

Analiza wrażliwości efektywności technologii podziemnego zgazowania węgla

Sensitivity analysis of eco-efficiency for the underground coal gasification process



*Dr hab. inż. Dorota Burchart-Korol
prof. nadzw^{*)}*



*Prof. dr hab. inż. Krystyna
Czaplicka-Kolarz^{*)}*



Mgr inż. Piotr Krawczyk^{)}*

Treść: W artykule przedstawiono wyniki analizy wrażliwości efektywności technologii wytwarzania energii elektrycznej w procesie podziemnego zgazowania węgla. Analiza efektywności integruje wyniki oceny efektywności kosztowej metodą kosztów cyklu życia (LCC – *Life Cycle Costing*) oraz wyniki oceny środowiskowej metodą analizy cyklu życia LCA (*Life Cycle Assessment*). Analizę efektywności przeprowadzono dla technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową w zakresie od przygotowania złoża, uzyskania gazu procesowego oraz jego oczyszczenia do otrzymania energii elektrycznej oraz opcjonalnie sekwestracji ditlenku węgla (CCS – *Carbon Capture and Storage*). Przeprowadzona analiza wrażliwości wykazała, że największy wpływ na efektywność technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową, zarówno z, jak i bez CCS, ma dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej, a w następnej kolejności miąższość pokładu węgla. Kolejne istotne czynniki wpływające na wynik to: długość kanałów poziomych (w technologii podziemnego zgazowania z CCS) i ceny praw do emisji CO₂ (w technologii podziemnego zgazowania bez CCS).

Abstract: This paper presents the results of sensitivity analysis of eco-efficiency assessment of energy production technologies based on underground coal gasification. Eco-efficiency analysis integrates the results of the cost analysis based on Life Cycle Costing (LCC) and environmental impact assessment based on Life Cycle Assessment (LCA). Eco-efficiency analysis was performed for the underground coal gasification process, and includes: syngas obtained and its purification, energy production and optionally Carbon Capture and Storage (CCS). Sensitivity analysis of eco-efficiency of energy production based on underground coal gasification process allowed to determine the hierarchy of the impact of the variables considered critical for eco-efficiency of the technologies, such as the availability of electricity generation capacity, and further the coal seam thickness. Other important factors affecting the results are the length of horizontal channels (underground coal gasification with CCS) and the price of CO₂ emission rights (underground coal gasification without CCS).

Słowa kluczowe:

efektywność, ocena cyklu życia, koszty cyklu życia, podziemne zgazowanie węgla, analiza wrażliwości

Key words:

eco-efficiency, Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost, underground coal gasification, sensitivity analysis

1. Wprowadzenie

Jedną z niekonwencjonalnych metod uzyskiwania energii elektrycznej jest wytwarzanie jej ze spalania gazu syntezowego uzyskiwanego w procesie podziemnego zgazowania węgla (PZW). Technologia PZW charakteryzuje się pozytywnymi aspektami środowiskowymi, takimi jak brak odpadów stałych (popiół i żużel) oraz mniejsza emisja zanieczyszczeń pyłowo-gazowych do powietrza [1÷4]. Proces PZW można prowadzić

dwoma metodami: szybową – poprzez udostępnienie pokładu węgla z chodnika kopalnianego oraz bezszybową – poprzez udostępnienie pokładu węgla za pomocą wierceń z powierzchni ziemi [5]. PZW metodą bezszybową polega na udostępnieniu pokładu węgla przeznaczonego do zgazowania przez otwory wykonywane z powierzchni terenu. Część otworów przeznaczona jest do zatłaczania czynnika zgazowującego, pozostałymi odbierane są produkty. Na świecie większość przeprowadzanych eksperymentów odbywa się metodą bezszybową, najwięcej eksperymentów PZW przeprowadzono w Stanach Zjednoczonych. Charakterystyka technologii podziemnego zgazowania węgla metodą szybową i bezszybową

