+TW} ale wyższą wartością współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} . Efektem tego jest wyższa o niemal 4 GWh generacja energii elektrycznej i jednocześnie 4-krotnie mniejsza wartość niewykorzystanej generacji. Wyższa wartość współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} skutkuje tym, że pomimo zmniejszenia pozostałych parametrów koszty inwestycyjne rosną o 13,6% względem pozostałych dwóch wariantów. Jednakże, ze względu na wyższą generację energii elektrycznej, zyski na sprzedaży jednostki energii wzrastają z 33,91 PLN/MWh do 113,61 PLN/MWh. Negatywnymi aspektami są natomiast kwestie środowiskowe. W wariantcie komercyjnym preferowane rozwiązanie charakteryzuje się o 275 kg/MWh wyższą wartością emisji CO₂ (159,5 kg/MWh wyższą emisją CO₂ ze źródeł nieodnawialnych). Dodatkowo zużywane jest więcej odpadów niż jest dostępne lokalnie. W przypadku wariantu komunalnego i równych wag wartość bezwzględna różnicy między wykorzystaniem a dostępnością pre-RDF wynosi 145 t rocznie.

Podobne zależności można zaobserwować w przypadku HIOZE B. W tej konfiguracji każdy z wariantów wag przedstawionych w tabeli charakteryzuje się innymi parametrami. W efekcie pomimo faktu, że w wariantcie komunalnym moc źródeł OZE jest najwyższa (5 MW) tak generacja energii ma najmniejszą wartość (14,75 GWh). Układ wybrany w wariantcie równych wag charakteryzujący się mocą P_{PV+TW} równą 4 MW osiąga niewiele większą generację energii elektrycznej – 14,93 GWh. Najwyższa wartość generacji jest osiągana przez układ z najmniejszą mocą źródeł niesterowalnych, równą 3 MW. W tym układzie produkowane jest 16,53 GWh. Wynika to z najwyższej wartości współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} wynoszącej 0,533 względem 0,22 w wariantcie komunalnym i 0,3 w wariantcie równych wag. Ze względu na najmniejszą sumaryczną moc paneli PV i turbin wiatrowych najkorzystniejsza jest również wartość niewykorzystanej generacji wynosząca zaledwie 37 MWh. W wariantcie równych wag jest to 405 MWh, a w „komunalnym” 1094 MWh. Pomimo faktu, że w wariantcie „komunalnym” koszty inwestycyjne mają przypisaną wagę równą 3, tak w wariantcie równych wag CAPEX jest najmniejszy. Dużo większa jest różnica między zużyciem, a dostępnością frakcji energetycznej odpadów, co jest drugim kryterium z tak wysoką wartością wagi. Najwyższe koszty inwestycyjne są w wariantcie komercyjnym, który jednakże charakteryzuje się najwyższymi zyskami na jednostce energii elektrycznej – 208,98 PLN/MWh. Jest to o ponad 7 PLN/MWh więcej niż w wariantcie równych wag i o ponad 33 PLN/MWh więcej niż w wariantcie „komunalnym”. Wariant „komunalny” charakteryzuje się najkorzystniejszymi wartościami parametrów środowiskowych.

Porównując ze sobą HIOZE A oraz HIOZE B można zauważyć, że drugie z nich wypada korzystniej. Znacznie wyższe są uzyskiwane w tym scenariuszu zyski, co wynika z ograniczania kupna energii z systemu elektroenergetycznego (np. w postaci kontraktów długoterminowych). Cena kupna energii elektrycznej jest wyższa niż cena sprzedaży energii z HIOZE. W efekcie wyższe zyski związane są z ograniczaniem kupna energii elektrycznej niż ze zwiększaniem jej sprzedaży. Kolejnym aspektem jest możliwość zastosowania magazynów energii o mniejszych mocach i pojemnościach. Jedynie sprzedaż energii do systemu elektroenergetycznego następuje w ramach przepisów dotyczących hybrydowych instalacji OZE. W efekcie, do spełnienia 5% udziału energii przekazywanej poprzez BME w energii przesyłanej do systemu elektroenergetycznego, nie są potrzebne tak duże baterie. Jednocześnie nie dochodzi do znaczącego wzrostu mocy agregatu silnikowego. Skutkiem jest znaczna redukcja kosztów inwestycyjnych w najkorzystniejszych rozwiązaniach, co może zwiększyć dostępność technologii. Podsumowując, z punktu widzenia inwestora rozwiązanie HIOZE B jest korzystniejsze. Natomiast należy zaznaczyć, że scenariusz B zakłada obecność zakładu przemysłowego lub klastra energii, który jest integralną częścią całego systemu. W przypadku braku takich instytucji, nie jest możliwe zastosowanie HIOZE B. Dużą zaletą HIOZE A jest większa elastyczność pod kątem miejsca inwestycji.

