



Paweł GRZESIAK\*, Radosław KAPŁAN\*

## **DEA jako metoda oceny technologii energetycznych – porównanie wybranych technologii**

Streszczenie: Niniejsza publikacja przedstawia metodykę DEA jako narzędzie do oceny efektywności technologii energetycznych. W pierwszej części pracy ukazano podstawowe narzędzia wykorzystywane do oceny portfela projektów inwestycyjnych w przemyśle energetycznym. W dalszej części scharakteryzowano metody *Data Envelopment Analysis* (DEA), czyli nieparametryczne procedury ustalania efektywności technologicznej badanych obiektów pod względem analizowanych czynników. W części praktycznej – wykorzystując analizę DEA – dokonano przykładowej oceny efektywności trzynastu technologii energetycznych, w tym technologii nadkrytycznego spalania węgla, zgazowania węgla połączonego z turbiną gazową oraz samodzielnego układu turbiny gazowej. Do analizy wykorzystano model nadefektywności nieradialnej z uwzględnieniem podziału na nakłady decyzyjne, niedecyzyjne oraz produkty pożądane i niepożądane. Dodatkowo przeprowadzona została analiza wyników dla przykładowej technologii. Zostały wytłumaczone możliwe sposoby interpretacji wyników końcowych z punktu widzenia obiektów efektywnych, jak i nieefektywnych. W tym drugim przypadku przedstawiono także kalkulację rozwiązania wzorcowego dla danej instalacji wraz z wnioskami co do skali działalności.

Słowa kluczowe: efektywność, DEA, technologie energetyczne, metoda obwiedni danych

## **DEA as a method of energy technologies assessment – a comparison of selected technologies**

Abstract: This publication presents the DEA methodology as a tool for assessing the efficiency of energy technologies. The first part of the work presents the basic tools used to assess the portfolio of projects in the energy industry. In the next part, the methods of Data Envelopment Analysis (DEA), non-parametric procedures for determining the technological efficiency, were characterized. In the practical part – using the DEA analysis – an exemplary effectiveness assessment of the of thirteen energy technologies (including the supercritical combustion of coal, gasification of coal combined with a gas turbine and an independent gas turbine system) was made. The analysis was based on the non-radial super-efficiency model, including the division into dependent and non-depen-

\* Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania w Energetyce, Kraków;  
e-mail: pgrzesia@zarz.agh.edu.pl; rkaplan@zarz.agh.edu.pl

dent inputs as well as desirable and undesirable products. In addition, an analysis of the results for the sample technology was carried out. The possible ways of interpreting the final results from the point of view of effective and ineffective objects have been explained. The second one also presents the calculation of the model solution for a given installation together with the applications for the scale of production activity.

Keywords: efficiency, DEA, energy technologies, data envelopment analysis

## Wprowadzenie

Tradycyjne technologie wytwarzania energii elektrycznej w dużym stopniu przyczyniają się do wzrostu gazów cieplarnianych, co niesie za sobą ryzyko wystąpienia znacznych zmian klimatycznych. W celu zmniejszenia negatywnych oddziaływań sektora energetycznego na środowisko europejskie instytucje podjęły w tym kierunku szereg inicjatyw. Przykładami takich działań dla Europy są kolejno: Europejska strategia na rzecz zrównoważonej, konkurencyjnej i bezpiecznej energii (2006), Pakiet energetyczny (2007), Europejska polityka energetyczna, Pakiet liberalizacyjny (2007) oraz Pakiet klimatyczny (2008). Rozpatrywane dokumenty zakładają cele związane z dekarbonizacją nie tylko sektora energetycznego, ale także budownictwa i transportu. Osiągnięcie tak postawionych celów może być utrudnione biorąc pod uwagę fakt, że polityka ekonomiczna większości państw nakierowana jest na utrzymanie ciągłego wzrostu gospodarczego, co prowadzi do zwiększającego się zapotrzebowania na energię.