^{*)} Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

została przedstawiona w pracy [5]. Wyniki analizy przepływu materiałów (MFA – *Material Flow Analysis*) dla technologii podziemnego zgazowania metodą bezszybową zostały pokazane w pracy [6].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy efektywności technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową, jak również wyniki analizy wrażliwości, określającej wpływ poszczególnych czynników (zmiennych krytycznych) na wyniki oceny efektywności. Analiza wrażliwości należy do często stosowanych narzędzi oceny ryzyka – służy do określenia potencjalnego ryzyka związanego z realizacją i eksploatacją inwestycji. Polega ona na ocenie wpływu zmian, jakie mogą wystąpić w przyszłości w kształtowaniu się kluczowych zmiennych wpływających na opłacalność projektu. Zgodnie z tą metodą bada się wrażliwość wyników oceny projektu/technologii na zmiany poszczególnych czynników [7]. W standardowej analizie wrażliwości zakłada się, iż modyfikacje każdej uwzględnionej zmiennej będą rozpatrywane przy niezmienności pozostałych parametrów. Dzięki takiemu podejściu istnieje możliwość określenia, który z kluczowych czynników oddziałuje najbardziej na projekt inwestycyjny. Zastosowanie analizy wrażliwości pozwala na uzyskanie informacji na temat dopuszczalnych odchyleń poszczególnych zmiennych objaśniających, przy których przedsięwzięcie inwestycyjne jest jeszcze opłacalne [8,9]. Analiza wrażliwości jest jedną z metod pozwalających na właściwe określenie parametrów, które będą miały wpływ na zmianę wartości projektu inwestycyjnego [10, 11]. Analiza wrażliwości wykorzystuje się również w obszarze modelowania systemów produkcyjnych, gdzie jej zakres koncentruje się na analizie wpływu niepewności – zmiennych krytycznych przyjętych do modelowania na efekty działania systemu [12]. Oddziaływanie poszczególnych parametrów na efektywność projektu w analizie wrażliwości interpretuje się graficznie badając nachylenie krzywych wrażliwości badanych zmiennych krytycznych [11].

2. Metody oceny cyklu życia, koszty cyklu życia oraz efektywność

Efektywność po raz pierwszy została zdefiniowana przez Światową Radę Biznesu na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju jako dostarczanie wyrobów i usług w konkurencyjnej cenie, które spełniają potrzeby człowieka i podnoszą jego jakość życia, ograniczając wpływ na środowisko i zużycie zasobów w całym cyklu życia. Głównym celem oceny efektywności jest analiza porównawcza różnych rozwiązań, uwzględniająca równocześnie czynniki ekonomiczne i środowiskowe. Efektywność jest narzędziem, które umożliwia zintegrowaną ocenę wpływu na środowisko oraz ocenę ekonomiczną systemu wyrobu lub technologii, uwzględniając perspektywę cyklu życia [13,14]. Ocenę efektywności przeprowadza się w pięciu następujących etapach:

1. Zdefiniowanie celu i zakresu analiz efektywności
2. Ocena efektywności środowiskowej
3. Ocena kosztowa
4. Obliczenie efektywności
5. Interpretacja

Wskaźnik oceny efektywności środowiskowej do oceny efektywności zgodnie z normą ISO 14045:2012 powinien być uzyskany w oparciu o technikę LCA, która pozwala ocenić zużycie materiałów i energii oraz wpływ na środowisko w całym cyklu życia. Na podstawie analiz techniką LCA można nie tylko ocenić wpływ technologii na poszczególne kategorie wpływu, m.in. zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu

czy zużycie zasobów, ale również określić które elementy procesu generują największe obciążenie środowiska, w zależności od stosowanej metody oceny wpływu. Drugą składową efektywności związaną z oceną wartości systemu wyrobu, może być ocena kosztów cyklu życia.

W obliczeniach zastosowano metodę analizy efektywności wykorzystującą ocenę cyklu życia LCA oraz ocenę kosztów cyklu życia LCC. Wskaźnik efektywności kosztowej obliczono zgodnie z opracowaną formułą (1):

$$EFE = \left(\frac{\sum_{t=0}^n \frac{LCA_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{P_t}{(1+i)^t}} \cdot \frac{\sum_{t=0}^n \frac{LCC_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{P_t}{(1+i)^t}} \right)^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- EFE – efektywność
- LCA_t – wyniki analizy LCA w danym roku budowy/funkcjonowania/likwidacji instalacji;
- LCC_t – wyniki analizy LCC w danym roku budowy/funkcjonowania/likwidacji instalacji;
- P_t – wielkość produkcji energii elektrycznej w danym roku;
- i – stopa dyskontowa;
- t – rok, przyjmuje wartości od 0 do n , gdzie 0 jest rokiem, w którym ponosimy pierwsze koszty (pierwszy rok budowy), natomiast n jest rokiem likwidacji instalacji.