Na wykresie 7 im wyższa jest wartość tym jest ona korzystniejsza (niezależnie czy dany parametry jest stymulantą czy destymulantą). Widoczne jest jak w zależności od przyjętego rozkładu wag zmieniają się znormalizowane wartości kryteriów. W wariantcie „komercyjnym” najistotniejszymi parametrami są zysk i generacja energii elektrycznej. Te wartości mają w efekcie bardzo wysokie wartości. Koszty inwestycyjne mają średnią wartość. Warto zwrócić uwagę na to, że pomimo faktu, że niewykorzystana generacja ma mniejszą wartość wagi niż wskaźnik emisji, tak drugi z parametrów ma mniej korzystną wartość znormalizowaną. Jest to spowodowane oddziaływaniem kryteriów pierwszego i czwartego, które najkorzystniejsze wartości osiągają wtedy, gdy moc wskaźnik P_{ICE}/P_{PV+TW} ma wysoką wartość. Przekłada się to na wyższą wartość jednostkowego wskaźnika emisji. Najmniej korzystne jest oddziaływanie wykorzystania odpadów dostępnych lokalnie. Jest ich wykorzystywane więcej niż jest dostępne na danym obszarze. Ze względu na niewielką

wartość wagi tego kryterium równą pozostałym nie ma to aż tak dużego przełożenia na ostateczny wynik. W wariancie „komunalnym” najistotniejszymi parametrami są wykorzystanie odpadów i koszty inwestycyjne. Te parametry są mają również najwyższe znormalizowane wartości. Korzystniejsza niż w przypadku układu „komercyjnego” jest wartość wskaźnika emisji (mimo tej samej wartości wagi). Mniej korzystne są natomiast wartości trzech pozostałych kryteriów. O ile znormalizowana wartość energii elektrycznej ograniczanej w efekcie przekroczenia mocy przyłączeniowej nie jest znacząco wyższa, tak w przypadku zysków na sprzedaży energii oraz w szczególności w całkowitej generacji widoczne są spadki wartości.



Rys. 7. Wykres znormalizowanych wartości parametrów dla najkorzystniejszych wariantów układów „komercyjnego” i „komunalnego” w: A) HIOZE A, B) HIOZE B.

W HIOZE B w wariancie „komercyjnym” najwyższe wartości osiągane są przez kryteria K₂, K₃ i K₄. Kryteria te mają odpowiednio krotności najmniejszej wartości wagi równe 1, 2 i 3. Drugi z parametrów z najwyższą wartością wagi charakteryzuje się średnią wartością. Jednakże, wartości generacji w układach spełniających warunki ustawy są bardzo zbliżone, przez co odchylenie standardowe jest niewielkie. W efekcie brak jest rozwiązań ze znormalizowaną wartością kryterium, która jest znacznie wyższa od pozostałych i w efekcie istotnie wpływa na wyniki. Najmniej korzystne są wartości wskaźnika emisji oraz wykorzystanie dostępnych lokalnie odpadów. Kryteria te mają odpowiednio wagę 2 i 1. Rozwiązanie charakteryzuje się bardzo wysoką wartością K₄. Również CAPEX jest bardzo korzystny. W wariancie „komunalnym” najmniej korzystne wartości osiągają oba kryteria z grupy energetycznej. Pozostałe wartości kryteriów są wysokie. Zarówno CAPEX (czyli kryterium z najwyższą wartością wagi) jak i zyski na sprzedaży jednostki energii (kryterium z najmniejszą wartością wagi) są bardzo korzystne. Wartość CAPEX jest lepsza niż w przypadku wariantu „komercyjnego”, natomiast wartość K₄ jest nieco gorsza. Bardzo korzystne są również parametry środowiskowe. Zarówno mała wartość jednostkowego wskaźnika emisji jak i właściwy poziom wykorzystania frakcji energetycznej odpadów jest osiągnięty w tych samych zakresach parametrów w przypadku HIOZE B.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz uzyskanych wyników stwierdza się, że:

1. Potwierdzono tezę mówiącą o tym, że „Dobór wartości współczynników P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} dla hybrydowej instalacji OZE [...] jest zadaniem, które należy rozwiązywać za pomocą wielokryterialnych metod podejmowania decyzji z uwzględnieniem różnych kryteriów z grupy technicznych, ekonomicznych oraz środowiskowych”. W przypadku braku zastosowania metod wielokryterialnych, dobór parametrów instalacji pod względem tylko jednego z kryteriów skutkowałby

wyborem rozwiązania, w którym inne parametry oddziaływałyby negatywnie na pracę HIOZE. W efekcie jedynie analiza uwzględniająca wszystkie kluczowe aspekty pracy instalacji prowadzi do właściwego doboru parametrów. Wszystkie spośród sześciu kryteriów decyzyjnych w istotny sposób wpływają na pracę układu i są kluczowe dla właściwego doboru parametrów na etapie projektowania.

2. Opracowano algorytm służący do doboru parametrów hybrydowych instalacji OZE składających się z odnawialnych źródeł niesterowalnych, BME oraz układu zgazowania frakcji energetycznych odpadów komunalnych zintegrowanego z agregatem silnikowym. Algorytm pozwala na wyznaczenie wszystkich układów z zadanego zakresu, które spełniają ustawowe warunki dotyczące czasu wykorzystania mocy przyłączeniowej i udziału energii elektrycznej magazynu w energii przekazanej do systemu, a następnie umożliwia wybór najkorzystniejszego rozwiązania
3. Zaproponowany w pracy algorytm oceny jest uniwersalny i umożliwia analizę zarówno HIOZE w niezależnie od konfiguracji oraz oczekiwanych przez inwestora wag poszczególnych kryteriów.
4. Układ zasilający odbiorcę przemysłowego (HIOZE B) charakteryzuje się znacznie mniejszymi wartościami wskaźnika P_{BME}/P_{PV+TW} i wyższymi wartościami mocy P_{PV+TW} niż układ wykorzystywany jedynie do sprzedaży energii elektrycznej do systemu elektroenergetycznego (HIOZE A).
5. Wybrane według zakładanych potrzeb inwestorów warianty rozkładu wag pokazują uniwersalność algorytmu. W wariancie „komercyjnym” bardzo wysoka jest generacja energii elektrycznej. Jednocześnie wyższe są jednostkowe wartości zysku na produkcji energii elektrycznej. Efektem tego jest wysoka opłacalność biznesowa inwestycji. Wysokie wartości tych parametrów wynikają z przypisania im wyższych wag niż pozostałym kryteriom decyzyjnym. Jednocześnie, wykorzystywane jest zdecydowanie więcej pre-RDF niż wynosi lokalna dostępność. W wariancie „komunalnym” zużycie odpadów jest bardzo zbliżone do lokalnej dostępności. Niższe niż w wariancie „komercyjnym” są również koszty inwestycyjne. Widoczna jest zatem poprawa wskaźników, którym przypisano najwyższe wartości wagi. Jednocześnie, ze względu na uwzględnienie również pozostałych kryteriów w analizie brak jest wariantów, w których którekolwiek kryterium byłoby na nieakceptowalnym poziomie.
6. Wzrost wartości wagi kryterium pierwszego – generacji energii elektrycznej, powoduje, że wzrastają wartości P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} . W przypadku HIOZE A przy wyższych wartościach wagi K_1 widoczny jest spadek wartości P_{PV+TW} , a w HIOZE B można zauważyć odwrotny trend. Wzrost wartości wagi kryterium drugiego skutkuje wzrostem wartości współczynnika P_{ICE}/P_{PV+TW} i spadkiem wartości P_{PV+TW} w obu konfiguracjach HIOZE. Trend dotyczący wartości P_{BME}/P_{PV+TW} różni się między konfiguracjami. W przypadku HIOZE A wartość współczynnika maleje, a w HIOZE B rośnie wraz ze wzrostem wartości wagi K_2 . Wzrost wartości wagi zysków na produkcji jednostki energii elektrycznej skutkuje spadkiem wartości P_{PV+TW} i wzrostem wartości P_{ICE}/P_{PV+TW} i P_{BME}/P_{PV+TW} . Wzrost wartości wag kryterium K_5 powoduje, że rosną wartości mocy źródeł niesterowalnych, a maleją wartości P_{ICE}/P_{PV+TW} . Wartości P_{BME}/P_{PV+TW} początkowo rosną w HIOZE A i maleją w HIOZE B, a następnie trendy się odwracają. Trendy dotyczące zmian parametrów w funkcji wagi kryterium szóstego, różnią się pomiędzy HIOZE A i HIOZE B. Wynika to, z faktu, że zużycie odpadów w poszczególnych rozwiązaniach obu konfiguracji HIOZE różni się od siebie znacząco, nie można znaleźć trendów łączących obie konfiguracje.

