



Krystyna CZAPLICKA-KOLARZ\*, Agata FUGIEL\*\*, Dorota BURCHART-KOROL\*\*\*

## Zintegrowana ocena efektywności środowiskowej, kosztowej i technicznej produkcji energii opartej na technologii zgazowania węgla z zastosowaniem metod wielokryterialnych

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono zastosowanie metod wielokryterialnych do zintegrowanej oceny produkcji energii elektrycznej opartej na technologii zgazowania węgla. Ocenie poddano technologię naziemnego zgazowania węgla jako perspektywiczny sposób użytkowania węgla w Polsce. Analizy zostały wykonane dla czterech wariantów technologii naziemnego zgazowania węgla różniących się rodzajem węgla, jak również zastosowaniem sekwestracji CO<sub>2</sub>. W analizach uwzględniono efektywność kosztową, środowiskową i techniczną. Ocenę efektywności środowiskowej i kosztowej wykonano, opierając się na metodach uwzględniających cykl życia technologii. W przypadku oceny środowiskowej przedstawiono wyniki oceny cyklu życia LCA (*Life Cycle Assessment*), uwzględniając trzy kategorie wpływu, natomiast ocenę kosztową wykonano na podstawie kosztu cyklu życia technologii LCC (*Life Cycle Cost*). Efektywność techniczna została obliczona dzięki sprawności energetycznej. W celu wykonania zintegrowanej oceny technologii zastosowano trzy metody wielokryterialne: Electre, AHP oraz Promethee, co pozwoliło na uwzględnienie istotności stosowanych kryteriów oceny. Na podstawie wykonanych analiz stwierdzono, że zastosowanie metod wielokryterialnych w zrównoważonym zarządzaniu energią może stanowić narzędzie wspomagania decyzji przy projektach inwestycyjnych, szczególnie w przypadku wyboru alternatywnych technologii.

**SŁOWA KLUCZOWE:** produkcja energii, zgazowanie węgla, metody wielokryterialne, ocena cyklu życia, koszt cyklu życia

---

\* Prof. dr hab. inż., \*\* Mgr, \*\*\* Dr hab. inż. prof. nadzw. – Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: afugiel@gig.eu

## Wprowadzenie

W Polsce energia elektryczna pozyskiwana jest w 90% w elektrowniach węglowych, dlatego tak istotne jest rozwijanie technologii czystego węgla. Naziemne zgazowanie węgla może stanowić alternatywę dla konwencjonalnej produkcji energii opartej na węglu. W celu oceny technologii energetycznych coraz częściej używane są metody pozwalające na integrację wielu aspektów funkcjonowania technologii, w tym ekonomicznych, środowiskowych, jak również technicznych. Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że dla technologii energetycznych wykonywane są analizy środowiskowe, jak również analizy ekonomiczne, jednakże niewiele jest prac, które integrują wyniki ocen technologii, do czego wykorzystuje się analizy wielokryterialne. W Polsce do tej pory wykonana została ocena efektywności technicznej i środowiskowej technologii naziemnego zgazowania węgla (Niemoćko i in. 2012; Czaplicka-Kolarz i in. 2013) oraz ocena ekoefektywności naziemnego zgazowania węgla oparta na metodzie cyklu życia LCA (*Life Cycle Assessment*) oraz technice LCC (*Life Cycle Costing*) (Burchart-Korol i in. 2013). Techniki analiz wielokryterialnych MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*) przeznaczone są do utworzenia rankingu technologii na podstawie wybranych kryteriów. MCDA są coraz częściej stosowane w celu oceny aspektów zrównoważonego rozwoju technologii, jak i produktów. Wśród metod wielokryterialnych wyróżnia się między innymi: AHP (*Analytical Hierarchy Process*), Promethee (*Preference ranking organization method for enrichment evaluation*) oraz Electre (*The elimination and choice translating reality*). Metody AHP, Promethee oraz Electre są często stosowane w procesie ustalania priorytetów w wyborze alternatywnych rozwiązań również w przypadku technologii energetycznych (Pohekar i Ramachandran 2004; Beccali i in. 1998; Tsoutsos i in. 2009). Analiza wielokryterialna wspomaga podejmowanie decyzji w przypadku wyboru wariantów technologii możliwych do zastosowania w danym kraju. Autorzy w pracy (Burchart-Korol i in. 2014) przedstawili rozwinięcie metody oceny ekoefektywności dzięki zastosowaniu analiz wielokryterialnych. Metody MCDA są coraz popularniejsze w procesie zrównoważonego zarządzania energią na świecie.