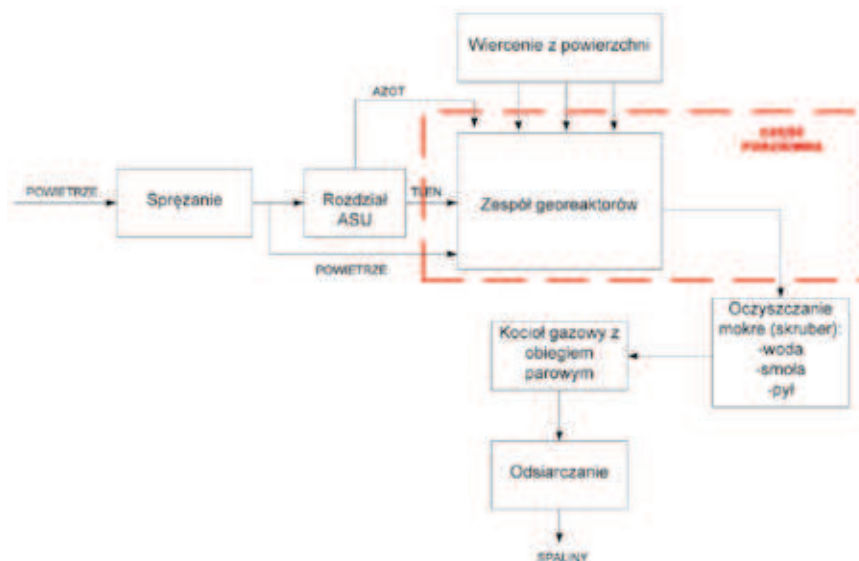
3. Analizy własne

3.1. Cel i zakres wykonanych analiz

W celu wykonania analizy wrażliwości efektywności technologii zgazowania węgla wykorzystano wyniki prac wykonanych w ramach projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” [15,16]. Analiza wrażliwości efektywności podziemnego zgazowania węgla wykonana została dla dwóch modelowych wariantów technologii zgazowania metodą bezszybową (rys 1 i 2).

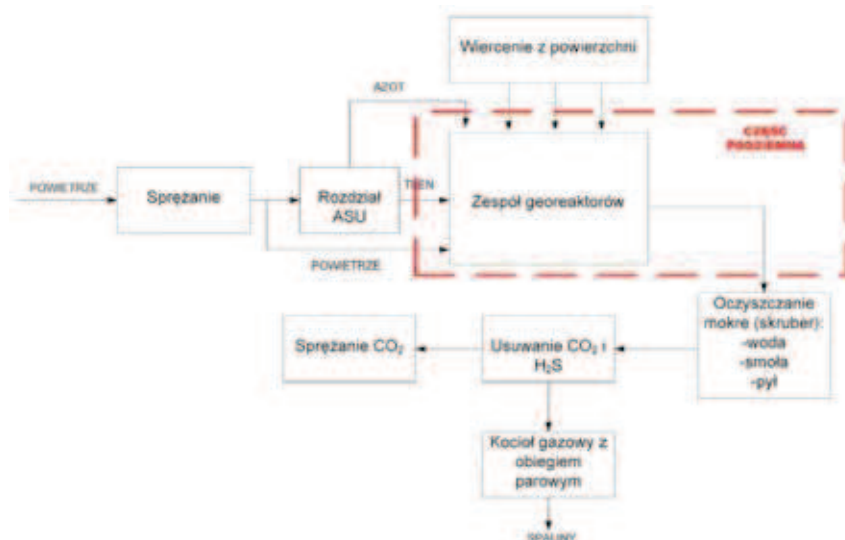
Analiza wrażliwości efektywności technologii podziemnego zgazowania węgla wymagała przeprowadzenia następujących prac:

- określenie celu i zakresu analiz oraz granic systemu do przeprowadzenia analiz efektywności środowiskowej, kosztowej oraz efektywności dla dwóch wariantów technologii podziemnego zgazowania węgla – z CCS i bez CCS,
- ocena efektywności środowiskowej techniką LCA metodą ReCiPe 2008,
- ocena kosztowa technologii zgazowania techniką LCC,
- analiza efektywności technologii,
- ustalenie kluczowych zmiennych, które uwzględniono w analizach,
- określenie wiarygodnego przedziału zmienności dla poszczególnych parametrów (zmiennych krytycznych),
- wykonanie obliczeń wskaźników oceny efektywności środowiskowej, kosztowej oraz efektywności dla dwóch wariantów podziemnego zgazowania z uwzględnieniem wszystkich przyjętych zmiennych krytycznych,
- określenie hierarchii wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźników kosztowej, środo-



Rys.1. PZW metodą bezszybową bez CCS [6]

Fig. 1. UCG by use of non-shaft method without CCS [6]



Rys. 2. PZW metodą bezszybową z CCS [6]

Fig. 2. UCG by use of non-shaft method with CCS [6]

wiskowego oraz efektywności technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową w kierunku produkcji energii elektrycznej.

Zakres prac dotyczył dwóch wariantów technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową (z CCS lub bez CCS). W celu wykonania analizy efektywności środowiskowej, kosztowej i efektywności określono granice systemu podziemnego zgazowania w zakresie od etapu przygotowania złoża (w tym wiercenia przygotowawcze i wstępne), poprzez budowę naziemnej infrastruktury, wytwarzanie czynników zgazowujących (tlen), proces zgazowania, oczyszczanie gazu i uzyskanie energii elektrycznej. Przeprowadzone analizy efektywności środowiskowej, kosztowej oraz efektywności technologii podziemnego zgazowania węgla uwzględniały również łańcuch technologiczny związany z sekwestracją dwutlenku węgla obejmujący jego wychwytywanie, sprężanie, przesył rurociągiem, zatłaczanie do pustek podziemnych oraz magazynowanie.

W pracy zastosowano metodę analizy efektywności opartą na ocenie cyklu życia LCA oraz kosztach cyklu życia LCC. Posłużono się wzorem przedstawionym we wcześniejszych pracach autorów [13,14]. Zebrane dane do analiz zostały przeliczone z uwzględnieniem uwarunkowań krajowych i założonej skali instalacji. Takie przeliczenie jest niezbędne w celu uzyskania porównywalności wyników. Analizy efektywności przeprowadzono dla technologii zgazowania w kierunku uzyskania energii elektrycznej o ilości zgazowanego węgla 10 Mg/h.

W analizie wrażliwości przyjęto, iż zmienną objaśnianą (bazową) jest wskaźnik efektywności (a także pośrednio – wskaźnik LCA i LCC), a zmienną objaśniającą (zmienną objaśniającą niezależną, której zmiana nie wpływa w sposób bezpośredni na inne zmienne) są zmiany poszczególnych parametrów. Głównym celem wykonanych analiz jest pokazanie wrażliwości wyników oceny środowiskowo-kosztowej (kryterium decyzyjnego – efektywność) na zmianę ustalonych parametrów. Wykonane analizy pozwalają odpowiedzieć na

pytanie, o ile zmieni się wartość parametru decyzyjnego – wskaźnik ekoefektywności (w tym wskaźnik *LCA* i *DGC*), jeśli wartość zmiennych krytycznych zmieni się o przyjęte odchylenie procentowe.