7. Zastosowanie sterowalnego źródła energii elektrycznej, którym jest agregat silnikowy spalający syngaz, powoduje, że możliwe jest spełnienie ustawowego wymagania dotyczącego czasu wykorzystania nawet przy niewielkim przewymiarowaniu jednostek wytwórczych względem mocy przyłączeniowej. Zwiększanie mocy i pojemności BME nie ma aż tak dużego wpływu na wartość generowanej energii elektrycznej jak wzrost mocy ICE. W efekcie, pomimo faktu, że zarówno ICE jak i BME charakteryzują się wyższymi kosztami inwestycyjnymi niż PV i TW, tak wpływ ICE na opłacalność inwestycji może być zdecydowanie pozytywny. Zwiększanie generacji w ICE oddziałuje jednoznacznie negatywnie na emisję CO₂. W tym aspekcie pozytywnie może oddziaływać BME, dzięki któremu możliwe jest zwiększenie udziału OZE w generacji. W tym aspekcie najbardziej pozytywnie oddziałuje wzrost mocy źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych. Należy jednak zaznaczyć, że właściwy dobór mocy silnika istotnie wpływa na domknięcie systemu gospodarki odpadami.
8. Wykorzystanie instalacji zgazowania frakcji energetycznych odpadów w hybrydowych instalacjach OZE powinno być rozważane jako jedna z opcji zapewnienia stabilnej pracy takiej instalacji. Jak wykazano, wpływ takiej instalacji na opłacalność inwestycji jest korzystny. ITPO są niezbędnym elementem systemu gospodarki odpadami. Według wszystkich zaprezentowanych szacunków, w Polsce nadal niezbędne jest powstanie kolejnych instalacji tego typu, aby całkowicie zagospodarować wysokokaloryczne frakcje zmieszanych odpadów komunalnych. Technologia zgazowania odpadów wydaje się być jedyną możliwą (spośród ITPO) do zastosowania w ramach hybrydowych instalacji OZE, ze względu na możliwość współpracy z agregatem silnikowym.
9. W dobie gwałtownego wzrostu udziału OZE w systemach elektroenergetycznych i wynikających z tego problemów, rozwiązania takie jak hybrydowe instalacje OZE, stają się kluczowym i nieodzownym elementem nowoczesnych systemów elektroenergetycznych. Jak wykazano w pracy, kombinacja źródeł niesterowalnych ze sterowalnymi i magazynami energii elektrycznej pozwala osiągnąć całkowite lub niemal całkowite wykorzystanie mocy przyłączeniowej przez cały rok.

Literatura

1. Sejm *Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii*; <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20150000478/U/D20150478Lj.pdf> [dostęp: 06.08.2024]
2. Sejm *Ustawa z Dnia 14 Grudnia 2012 r. o Odpadach* **2012**; <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20130000021/U/D20130021Lj.pdf> [dostęp 06.02.2025]
3. Wielgosiński, G. Jak wygląda rynek RDF w Polsce? *Magazyn Biomasa* **2024**. <https://magazynbiomasa.pl/jak-wyglada-rynek-rdf-w-polsce/> [dostęp: 07.02.2025]
4. IOS-PIB *Morfologia odpadów komunalnych wytwarzanych w Polsce.*; IOS-PIB, **2022**.
5. INVESTEKO S.A. *Energia z Odpadów Jako Ekologiczna Wizja Przyszłości*; INVESTEKO S.A.: Świętochłowice, **2018**.
6. Kardaś, D.; Kluska, J. Autotermiczny Reaktor Grawitacyjny Zgazowania Odpadów Komunalnych; IMP PAN, **2016**, https://www.imp.gda.pl/fileadmin/doc/news/2016/15_wfos2/Raport.pdf [dostęp 03.11.2023]
7. Skorek, J.; Kalina, J. *Gazowe Układy Kogeneracyjne*; WNT: Warszawa, **2005**.
8. Indrawan, N.; Kumar, A.; Moliere, M.; Sallam, K.A.; Huhnke, R.L. Distributed Power Generation via Gasification of Biomass and Municipal Solid Waste: A Review. *Journal of the Energy Institute* **2020**, 93, 2293–2313.
9. Chmielniak, T.; Lepszy, S.; Czaja, D. *Instalacje Turbiny Gazowej w Energetyce i Przemysle*; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej: Gliwice, **2015**.
10. Chmielniak, T.; Skorek, J.; Kalina, J.; Lepszy, S. *Układy Energetyczne Zintegrowane Ze Zgazowaniem Biomasy*; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej: Gliwice, **2008**.