### 1. Cel i zakres prac

Celem pracy jest ocena technologii NZW (naziemnego zgazowania węgla) do produkcji energii elektrycznej IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) z wykorzystaniem metody wielokryterialnej przy uwzględnieniu efektywności środowiskowej, kosztowej i technicznej.

Zintegrowana ocena technologii naziemnego zgazowania węgla do produkcji energii elektrycznej będzie obejmowała następujące etapy:

1. Określenie celu i zakresu analizowanych technologii:

- ✧ wstępna diagnoza technologii naziemnego zgazowania węgla,
- ✧ wybór wariantów technologii energetycznych,
- ✧ charakterystyka poszczególnych wariantów.

2. Ocena środowiskowa przeprowadzona metodą oceny cyklu życia LCA (*Life Cycle Assessment*) z uwzględnieniem sprawności technicznej.
3. Ocena kosztowa przeprowadzona metoda kosztów cyklu życia LCC (*Life Cycle Costing*) z uwzględnieniem sprawności technicznej.
4. Zintegrowana ocena technologii:
  - ✧ wybór metod wielokryterialnych do oceny technologii,
  - ✧ zintegrowana ocena technologii z wykorzystaniem metod MCDA,
  - ✧ ranking alternatywnych wariantów NZW,
  - ✧ analiza porównawcza wyników oceny technologii oparta na różnych rodzajach MCDA.

Zintegrowaną ocenę przeprowadzono dla czterech wariantów technologii zgazowania węgla różniących się rodzajem węgla (kamienny oraz brunatny) oraz sposobem postępowania z CO<sub>2</sub> powstającym w procesie spalania gazu syntezowego. Ocenie poddano następujące warianty zgazowania węgla technologią Shell:

- ✧ W1 – technologia zgazowania węgla kamiennego bez sekwestracji CO<sub>2</sub>,
- ✧ W2 – technologia zgazowania węgla kamiennego z sekwestracją CO<sub>2</sub>,
- ✧ W3 – technologia zgazowania węgla brunatnego bez sekwestracji CO<sub>2</sub>,
- ✧ W4 – technologia zgazowania węgla brunatnego z sekwestracją CO<sub>2</sub>.

W analizowanej technologii zgazowania węgla, po wstępnym przygotowaniu, w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia w obecności tlenu, jest poddawany zgazowaniu, w rezultacie czego wytwarzany jest gaz syntezowy. Głównymi składnikami palnymi otrzymanego gazu są wodór i tlenek węgla. Surowy gaz jest poddawany oczyszczaniu i kondycjonowaniu, po czym następuje jego spalanie w układzie gazowo-parowym. Technologia pozwala na wytwarzanie energii elektrycznej z wysoką sprawnością, równocześnie umożliwiając wychwytywanie dwutlenku węgla, czego efektem jest znaczne obniżenie emisji gazów cieplarnianych. W ramach przeprowadzonych badań oceniono zarówno aspekt kosztowy, jak i środowiskowy wychwytywania dwutlenku węgla z gazu przed jego spalaniem. Funkcją systemu jest wytwarzanie energii elektrycznej z węgla z wykorzystaniem technologii jego zgazowania. Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto 1 MWh wytworzonej energii elektrycznej netto. W granicach systemu uwzględniono trzy etapy cyklu życia: inwestycji/budowy, eksploatacji oraz likwidacji (Burchart-Korol i in. 2013).

## 2. Metody analizy zastosowane w pracy

### 2.1. Metody oceny efektywności technicznej, środowiskowej oraz kosztowej

Metody oceny technologii zgazowania węgla zostały opracowane w ramach projektu strategicznego ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” i posłużyły do analizy porównawczej analizowanych technologii (Czaplicka-Kolarz i in. 2014).

W celu wykonania **oceny efektywności technicznej** obliczono sprawność energetyczną (iloraz energii na wyjściu do energii na wejściu) dla wszystkich analizowanych technologii zgodnie z przyjętym wzorem (1).

$$\eta = \frac{E_u}{E_d} \quad (1)$$

gdzie:  $E_u$  – energia użyteczna (energia wyprodukowana – energia elektryczna zużyta na potrzeby własne),

$E_d$  – energia dostarczona w paliwie (ilość węgla  $\times$  wartość opałowa górna węgla).