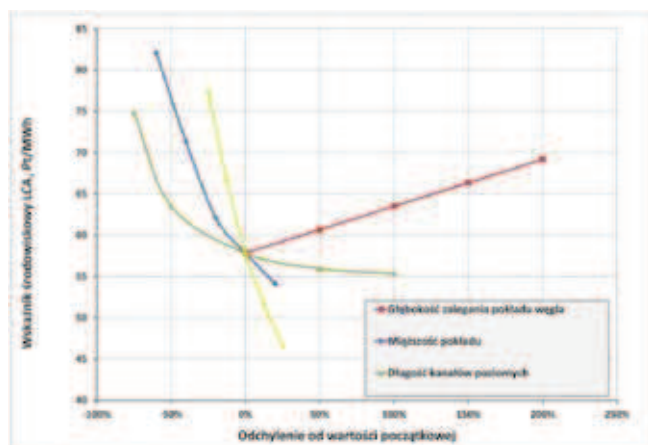
3.2. Rezultaty i dyskusja wyników

Na podstawie przeglądu literatury i założeń własnych wykonano analizę wrażliwości wskaźników oceny efektywności środowiskowej obliczonych techniką *LCA*, wskaźników kosztowych uzyskanych techniką *LCC* oraz wskaźników ekoefektywności podziemnego zgazowania węgla. W ramach analizy wrażliwości wyników oceny efektywności środowiskowej, kosztowej oraz ekoefektywności dla PZW metodą bezszybową zostały przeanalizowane zmienne krytyczne w następujących zakresach:

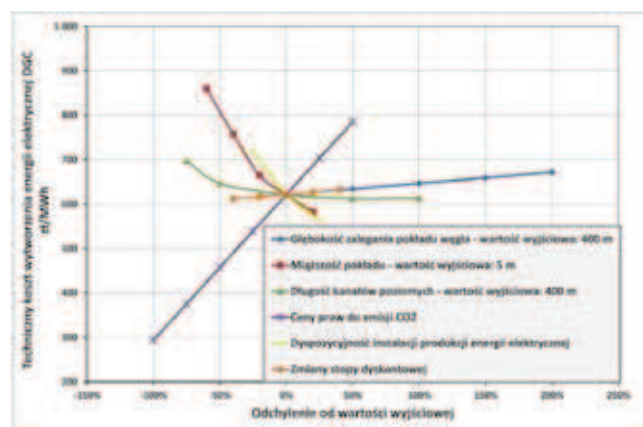
- Głębokość zalegania pokładu węgla – obliczenia wykonano dla głębokości zalegania: 400 m (wartość bazowa), 600 m, 800 m, 1000 m i 1200 m.
- Miąższość pokładu węgla – obliczenia wykonano dla

- miąższości: 6 m, 5 m (wartość bazowa), 4 m, 3 m i 2 m.
- Długość kanałów poziomych – obliczenia wykonano dla długości: 100 m, 200 m, 400 m (wartość bazowa), 600 m i 800 m.
- Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej – obliczenia wykonano dla dyspozycyjności: 60%, 70%, 80 % (wartość bazowa), 90 % i 100 %.
- Ceny praw do emisji CO₂ – obliczenia wykonano dla odchylenia cen od wartości bazowej: -100% (brak opłat za prawa do emisji CO₂), -75 %, -50 %, -25 %, +25 % i +50 %.
- Zmiany stopy dyskontowej – obliczenia wykonano dla odchylenia w punktach procentowych od wartości bazowej równej 5 %: -2 %, -1 %, +1 % i +2 %.

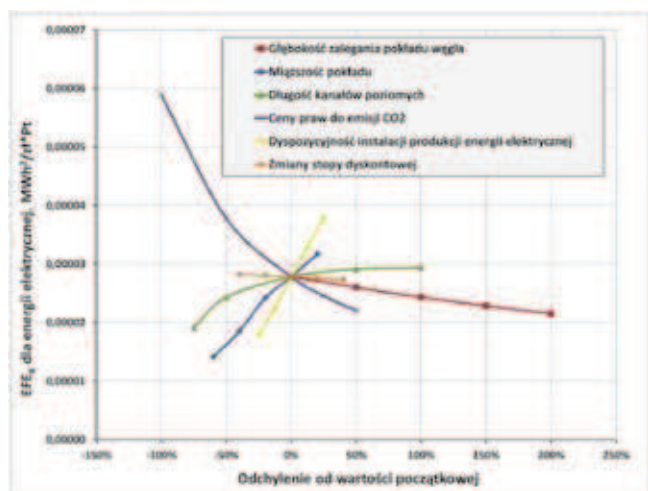
Na rysunkach 3 ÷ 5 przedstawiono interpretację graficzną wyników analizy wrażliwości wskaźników środowiskowych, kosztowych oraz ekoefektywności dla podziemnego zgazowania węgla bez CCS, natomiast na rysunkach 6÷8 przedstawiono interpretację graficzną wyników analizy wrażliwości wskaźników środowiskowych, kosztowych oraz ekoefektywności dla podziemnego zgazowania węgla z CCS.