11. Malik, P.; Awasthi, M.; Sinha, S. Biomass-based Gaseous Fuel for Hybrid Renewable Energy Systems: An Overview and Future Research Opportunities. *Int J Energy Res* **2021**, *45*, 3464–3494.
12. Dodo, U.A.; Ashigwuike, E.C. Techno-Economic and Environmental Analysis of Utility-Scale Hybrid Renewable Energy System Integrating Waste-to-Energy Plant to Complement an Unreliable Grid Operation. *Energ. Ecol. Environ.* **2023**, *8*, 439–456.
13. van Leeuwen, L.B.; Cappon, H.J.; Keesman, K.J. Urban Bio-Waste as a Flexible Source of Electricity in a Fully Renewable Energy System. *Biomass and Bioenergy* **2021**, *145*, 105931.
14. El-Maaroufi, A.; Daoudi, M.; Laamara, R.A. Techno-Economic Analysis of a PV/WT/Biomass off-Grid Hybrid Power System for Rural Electrification in Northern Morocco Using HOMER. *Renewable Energy* **2024**, *231*, 120904.
15. Yimen, N.; Monkam, L.; Tcheukam-Toko, D.; Musa, B.; Abang, R.; Fombe, L.F.; Abbasoglu, S.; Dagbasi, M. Optimal Design and Sensitivity Analysis of Distributed Biomass-based Hybrid Renewable Energy Systems for Rural Electrification: Case Study of Different Photovoltaic/Wind/Battery-integrated Options in Babadam, Northern Cameroon. *IET Renewable Power Gen* **2022**, *16*, 2939–2956.
16. Irshad, A.S.; Zakir, M.N.; Rashad, S.S.; Lotfy, M.E.; Mikhaylov, A.; Elkholy, M.H.; Pinter, G.; Senjyu, T. Comparative Analyses and Optimizations of Hybrid Biomass and Solar Energy Systems Based upon a Variety of Biomass Technologies. *Energy Conversion and Management: X* **2024**, *23*, 100640.
17. Al Afif, R.; Ayed, Y.; Maaitah, O.N. Feasibility and Optimal Sizing Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems: A Case Study of Al-Karak, Jordan. *Renewable Energy* **2023**, *204*, 229–249.
18. Tehrani, M.M.; Akhtari, M.; Kasaeian, A.; Rad, M.A.V.; Toopshekan, A.; Motlagh, M.S. Techno-Economic Investigation of a Hybrid Biomass Renewable Energy System to Achieve the Goals of SDG-17 in Deprived Areas of Iran. *Energy conversion and management* **2023**, *291*, 117319.
19. Younas, M.; Kamal, R.; Khalid, M.S.; Qamar, A. Economic Planning for Remote Community Microgrid Containing Solar PV, Biomass Gasifier and Microhydro. In Proceedings of the 2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC); IEEE, **2018**; 1–7.
20. Singh, A.; Basak, P. Conceptualization and Techno-Economic Evaluation of Municipal Solid Waste Based Microgrid. *Energy* **2022**, *238*, 121711.