Do **oceny efektywności ekologicznej** wybrano metodę oceny cyklu życia (LCA). Ocena została wykonana z wykorzystaniem normy PN-EN ISO 14040:2009 w czterech etapach: określenie celu i zakresu pracy, zbieranie danych LCI (*Life Cycle Inventory*), ocena wpływu – LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) oraz interpretacja otrzymanych wyników dla wybranych kategorii szkód i kategorii wpływu. Jako metodę oceny wpływu cyklu życia technologii naziemnego zgazowania węgla wybrano metodę ReCiPe 2008. Wskaźniki kategorii wpływu i kategorii szkód w metodzie ReCiPe 2008 opisano szczegółowo w pracy (Goedkoop i Heijungs 2009). Wynik LCA w skumulowanej postaci podany jest w ekopunktach (Pt) i obejmuje następujące kategorie wpływu na środowisko: zmiana klimatu, zubożenie warstwy ozonowej, zakwaszenie lądowe, eutrofizacja wód, tworzenie smogu fotochemicznego, tworzenie pyłów, toksyczność dla ludzi, ekotoksyczność, zagospodarowanie terenu, zużycie wody, wykorzystanie zasobów mineralnych oraz wykorzystanie paliw kopalnych. Jeden ekopunkt (1 Pt) reprezentuje tysięczną część rocznych szkód w środowisku, które powoduje jeden mieszkaniec Europy.

**Ocena efektywności kosztowej** wykonana została z zastosowaniem metody LCC (koszt cyklu życia). Analiza LCC obejmuje główne fazy cyklu życia technologii. LCC oblicza się zgodnie z wzorem (2)

$$LCC = Koszt_{nabycia} + Koszt_{posiadania} + Koszt_{likwidacji}$$

gdzie w przypadku technologii zgazowania węgla należy uwzględnić w szczególności:

- $Koszt_{nabycia}$  – wszelkie nakłady inwestycyjne  
(w tym badania, przygotowanie dokumentacji itp.)
- $Koszt_{posiadania}$  – koszty eksploatacyjne instalacji,
- $Koszt_{likwidacji}$  – koszty likwidacji instalacji naziemnych, zabezpieczenia podziemnych pustek poeksploatacyjnych, rekultywacji terenu itp.

Analizy LCC przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 60300-3-3 „Zarządzanie niezawodnością. Przewodnik zastosowań. Szacowanie kosztu cyklu życia”. Norma określa metodykę szacowania kosztu cyklu życia, jego cele, podział na poszczególne fazy, opisuje pojęcie niezawodności i koszty z nią związane, a także zawiera przykłady analizy kosztu cyklu życia. W celu odniesienia wyników analiz LCC do przyjętej jednostki funkcjonalnej zastosowano metodykę dynamicznego kosztu jednostkowego (*Dynamic Generation Cost – DGC*).

DGC pokazuje, jaki jest techniczny koszt uzyskania jednostki produktu (jednostki ilości wytworzonej energii elektrycznej).

## 2.2. Metody analiz wielokryterialnych

Metody wielokryterialne służą do agregacji kryteriów, która ma umożliwić porównywanie wariantów decyzyjnych i uzyskanie ich rankingu. W literaturze mamy wiele rodzajów metod wielokryterialnych. Na szczególną uwagę zasługują **metoda analitycznej hierarchizacji (AHP)** oraz **metody oparte na relacji przewyższania – Electree i Promethee**.

**Metoda analitycznej hierarchizacji (AHP)** polega na przypisaniu każdemu wariantowi wskaźnika liczbowego, który umożliwi stworzenie hierarchii ocenianych wariantów. Proces wyznaczania wskaźnika hierarchizacji rozpoczyna się od bardzo szczegółowej oceny ważności kryteriów. Porównujemy parami istotność kryteriów posługując się dziewięciostopniową skalą Saaty'ego. W przypadku oceny technologii naziemnego zgazowania węgla kryteria mają charakter ilościowy. Niepotrzebna jest zatem procedura porównań parami wariantów. Powstaje tutaj jednak pytanie – jak dobrać wyżej opisane wartości porównań kryteriów, aby ocena była jak najbardziej obiektywna. Ponieważ kryteria dotyczące oceny technologii naziemnego zgazowania węgla dotyczą wielu aspektów dobrze byłoby, gdyby ustaliło je grono ekspertów z różnych dziedzin, tak by wynik był jak najbardziej obiektywny. Szczegółowy opis metody AHP został przedstawiony w pracy (Trzaskalik, red. 2006).