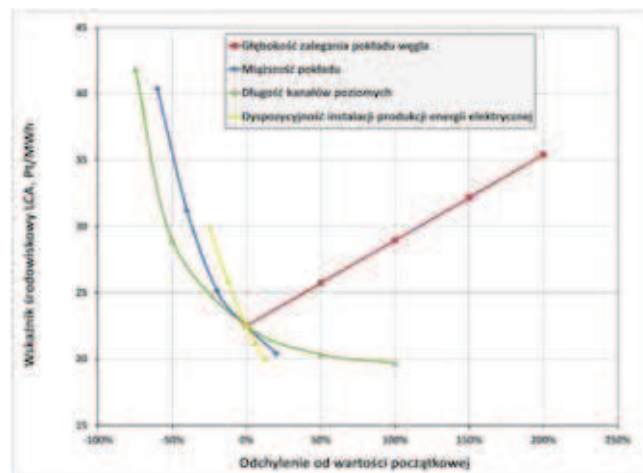
Rys. 3. Analiza wrażliwości wskaźników środowiskowych dla podziemnego zgazowania węgla bez CCS
Fig. 3. Sensitivity analysis of environmental indicators for the underground coal gasification process without CCS



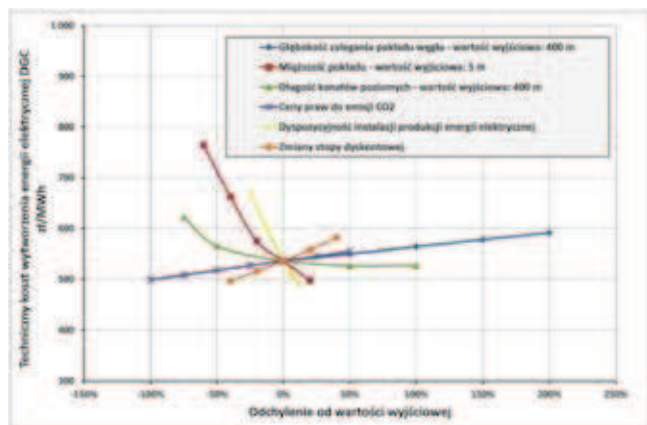
Rys. 4. Analiza wrażliwości wskaźników kosztowych dla podziemnego zgazowania węgla bez CCS
Fig. 4. Sensitivity analysis of cost indicators for the underground coal gasification process without CCS



Rys. 5. Analiza wrażliwości ekoefektywności dla podziemnego zgazowania węgla bez CCS
Fig. 5. Sensitivity analysis of eco-efficiency for the underground coal gasification process without CCS



Rys. 6. Analiza wrażliwości wskaźników środowiskowych dla podziemnego zgazowania węgla z CCS
Fig. 6. Sensitivity analysis of environmental indicators for the underground coal gasification process with CCS



Rys. 7. Analiza wrażliwości wskaźników kosztowych dla podziemnego zgazowania węgla z CCS

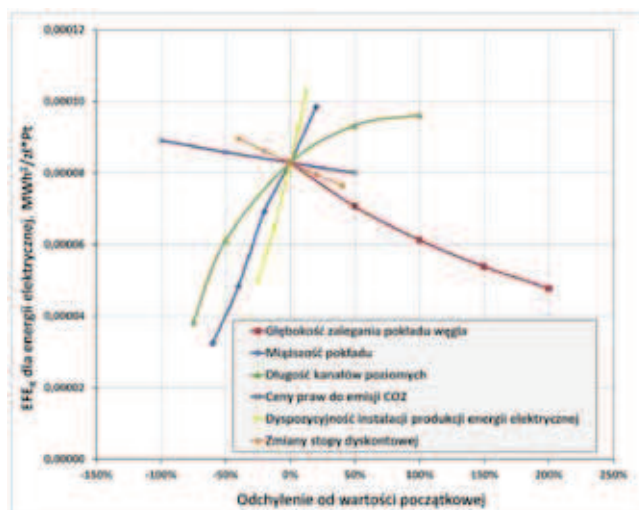
Fig. 7. Sensitivity analysis of cost indicators for the underground coal gasification process with CCS