Pod wpływem tak różnorodnych czynników oczywista staje się potrzeba poszukiwania innych, bardziej akceptowalnych technologii wytwarzania energii. Należy pamiętać, że wytwarzanie energii zarówno z paliw kopalnych, jak i ze źródeł odnawialnych może być przeprowadzone z wykorzystaniem wielu wariantów technologicznych. W zależności od oczekiwanego efektu końcowego wybierane są odpowiednie procesy technologiczne (przygotowanie surowca, sekwestracja CO<sub>2</sub>, blok gazowo-parowy itp.). W ten sposób możemy uzyskać wiele alternatywnych ciągów technologicznych o różnych stopniach wydajności oraz ukierunkowanych na różne źródła energii.

Każdy dostępny w ten sposób wariant technologiczny opisany jest przez szereg czynników wpływających na jego efektywność. Mogą to być między innymi: zużycie paliwa, ilość energii niezbędna do przygotowania surowca, wydajność, zużycie wody i poszczególnych chemikaliów itp. Ponadto każda technologia działa w określonych warunkach i wpływają na nią różnego rodzaju czynniki zewnętrzne, związane z kwestiami ekonomicznymi, społecznymi i politycznymi.

Konieczne zatem wydaje się stosowanie takiej oceny efektywności projektów energetycznych, która uwzględniać będzie nie tylko czynniki technologiczne i ekonomiczne, ale również inne kryteria, takie jak: wpływ na środowisko, bezpieczeństwo energetyczne, czy też potrzeby polskiej energetyki. Podejście tego rodzaju pozwoliłoby ułatwić zarządzanie portfelem projektów inwestycyjnych związanych z sektorem energetycznym.

Metodami, które w procesie oceny efektywności pozwalają uwzględnić różnego rodzaju czynniki, są modele z grupy DEA (ang. *Data Envelopment Analysis*). Pozwalają one nie tylko ocenić efektywność grupy badanych obiektów pod względem wielu czynników,

ale także wskazać wzorce (obiekty/technologie efektywne) dla nieefektywnych rozwiązań, oszacować wpływ efektów skali na działalność danego obiektu czy też wyznaczyć ranking obiektów efektywnych.

## 1. Metody oceny

Dostępnych jest wiele narzędzi służących ocenie portfela projektów pod względem ekonomicznym. Do grupy najczęściej stosowanych metod, które znajdują zastosowanie w wielu różnych sektorach gospodarki – w tym również w obszarze technologii energetycznych – zaliczyć można:

- proste metody statyczne – nie uwzględniają one wpływu czynnika czasu na wartości pieniężne w rachunku. Ze względu na stosunkowo niewielki poziom złożoności mają często charakter prostych metod oceny ekonomicznej i wykorzystywane są głównie na początkowych etapach analizy projektu (Kwaśniewski i Kopacz, red. 2015),
- metody dynamiczne bazujące na prognozie przyszłych przepływów pieniężnych – w procesie oceny opłacalności przedsięwzięć inwestycyjnych biorą pod uwagę kryteria związane ze zmiennością wartości pieniądza w czasie czy ryzykiem, są natomiast metody dynamiczne (Dziworska 2000) (NPV – ang. *Net Present Value*, IRR – ang. *Internal Rate of Return* itp.),
- metody uwzględniające aspekty prawdopodobieństwa – przykładowo metoda drzew decyzyjnych DTA (ang. *Decision Tree Analysis*). Istotą tej techniki jest sekwencyjne badanie procesów decyzyjnych, przy czym każda kolejna decyzja zależy od wyników decyzji poprzedniej (Szapiro 2000; Wanielista i in. 2002). Dodatkowo każdej gałęzi drzewa decyzyjnego przypisane są prawdopodobieństwa realizacji poszczególnych stanów,
- metody symulacyjne – symulacyjna Monte Carlo obejmuje procedury symulacyjne, które mają charakter losowy. Oznacza to próbkowanie rozkładów statystycznych, które zostały odpowiednio dobrane dla każdej zmiennej losowej (Glasserman 2004),
- metody bazujące na wycenie opcji rzeczowych – nazywane również analizą opcji rzeczowych ROA (ang. *Real Options Analysis*) – polegają najogólniej na przedstawieniu możliwości działania przedsiębiorcy (elastyczności decyzyjnej) w postaci dostępnych opcji, jakie może realizować, oraz ich wyceny (Trigeorgis 1996).