Korzystając z rodziny metod **Promethee**, analizę rozpoczynamy od porównań parami wariantów technologii ze względu na każde kryterium i wyznaczamy różnicę między ocenami  $\delta_k(a_i, a_j)$ ,  $k = 1, \dots, n$ . W metodzie Promethee ustala się zależność funkcyjną siły preferencji od wartości  $\delta_k(a_i, a_j)$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Ponieważ uwzględnione w pracy kryteria mają charakter destymulant, czyli bardziej pożądane są ich mniejsze wartości, należy dokonać następującego przekształcenia:

$$d_k(a_i, a_j) = -\delta_k(a_i, a_j), \quad k = 1, \dots, n \quad (3)$$

W literaturze proponuje się sześć typów funkcji preferencji. W niniejszej pracy zastosowano wzór:

$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases} \quad (4)$$

gdzie  $p$  oznacza próg silnej preferencji, a  $q$  próg równoważności (Brans i Mareschal 2005).

Próg równoważności jest to maksymalna wartość różnicy między wariantami, liczonej na podstawie tego samego kryterium, dla której warianty uznajemy za nierozróżnialne pod

względem tego kryterium. Natomiast próg ścisłej preferencji jest to najmniejsza wartość  $d$ , dla której przyjmujemy ścisłą preferencje jednego wariantu nad drugim.

W metodzie Promethee I i Promethee II po wyznaczeniu funkcji preferencji należy wyznaczyć zagregowaną ocenę wariantu technologii (5), gdzie  $w_k$  jest ustaloną przez decydenta oceną ważności kryterium.

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^n P_k(a_i, a_j) w_k \quad (5)$$

Następnym etapem metody jest ustalenie przepływów przewyższania, co przedstawia (6).

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m \pi(a_i, a_j) \quad (6)$$

$$\phi^-(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m \pi(a_i, a_j)$$

Przepływ pozytywny pokazuje stopień, w jakim wariant technologii przewyższa pozostałe warianty, natomiast przepływ negatywny pokazuje stopień, w jakim wariant jest przewyższany przez pozostałe warianty. W zastosowanej w niniejszej pracy metodzie Promethee II oblicza się tzw. przepływy przewyższania netto, wyrażone wzorem (7), na których podstawie wyznacza się ranking wariantów (Trzaskalik, red. 2014).

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i) \quad (7)$$

Kolejną metodą agregacji kryteriów opisujących warianty decyzyjne jest – posiadająca kilka odmian – metoda **Electree**. Jest ona podobnie jak Promethee oparta na teorii preferencji. W niniejszym artykule skupimy się na odmianie Electree I. W tej metodzie arbitralnymi wartościami ustalonymi przez decydenta są: wagi kryteriów oraz progi weta i próg zgodności. Obliczenia należy rozpocząć od ustalenia, dla których par wariantów zachodzi relacja preferencji, biorąc przy tym pod uwagę jej kierunek. Dla uwzględnionych w pracy wartości kryteriów trzeba zatem wyznaczyć wartości przedstawione wzorem (8), a następnie współczynniki zgodności (9).

$$\varphi(a_i, a_j) = \begin{cases} 1, & \text{gdzie } f_k(a_i) < f_k(a_j) \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (8)$$

$$c(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^n w_k \varphi_k(a_i, a_j) w_k \quad (9)$$

Wszystkie pary  $(a_i, a_j)$  spełniające warunek  $c(a_i, a_j) \geq s$  ( $s \in [0,5;1)$ ) tworzą zbiór zgodności  $Z$ . Kolejnym krokiem jest wyznaczenie progu weta  $v_k$ , który wykorzystujemy do sprawdzenia, czy wartość jednego kryterium nie przewyższa w znaczny sposób wartości tego kryterium w innym wariantcie. Próg weta ustalamy dla każdego kryterium osobno. Dla par  $(a_i, a_j)$ , dla których istnieje takie  $k$  spełniające nierówność wyrażoną wzorem matematycznym (10) wyznaczamy zbiór niezgodności  $N$ .

$$f_k(a_j) + v_k < f_k(a_i) \quad (10)$$

Zbiór par wariantów spełniających relacje przewyższania to zbiór  $Z$  pomniejszony o zbiór  $N$ . Na podstawie tego zbioru można wyznaczyć graf przedstawiający ranking wariantów (Trzaskalik, red. 2006).