21. Bagheri, M.; Shirzadi, N.; Bazdar, E.; Kennedy, C.A. Optimal Planning of Hybrid Renewable Energy Infrastructure for Urban Sustainability: Green Vancouver. *Renewable and sustainable energy reviews* **2018**, *95*, 254–264.
22. Esfilar, R.; Bagheri, M.; Golestani, B. Technoeconomic Feasibility Review of Hybrid Waste to Energy System in the Campus: A Case Study for the University of Victoria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2021**, *146*, 111190.
23. Roman, J.; Wróblewski, R.; Kłojzy-Karczmarczyk, B.; Ceran, B. Energetic, Economic and Environmental (3E) Analysis of a RES-Waste Gasification Plant with Syngas Storage Cooperation. *Energies* **2023**, *16*, 2062.
24. Roman, J.; Kłojzy-Karczmarczyk, B.; Wróblewski, R.; Ceran, B. Analysis of the Use of Waste Gasification in a Hybrid Generation System to Supply an Industrial Demand and Power Grid through Cable Pooling. *Renewable Energy* **2025**, 122721.
25. Hurtado, E.; Peñalvo-López, E.; Pérez-Navarro, Á.; Vargas, C.; Alfonso, D. Optimization of a Hybrid Renewable System for High Feasibility Application in Non-Connected Zones. *Applied Energy* **2015**, *155*, 308–314.
26. Ribó-Pérez, D.; Bastida-Molina, P.; Gómez-Navarro, T.; Hurtado-Pérez, E. Hybrid Assessment for a Hybrid Microgrid: A Novel Methodology to Critically Analyse Generation Technologies for Hybrid Microgrids. *Renewable Energy* **2020**, *157*, 874–887.
27. Abd El-Sattar, H.; Sultan, H.M.; Kamel, S.; Khurshaid, T.; Rahmann, C. Optimal Design of Stand-Alone Hybrid PV/Wind/Biomass/Battery Energy Storage System in Abu-Monqar, Egypt. *Journal of Energy Storage* **2021**, *44*, 103336.
28. Jahangir, M.H.; Cheraghi, R. Economic and Environmental Assessment of Solar-Wind-Biomass Hybrid Renewable Energy System Supplying Rural Settlement Load. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **2020**, *42*, 100895.
29. Zheng, Y.; Jenkins, B.M.; Kornbluth, K.; Træholt, C. Optimization under Uncertainty of a Biomass-Integrated Renewable Energy Microgrid with Energy Storage. *Renewable energy* **2018**, *123*, 204–217.
30. Zhang, K.; Zhou, B.; Wu, Q.; Cao, Y.; Liu, N.; Voropai, N.; Barakhtenko, E. Modeling and Utilization of Biomass-to-Syngas for Industrial Multi-Energy Systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems* **2021**, *7*, 932–942.
31. Samy, M.M.; Barakat, S. Hybrid Invasive Weed Optimization-Particle Swarm Optimization Algorithm for Biomass/PV Micro-Grid Power System. In Proceedings of the 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON); IEEE, **2019**; 377–382.