Inną kwestią jest efektywność techniczna, która jest pojęciem niejednoznacznym i może być różnie rozumiana. Ocena techniczna sprowadzana jest najczęściej do porównań między sobą technologii przy wzięciu pod uwagę różnie zdefiniowanej sprawności. Często również jest też utożsamiana z relacją produktywności danej jednostki do jednostki uznanej za efektywną. Wynika z tego, że parametrami opisującymi na ogólnym poziomie efektywność danej technologii może być sprawność przekształcania danego surowca, efektywny czas pracy czy też poziom zapotrzebowania na podstawowe media.

Analizując przedstawione metody i narzędzia oceny projektów, można zauważyć brak metod, które pozwoliłyby na zagregowany pomiar efektywności uwzględniający dowolną grupę kryteriów. Jednocześnie wydaje się oczywiste, że prawidłowa ocena dużych, stra-

tegicznych dla kraju technologii, silnie oddziaływujących na środowisko i wymagających zaangażowania dużego kapitału inwestycyjnego, winna obejmować nie tylko aspekty ekonomiczne, ale również aspekty technologiczne czy środowiskowe (Kaplan i in. 2014a, 2014b).

## 2. Metody wielokryterialne

Wybór najlepszej metody oceny efektywności, uwzględniającej wiele kryteriów, od dawna stanowi duży problem o charakterze naukowym. Literatura poświęcona badaniu efektywności wyodrębnia parametryczne (ekonometryczne) i nieparametryczne podejścia do analizy efektywności. Podejście parametryczne opiera się na znanej z teorii mikroekonomii funkcji produkcji, określającej zależności między nakładami a efektami. Parametry tej funkcji ustala się za pomocą klasycznych narzędzi estymacji ekonometrycznej. Nieparametryczne podejście do analizy efektywności polega na budowie modeli, w których nie wymaga się uporządkowanych parametrów w relacjach wiążących nakłady i rezultaty (Guzik 2009; Kaplan i in. 2015).

Metody *Data Envelopment Analysis* (DEA) są procedurami nieparametrycznymi ustalania efektywności technologicznej obiektów. Za ich pomocą badano np.: banki, instytucje ubezpieczeniowe, gospodarstwa rolne, instytucje edukacyjne, instytucje kulturalne, szpitale, firmy turystyczne, hotelarskie, rekreacyjne, spółki giełdowe itp.

Efektywność technologiczna, którą możemy uzyskać z analizy przy pomocy metody DEA to skuteczność (sprawność) przekształcenia nakładów w rezultaty. Z dwóch obiektów, różniących się przynajmniej pod względem wielkości jednego nakładu lub jednego rezultatu, efektywniejszy jest ten, który przy nie większych od drugiego nakładach, uzyskuje nie mniejsze rezultaty (przy czym jedna z tych nierówności jest ostra) (Guzik 2009).

Wskaźnik efektywności obiektu rozumiany jest zatem zazwyczaj jako iloraz przyrównujący rezultaty uzyskane przez obiekt do poniesionych przezeń nakładów.

Finalnie metoda DEA pozwala na ustalenie krzywej efektywności (nazywanej również graniczną krzywą produkcji – ang. *production frontier*) oraz podział obiektów na efektywne (te znajdujące się na wyznaczonej krzywej) oraz nieefektywne (te poza nią) (Cooper i in. 2007).

Dzięki takiemu podejściu DEA może dla obiektów nieefektywnych wskazać obiekty wzorcowe, czyli najbliższe obiekty znajdujące się na krzywej. Efektywność obiektu w metodzie DEA jest mierzona względem innych obiektów z badanej grupy.

Pomiar efektywności w modelach DEA może przybierać charakter: radialny (proporcjonalnie dostosowuje nakłady lub rezultaty – modele klasyczne), nieradialnym (nieproporcjonalne dostosowanie nakładów lub rezultatów – pomiar efektywności Russella

$$\min \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \theta_n : (\theta x_o, y_o) \in T \right\}$$
 a także oparty na luzach nakładów i rezultatów oraz pomiarach efektywności hiperbolicznej, polegających na jednoczesnym zmniejszaniu nakładów i zwiększaniu rezultatów itp. (Cooper i in. 2004, 2007; Färe i in. 1994; Guzik 2009).