### 3. Rezultaty

#### 3.1. Ocena efektywności technicznej środowiskowej oraz kosztowej

Dla każdego wariantu technologii naziemnego zgazowania wykonano ocenę efektywności technicznej, kosztowej oraz ocenę cyklu życia. Wyniki oceny efektywności technicznej, środowiskowej oraz kosztowej przedstawiono w tabeli 1.

Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto 1 MWh wytworzonej energii elektrycznej netto. W celach porównawczych wszystkie wyniki analiz zostały odniesione do tej samej jednostki funkcjonalnej.

TABELA 1. Wyniki oceny efektywności technicznej, środowiskowej oraz kosztowej

TABLE 1. Results of the evaluation of technical efficiency, environmental and cost

Aspekty	Kryterium oceny	Jednostka	W1	W2	W3	W4
Techniczne	sprawność	%	34,8	33,1	43,0	32,2
Środowiskowe	LCA – emisja gazów cieplarnianych	kg CO <sub>2</sub> eq/FU	894,57	267,68	797,60	147,26
	LCA – toksyczność dla ludzi	kg 1,4-DB eq/FU	9,75	17,56	4,57	11,14
	LCA – wyczerpywanie paliw kopalnych	kg eq ropy/FU	249,02	330,48	125,59	176,25
	LCA – razem	Pt/FU	67,39	47,9	49,62	25,74
Kosztowe	DGC	zł/FU	416,67	588,24	384,62	555,56

FU (*Functional Unit*) – jednostka funkcjonalna – ilościowy efekt systemu produkcyjnego stosowany jako jednostka odniesienia.

1,4-DB (1,4 *dichlorobenzene*) – 1,4-dichlorobenzen

Wszystkie założenia i szczegółowy opis prac dotyczący poszczególnych ocen efektywności technologii naziemnego zgazowania węgla zostały przedstawione w pracach autorów niniejszej publikacji (Burchart-Korol i in. 2013; Czaplicka-Kolarz i in. 2013).

### 3.2 Zintegrowana ocena efektywności technicznej, środowiskowej oraz kosztowej

Przedstawiono wyniki zintegrowanej oceny technologii z zastosowaniem metod wielokryterialnych uwzględniając uzyskane wyniki efektywności środowiskowej, kosztowej oraz technicznej. Ocena cyklu życia LCA oraz koszty cyklu życia w ujęciu jednostkowym uwzględniają sprawność energetyczną technologii, dlatego kryterium oceny efektywności technicznej zostało włączone w ramach poszczególnych analiz LCA i DGC. Analizy wielokryterialne wykonano metodami AHP, ELECTRE I oraz PROMETHEE II dla różnych scenariuszy wag kryteriów.

TABELA 2. Rankingi wariantów technologii przy uwzględnieniu kryteriów: LCA i DGC

TABLE 2. Rankings variants taking into account the following criteria: LCA and DGC

Metoda	Scenariusz	Pozycja w rankingu	1	2	3	4
AHP	Scenariusz 1	Wskaźnik	1,77	1,97	2,38	2,6
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
	Scenariusz 2	Wskaźnik	0,97	1,31	1,44	1,69
		Nr wariantu	W4	W3	W2	W1
	Scenariusz 3	Wskaźnik	1,54	1,67	1,83	2,02
		Nr wariantu	W3	W4	W1	W2
Promethee II	Scenariusz 1	Wskaźnik	-0,47	-0,22	0,19	0,50
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
	Scenariusz 2	Wskaźnik	-0,33	-0,17	0,23	0,27
		Nr wariantu	W4	W3	W2	W1
	Scenariusz 3	Wskaźnik	-0,32	-0,07	0,02	0,37
		Nr wariantu	W3	W4	W1	W2
Electre I	Scenariusz 1	(W3) → (W1,W4) → (W2)				
	Scenariusz 2	W4 → W2 ↘ W3 → W1				
	Scenariusz 3	W3 → W1 W4 → W2				



Ustalono następujące scenariusze i przyjęto dla nich następujące wagi:

- ✧ Scenariusz 1 – 30% dla LCA, 70% dla DGC,
- ✧ Scenariusz 2 – 70% dla LCA, 30% dla DGC,
- ✧ Scenariusz 3 – 50% dla LCA, 50% dla DGC.

Rankingi wariantów wyznaczone metodą AHP, Promethee II oraz Electre I zgodnie z opracowanymi scenariuszami zostały przedstawione w tabeli 2.