32. Mukhtar, S.; Muhammad, S.; Alyousef, H.A.; Khan, W.; Shah, R.; El-Tantawy, S.A. Enviro-Economic and Optimal Hybrid Energy System: Photovoltaic–Biogas–Hydro–Battery System in Rural Areas of Pakistan. *Heliyon* **2024**, *10*.
33. Anand, A.; Maurya, R.; Kumar, P.; Chakraborty, A.; Ray, S. Equilibrium Optimizer Algorithm for Optimal Sizing of Utility-Connected Hybrid PV-Biomass Systems. In Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT); IEEE, **2023**; 1–6.
34. Mishra, S.; Saini, G.; Chauhan, A.; Upadhyay, S.; Balakrishnan, D. Optimal Sizing and Assessment of Grid-Tied Hybrid Renewable Energy System for Electrification of Rural Site. *Renewable Energy Focus* **2023**, *44*, 259–276.
35. Gusain, C.; Nangia, U.; Tripathi, M.M. Optimal Sizing of Standalone Hybrid Renewable Energy System Based on Reliability Indicator: A Case Study. *Energy Conversion and Management* **2024**, *310*, 118490.
36. Parihar, A.K.S.; Sethi, V.; Banerjee, R. Sizing of Biomass Based Distributed Hybrid Power Generation Systems in India. *Renewable Energy* **2019**, *134*, 1400–1422.
37. Jasim, A.M.; Jasim, B.H.; Baiceanu, F.-C.; Neagu, B.-C. Optimized Sizing of Energy Management System for Off-Grid Hybrid Solar/Wind/Battery/Biogasifier/Diesel Microgrid System. *Mathematics* **2023**, *11*, 1248.
38. Garrido, H.; Vendeirinho, V.; Brito, M.C. Feasibility of KUDURA Hybrid Generation System in Mozambique: Sensitivity Study of the Small-Scale PV-Biomass and PV-Diesel Power Generation Hybrid System. *Renewable Energy* **2016**, *92*, 47–57.
39. Li, C.Y.; Wu, J.Y.; Dai, Y.J.; Wang, C.-H. Multi-Criteria Optimization of a Biomass Gasification-Based Combined Cooling, Heating, and Power System Integrated with an Organic Rankine Cycle in Different Climate Zones in China. *Energy Conversion and Management* **2021**, *243*, 114364.
40. Rosso-Cerón, A.M.; Kafarov, V.; Latorre-Bayona, G.; Quijano-Hurtado, R. A Novel Hybrid Approach Based on Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Tools for Assessing Sustainable Alternatives of Power Generation in San Andrés Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, *110*, 159–173.
41. Enea Operator Standardowe profile zużycia energii na 2021 rok; https://www.operator.enea.pl/uploadsev2/Operator/us%C5%82ugidystrybucyjne/iriesd/zalacznik_4_iri_esd_profile_2021.xlsx [dostęp: 07.03.2024]
42. Wandrasz, J.; Wandrasz, A. *Paliwa Formowane. Biopaliwa i Paliwa z Odpadów w Procesach Termicznych*; Seidel-Przywecki: Warszawa, **2006**; ISBN 83-919449-7-2.
43. GUS Zmieszane Odpady Zebrane w Ciągu Roku; <https://bd1.stat.gov.pl/bd1/dane/podgrup/tablica> [dostęp: 02.04.2025]
44. Steag Energy Services GmbH EBSILON Professional Documentation 2024; https://help.ebsilon.com/EN/EBSILON_Professional_Documentation.html [dostęp: 10.20.2025]
45. Soares, J.; Oliveira, A.C. Experimental Assessment of Pine Wood Chips Gasification at Steady and Part-Load Performance. *Biomass and Bioenergy* **2020**, *139*, 105625.
46. Canabal, A.I.; Castineiras, J.P.; Anón, J.A.R.; Fraga, C.E.; Soalleiro, R.R. Elemental Composition of Raw and Torrefied Pellets Made from Pine and Pine-Eucalyptus Blends. *Biomass and Bioenergy* **2023**, *177*, 106951.
47. Lourinho, G.; Alves, O.; Garcia, B.; Rijo, B.; Brito, P.; Nobre, C. Costs of Gasification Technologies for Energy and Fuel Production: Overview, Analysis, and Numerical Estimation. *Recycling* **2023**, *8*, 49.
48. Stapf, D.; Seifert, H.; Wexler, M. Thermochemical Processes for Feedstock Recycling of Waste. **2018**.
49. IRENA *Renewable Power Generation Costs in 2022*; International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, **2023**;
50. NREL Commercial Battery Storage 2024; https://atb.nrel.gov/electricity/2024/commercial_battery_storage [dostęp: 01.08.2024]
51. energy.instrat.pl Ceny Prądu Na Następny Rok Oraz Inne Produkty Na Rynku Terminowym; <https://energy.instrat.pl/wiecej-danych/> [dostęp: 05.06.2025]
52. Rozliczeniowa cena uprawnień do emisji CO₂; PSE SA, 2024; <https://raporty.pse.pl/> [dostęp: 23.07.2024]
53. Energia nie tylko na kryzys; <https://bww-kancelaria.pl/energia-nie-tylko-na-kryzys/> [dostęp: 15.07.2025]
54. Filipowicz-Chomko, M. Wpływ Doboru Technik Normalizacji Kryteriów Decyzyjnych Na Stabilność Rankingów Uzyskanych Algorytmem TOPSIS. *Modelowanie i przetwarzanie informacji w warunkach niepewności* **2021**, 7–31.
55. Kacprzak, D. Przedziałowa Metoda TOPSIS Dla Grupowego Podejmowania Decyzji. *Optimum. Economic Studies* **2018**, *94*, 256–273.
56. Chakraborty, S. TOPSIS and Modified TOPSIS: A Comparative Analysis. *Decision Analytics Journal* **2022**, *2*, 100021.