Wyniki analizy wrażliwości pozwalają określić następującą hierarchię wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika środowiskowego, wskaźnika kosztowego oraz efektywności technologii bezszybowej PZW produkcji energii elektrycznej i ciepła bez CCS (od największego do najmniejszego wpływu):

- A. Hierarchia wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika środowiskowego:
1. Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej.
 2. Miąższość pokładu węgla.
 3. Długość kanałów poziomych.
 4. Głębokość zalegania pokładu węgla.
- B. Hierarchia wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika kosztowego:
1. Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej.
 2. Miąższość pokładu węgla.
 3. Ceny praw do emisji CO₂.
 4. Zmiany stopy dyskontowej.
 5. Głębokość zalegania pokładu węgla.
 6. Długość kanałów poziomych.
- C. Hierarchia wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika efektywności:
1. Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej.
 2. Miąższość pokładu węgla.
 3. Ceny praw do emisji CO₂.
 4. Głębokość zalegania pokładu węgla.
 5. Długość kanałów poziomych.
 6. Zmiany stopy dyskontowej.

Wyniki analizy wrażliwości pozwalają określić następującą hierarchię wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika środowiskowego, wskaźnika kosztowego oraz efektywności technologii bezszybowej PZW produkcji energii elektrycznej i ciepła z CCS (od największego do najmniejszego wpływu):

- A. Hierarchia wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika środowiskowego:
1. Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej.
 2. Miąższość pokładu węgla.



Rys. 8. Analiza wrażliwości efektywności dla podziemnego zgazowania węgla z CCS

Fig. 8. Sensitivity analysis of eco-efficiency for the underground coal gasification process with CCS

3. Długość kanałów poziomych.
 4. Głębokość zalegania pokładu węgla.
- B. Hierarchia wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika kosztowego:
1. Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej.
 2. Miąższość pokładu węgla.
 3. Zmiany stopy dyskontowej.
 4. Ceny praw do emisji CO₂.
 5. Głębokość zalegania pokładu węgla.
 6. Długość kanałów poziomych.
- C. Hierarchia wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na wartość wskaźnika efektywności:
1. Dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej.
 2. Miąższość pokładu węgla.
 3. Długość kanałów poziomych.
 4. Głębokość zalegania pokładu węgla.
 5. Zmiany stopy dyskontowej.
 6. Ceny praw do emisji CO₂.

Podsumowanie i wnioski

1. Przeprowadzona analiza wrażliwości efektywności technologii podziemnego zgazowania węgla pozwala na ocenę poszczególnych zmiennych na wynik oceny efektywności środowiskowej i kosztowej, dzięki czemu istnieje możliwość wskazania kryteriów decyzyjnych dla opłacalności projektów rozwojowych – technologii czystego węgla. Zastosowanie analizy wrażliwości efektywności technologii pozwoli na określenie obszarów największego ryzyka przy podejmowaniu decyzji odnośnie do nowych projektów związanych z rozwojem technologii czystego węgla.
2. Wykonanie oceny cyklu życia LCA, jak również kosztów cyklu życia LCC wymagało zebrania szczegółowych danych eksploatacyjnych, jak również kosztowych analizowanych technologii podziemnego zgazowania węgla.

W tym celu opracowano szczegółowe karty technologii podziemnego zgazowania węgla, w których zebrano wszystkie niezbędne dane bilansowe oraz kosztowe.

3. Na podstawie opracowanej autorskiej metody oceny efektywności, integrującej wskaźnik środowiskowy *LCA* oraz wskaźnik kosztowy *DGC* dla dwóch analizowanych technologii wykonano obliczenia efektywności dla wszystkich przyjętych zmiennych krytycznych.
4. Wyniki analizy wrażliwości pozwoliły określić hierarchię wpływu analizowanych zmiennych krytycznych na efektywność środowiskową, kosztową oraz efektywność technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową.
5. Przeprowadzona analiza wrażliwości obliczonych wskaźników efektywności środowiskowej, kosztowej i efektywności wykazała, że największy wpływ na efektywność technologii podziemnego zgazowania węgla metodą bezszybową, zarówno z, jak i bez CCS, ma dyspozycyjność instalacji produkcji energii elektrycznej, a w następnej kolejności miąższość pokładu węgla. Kolejne istotne czynniki wpływające na wynik to: długość kanałów poziomych (dla technologii podziemnego zgazowania z CCS) i ceny praw do emisji CO₂ (dla technologii podziemnego zgazowania bez CCS).
6. Przeprowadzone do tej pory analizy efektywności podziemnego zgazowania węgla wymagają dalszych badań wpływu poszczególnych parametrów procesu zgazowania na wynik efektywności. W kolejnych analizach zostaną uwzględnione wyniki eksperymentów prowadzonych w warunkach krajowych.