Kolejnym etapem prac była analiza technologii uwzględniająca poszczególne kategorie wpływu na środowisko (pozostałe kryteria oceny technologii pozostają takie same).

W pierwszym przypadku wzięto pod uwagę do zintegrowanej oceny technologii jako kategorię wpływu na środowisko – wskaźnik emisji gazów cieplarnianych. Oceny dokonano dla trzech scenariuszy w zależności od istotności danego kryterium, co umożliwiło przedstawienie rankingu technologii wyznaczone metodą AHP, Promethee II oraz Electre I dla następujących scenariuszy (tab. 3):

TABELA 3. Rankingi wariantów technologii przy uwzględnieniu kategorii wpływu na środowisko – wskaźnik emisji gazów cieplarnianych

TABLE 3. Rankings variants taking into account the following impact category: greenhouse gas emissions

Metoda	Scenariusz	Pozycja w rankingu	1	2	3	4
AHP	Scenariusz 4	Wskaźnik	1,75	1,90	2,31	2,47
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
	Scenariusz 5	Wskaźnik	0,62	0,78	1,20	1,34
		Nr wariantu	W4	W2	W3	W1
	Scenariusz 6	Wskaźnik	1,46	1,48	1,62	1,62
		Nr wariantu	W4	W3	W1	W2
Promethee II	Scenariusz 4	Wskaźnik	-0,31	-0,21	0,20	0,31
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
	Scenariusz 5	Wskaźnik	-0,31	-0,21	0,22	0,30
		Nr wariantu	W4	W2	W3	W1
	Scenariusz 6	Wskaźnik	-0,06	-0,05	0,05	0,05
		Nr wariantu	W4	W3	W1	W2
Electre I	Scenariusz 4	W3 → W1 ↘ W4 → W12				
	Scenariusz 5	W4 → W2 ↘ W3 → W1				
	Scenariusz 6	W3 → W1 W4 → W2				

- ✧ Scenariusz 4 – 30% dla emisji gazów cieplarnianych, 70% dla DGC,
- ✧ Scenariusz 5 – 70% dla emisji gazów cieplarnianych, 30% dla DGC,
- ✧ Scenariusz 6 – 50% dla emisji gazów cieplarnianych, 50% dla DGC.

W drugim przypadku uwzględniono do zintegrowanej oceny technologii jako kategorię wpływu na środowisko – wpływ technologii produkcji energii z zastosowaniem naziemnego zgazowania węgla na wyczerpywanie paliw kopalnych (tab. 4):

- ✧ Scenariusz 7 – 30% dla wyczerpywania paliw kopalnych, 70% dla DGC,
- ✧ Scenariusz 8 – 70% dla wyczerpywania paliw kopalnych, 30% dla DGC,
- ✧ Scenariusz 9 – 50% dla wyczerpywania paliw kopalnych, 50% dla DGC.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że w ramach każdego scenariusza metoda AHP i Promethee dały taki sam ranking wariantów. Oznacza to, że różnice między wartościami kryteriów były na tyle istotne, że odmienne podejścia do ich agregacji nie spowodowały, że otrzymano różne wyniki. Metoda Electre I pozwoliła na przedstawienie niepełnych rankingów. Na te luki wpłynęło wprowadzenie progu zgodności  $s = 0,6$  oraz ustalenie progów weta w wysokości 95% różnicy między maksymalną a minimalną wartością kryterium. Niepełny ranking z jednej strony utrudnia analizę wariantów decyzyjnych, ale jednocześnie wnosi

TABELA 4. Rankingi wariantów technologii przy uwzględnieniu kategorii wpływu na środowisko – wyczerpywanie paliw kopalnych

TABLE 4. Rankings variants taking into account the following impact category: fossil resources depletion

Metoda	Scenariusz	Pozycja w rankingu	1	2	3	4
AHP	Scenariusz 7	Wskaźnik	1,68	1,91	2,42	2,68
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
	Scenariusz 8	Wskaźnik	0,83	1,17	1,35	1,83
		Nr wariantu	W3	W4	W1	W2
	Scenariusz 9	Wskaźnik	1,25	1,63	1,79	2,25
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
Promethee II	Scenariusz 7	Wskaźnik	-0,71	-0,33	0,3	0,75
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
	Scenariusz 8	Wskaźnik	-0,72	-0,1	0,01	0,8
		Nr wariantu	W3	W4	W1	W2
	Scenariusz 9	Wskaźnik	-0,71	-0,16	0,1	0,77
		Nr wariantu	W3	W1	W4	W2
Electre I	Scenariusz 7	W3 → W1 → W4 → W2				
	Scenariusz 8	W3 → W4 → W1 → W2				
	Scenariusz 9	(W3) → (W1,W4) → (W2)				

bardzo ważne informacje. Zadziałanie prognozy oznacza, że hipotezę o preferencji wariantu  $w_a$  nad wariantem  $w_b$  należy odrzucić, gdyż jedno kryterium opisujące wariant  $w_b$  znacząco przewyższa jego wartość dla wariantu  $w_a$ , dlatego istnieje nieporównywalność wariantów.

## Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszego artykułu było przedstawienie możliwości zastosowania metod wielokryterialnych do oceny technologii energetycznych na przykładzie naziemnego zgazowania węgla. Przedstawiono metodykę postępowania w procesie wielokryterialnego wspomaganego decyzji dotyczącej zintegrowanej oceny technologii uwzględniając trzy kryteria: ocenę środowiskową, kosztową i techniczną.

Na podstawie przeprowadzonej zintegrowanej oceny efektywności środowiskowej, kosztowej i technicznej technologii produkcji energii elektrycznej opartej na naziemnym zgazowaniu węgla z wykorzystaniem metod wielokryterialnych, wysunięto następujące wnioski:

1. Stwierdzono, że wynik rankingu oceny technologii zależy od wyboru istotności kryteriów oraz założeń decydenta. Wynik zależy również od wyboru kategorii wpływu przyjętej do oceny efektywności środowiskowej.
2. Stwierdzono również, że wyniki zintegrowanej oceny dla poszczególnych scenariuszy pozwoliły na uzyskanie takiej samej pozycji w rankingu technologii w przypadku zastosowania różnych metod wielokryterialnych, co oznacza, że wybór metody w tym przypadku nie determinuje wyniku oceny.
3. Przy założeniu największej istotności kryteriów oceny dla wyników efektywności kosztowej (DGC – 70%) stwierdzono, że technologia zgazowania węgla brunatnego bez sekwestracji CO<sub>2</sub> (W3) ma najwyższą pozycję w rankingu ocenianych technologii.
4. Przy założeniu największej istotności kryteriów oceny dla wyników efektywności środowiskowej (LCA – 70%) stwierdzono, że technologia zgazowania węgla brunatnego z sekwestracją CO<sub>2</sub> (W4) ma najwyższą pozycję w rankingu ocenianych technologii. Taki sam wynik uzyskano przy wyborze dla LCA kategorii wpływu – wskaźnik emisji gazów cieplarnianych. W przypadku wyboru wskaźnika wykorzystania paliw kopalnych stwierdzono, że najwyższą w rankingu znajduje się technologia zgazowania węgla brunatnego bez sekwestracji CO<sub>2</sub> (W3).
5. Zastosowanie sekwestracji CO<sub>2</sub> prowadzi do znacznego ograniczenia wpływu w kategorii emisji gazów cieplarnianych, ale jednocześnie przyczynia się do wzrostu oddziaływania na środowisko w dwóch kategoriach wpływu: toksyczności dla ludzi oraz wykorzystania paliw kopalnych. Wzrost ten jest spowodowany zmniejszeniem sprawności energetycznej.
6. Wykonane analizy z zastosowaniem metod wielokryterialnych pozwoliły na stwierdzenie, że technologia zgazowania węgla brunatnego cechuje się najwyższą efektywnością środowiskową i kosztową w porównaniu z technologiami opartymi na węglu kamiennym.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wielokryterialnych stwierdzono, że wynik oceny w dużym stopniu determinowany jest założeniami decydentów. Zmiany w określeniu ważności

kryteriów mają wpływ na ostateczną klasyfikację wariantów, a wyniki w dużej mierze zależą od preferencji decydenta. Agregacja wartości kryteriów, które opisują warianty umożliwia wieloaspektową ocenę technologii zarówno pod względem wpływu na środowisko, jak i pod względem oceny efektywności technicznej oraz kosztowej, dzięki czemu możliwa jest bardziej holistyczna ocena technologii.

Wykonane prace pozwoliły na stwierdzenie, iż metody wielokryterialne mogą stanowić narzędzie wspomagania decyzji, szczególnie w przypadku wyboru alternatywnych technologii.