Praca została wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 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. Brigham E.F.: Podstawy zarządzania finansami, PWE, Warszawa 2006.
2. Czaplicka-Kolarz K. i in.: Raport merytoryczny Cz.T.B. nr 8.1.1: „Określenie miar, standardów oraz procedur oceny efektywności technicznej, ekologicznej i kosztowej podziemnego i naziemnego zgazowania węgla”. Zał. 1. Przegląd metod oceny cyklu życia. GIG, grudzień 2011. Materiał niepublikowany
3. Czaplicka-Kolarz K. i in.: Raport merytoryczny Cz.T.B. nr 8.2.1: „Ocena efektywności technicznej i ekologicznej oraz kosztów technologii podziemnego zgazowania węgla, identyfikacja nakładów inwestycyjnych dla pilotowych i referencyjnych technologii”. Zał. 1. Analiza wrażliwości i ryzyka wskaźników środowiskowych, kosztowych oraz wskaźnika efektywności dla technologii PZW. GIG, czerwiec 2014. Materiał niepublikowany.
4. Czaplicka-Kolarz K., Burchart-Korol D., Krawczyk P.: Wybrane determinanty efektywności podziemnego i naziemnego zgazowania węgla, Przegląd Górniczy, nr 2, 2013
5. Czaplicka-Kolarz K., Burchart-Korol D., Śliwińska A., Krawczyk P., Ludwik-Pardala M.: Efektywność technologii podziemnego zgazowania węgla – metodyka i dotychczasowe doświadczenia, Przegląd Górniczy, nr 10, 2011, s.33÷40
6. Czaplicka-Kolarz K., Korol J., Niemołko K., Ludwik-Pardala M.: Material Flow Analysis (MFA) of unconventional way of electricity production based on underground coal gasification, Journal of Sustainable Mining (w druku)
7. Kapusta K., Stańczyk K., Wiatowski M., Chečko J.: Environmental Aspects of Field Scale UCG Trial in Shallow Coal Seam in Experimental Mine „Barbara”, Fuel, 113, 2013
8. Kapusta K., Stańczyk K.: Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite, Fuel, 2011, 90, 1927÷1934. Fuel, 90, 2011
9. Ludwik-Pardala M., Niemołko K.: Przegląd metod podziemnego zgazowania węgla na podstawie wybranych przeprowadzonych prób na świecie, Przegląd Górniczy 2013,
10. Mielcarek J.: Analiza wrażliwości w rachunkowości zarządczej, Wydawnictwo Target, Poznań 2006
11. Niżanowski R.: Analiza opłacalności, Uniwersyteckie Wydawnictwo Medyczne Versalium, Kraków 2002
12. Nowakowski T.: Problems with analyzing operational data uncertainty, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 10, nr 3, 2010
13. Ranoz R., Kopacz M.: Analiza wrażliwości wynikowej NPV z uwzględnieniem odchylenia standardowego w procesie wyceny górniczych projektów inwestycyjnych. Przegląd Górniczy nr 3-4, 2013
14. Rogowski W., Kasiewicz S.: Analiza wrażliwości jako metoda analizy ryzyka przedsięwzięć inwestycyjnych [w:] Efektywność źródłem bogactwa narodów pod. Red. T. Dudycza, S. Wrzoska AE, Wrocław 2006.
15. Smoliński A., Stańczyk K., Kapusta K., Howaniec N.: Analysis of the organic contaminants in the condensate produced in the in-situ underground coal gasification process, Water Science and Technology, 76(3), 2013
16. Smoliński A., Stańczyk K., Kapusta K., Howaniec N.: Chemometric study of the ex-situ underground coal gasification wastewater experimental data. Water, Air and Soil Pollution, 223, 2012