Praca została wykonana w ramach projektu pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

## Literatura

- [1] BECCALI i in. 1998 – BECCALI, M., CELLURA, M. i ARDENTE, D. 1998. Decision making in energy planning: the Electre multicriteria analysis approach compared to a fuzzy-sets methodology. *Energy Conversion and Management* No 39.
- [2] BRANS, J.P. i MARESCHAL, B. 2005. Multiple criteria decision analysis. State of the Art Surveys, Chapter 5 PROMETHEE Methods, Springer Science + Business Media, Inc., Boston.
- [3] BURCHART-KOROL i in. 2013 – BURCHART-KOROL, D., KRAWCZYK, P., ŚLIWIŃSKA, A. i CZAPLICKA-KOLARZ, K. 2013. Ocena ekoefektywności systemu produkcyjnego technologii naziemnego zgazowania węgla. *Przemysł Chemiczny* nr 3.
- [4] BURCHART-KOROL i in. 2014 – BURCHART-KOROL, D., KOROL, J. i FUGIEL, A. 2014. Development of Eco-efficiency Evaluation with Multicriteria Analysis for Steel Production, *23rd International Conference on Metallurgy and Materials Conference Proceedings*, Ostrava.
- [5] CZAPLICKA-KOLARZ i in. 2013 – CZAPLICKA-KOLARZ, K., GADEK, M., PANKIEWICZ, M., ŚLIWIŃSKA, A. i WODOŁAŻSKI, A. 2013. Ocena efektywności technicznej i środowiskowej technologii zgazowania węgla w złożach: strumieniowym, przesuwym i fluidalnym, *KARBO* nr 1.
- [6] CZAPLICKA-KOLARZ, K. i in. 2014 – *Raport merytoryczny Cz.T.B. nr 8.2.2: Ocena efektywności technicznej, ekologicznej oraz kosztów technologii naziemnego zgazowania węgla, w ramach projektu pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”* GIG czerwiec 2014. Materiał niepublikowany.
- [7] GOEDKOOP, M. i HEIJUNGS, R. 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. *Ruimte en Milieu*.
- [8] NIEMOTKO i in. 2012 – NIEMOTKO, K., ŚLIWIŃSKA, A. i CZAPLICKA-KOLARZ, K. 2012. Analiza porównawcza cyklu życia technologii naziemnego zgazowania węgla i elektrowni węglowej. *XII Międzynarodowa Konferencja Innowacyjność i Jakość w Gospodarce Zorientowanej na Redukcję CO<sub>2</sub>*. Boszkowo.
- [9] POHEKAR, S.D. i RAMACHANDRAN, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* No 8.
- [10] TRZASKALIK, T. red. 2006. *Metody wielokryterialne na polskim rynku finansowym*. PWE, Warszawa.
- [11] TRZASKALIK, T. red. 2014. *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Metody i zastosowania*. PWE, Warszawa.

- [12] TSOUTSOS i in. 2009 – TSOUTSOS, T., DRANDAKI, M., FRANTZESKAKI, N., IOSIFIDIS, E. i KIOSSES, I. 2009. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete, *Energy Policy* No 37.

Krystyna CZAPLICKA-KOLARZ, Agata FUGIEL, Dorota BURCHART-KOROL

## Integrated assessment of environmental, cost, and technical performance for energy production based on coal gasification technology using multi-criteria methods

### Abstract

This article presents the application of multi-criteria methods for integrated assessment of electricity production based on coal gasification technology. The paper evaluates ground coal gasification technology as a potential for further use of coal in Poland. Analyses were performed for the four variants of coal gasification technologies which differ in the type of coal used as well as in the application of CO<sub>2</sub> sequestration. The assessment of environmental performance and cost are made on the basis of evaluating the life cycle of the technology. The environmental assessment, for example, presents the results of a life cycle assessment (LCA) taking into account three impact categories, and cost evaluation was performed based on the life cycle cost (LCC). Technical efficiency was calculated on the basis of energy efficiency. In order to perform an integrated assessment of the technologies used, three methods of multi-criteria examination were applied – Electre, AHP, and Promethee – which allowed for the consideration of the relevance of the evaluation criteria used. Based on these analyses, it was found that the application of multi-criteria methods in sustainable energy management can be a tool for decision support in investment projects, especially in considering the choice of alternative technologies.

KEY WORDS: energy generation, coal gasification, multi-criteria analysis, life cycle assessment, life cycle cost