### 3. Przykładowa ocena

DEA ocenia względną efektywność badanych technologii, z czego wynika, że grupa wybranych do analiz obiektów (technologii) powinna być jak największa i w miarę możliwości zróżnicowana.

Na potrzeby przykładu wybrano 13 technologii produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych, których szczegółowe analizy wykonał i udostępnił DOE/NETL (2010-11).

Zestawienie to obejmuje:

- 7 technologii zgazowania węgla opartych na takich rozwiązaniach jak:
  - *Shell Global Solutions* (Shell) (w wariancie z oraz bez wychwytu CO<sub>2</sub>),
  - *Chicago Bridge and Iron (CB&I) E-Gas* (w wariancie z oraz bez wychwytu CO<sub>2</sub>),
  - *General Electric Energy (GEE) Radiant* (w wariancie z oraz bez wychwytu CO<sub>2</sub>),
  - *General Electric Energy (GEE) Quench* (w wariancie z wychwytem CO<sub>2</sub>),
- 4 technologie spalania węgla:
  - podkrytyczna (w wariancie z oraz bez wychwytu CO<sub>2</sub>) – Subcritical PC (ang. *Subcritical Pulverized Coal*),
  - nadkrytyczna (w wariancie z oraz bez wychwytu CO<sub>2</sub>) – SC PC (ang. *Supercritical Pulverized Coal*),
- 2 technologie produkcji energii elektrycznej wykorzystujące turbinę gazową NGCC (ang. *Natural Gas Combined-Cycle*) w wariancie z oraz bez wychwytu CO<sub>2</sub>.

Zestawienie wszystkich wariantów technologicznych zawiera tabela 1.

TABELA 1. Zestawienie kombinacji wariantów technologii

TABLE 1. Set of technology variants

Lp.	Technologia	Paliwo	CCS*	Oznaczenie NETL
1.	Shell	węgiel kamienny	Nie	B1A
2.	Shell	węgiel kamienny	Tak	B1B
3.	CB&I E-Gas	węgiel kamienny	Nie	B4A
4.	CB&I E-Gas	węgiel kamienny	Tak	B4B
5.	GEE Radiant	węgiel kamienny	Nie	B5A
6.	GEE Radiant	węgiel kamienny	Tak	B5B
7.	GEE Quench	węgiel kamienny	Tak	B5B-Q
8.	Subcritical PC	węgiel kamienny	Nie	B11A
9.	Subcritical PC	węgiel kamienny	Tak	B11B
10.	SC PC	węgiel kamienny	Nie	B12A
11.	SC PC	węgiel kamienny	Tak	B12B
12.	NGCC	gaz ziemny	Nie	B31A
13.	NGCC	gaz ziemny	Tak	B31B

\*CCS – ang. *Carbon Capture And Storage*.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (DOE/NETL, 2010-11).

Następnym krokiem oceny jest wstępna identyfikacja parametrów opisujących obiekty poddane analizie, która powinna obejmować jak największą liczbę czynników tak, aby przestrzeń przez nie stworzona była odzwierciedleniem rzeczywistości. Każdą z technologii należy przanalizować pod kątem efektywności technicznej, kosztowej oraz ekologicznej.

Spośród zidentyfikowanych parametrów zostaje wybrana grupa dostępnych czynników o istotnym wpływie na efektywność technologii. Jednocześnie czynniki te są wspólne dla wszystkich analizowanych wariantów.

Zestawienie wybranych do dalszych analiz parametrów prezentuje tabela 2. Wnioski, jakie można na ich podstawie wyciągnąć, są następujące:

- najwyższą sprawnością charakteryzują się technologie NGCC (51,5% bez CCS oraz 45,7% z CCS), następne w kolejność są technologie zgazowania węgla w reaktorze Shell bez układu wychwytu CO<sub>2</sub> (42,1%) oraz SC PC również bez CCS (40,7%),
- wychwytywanie oraz magazynowanie CO<sub>2</sub> powoduje spadek sprawności technologii na poziomie 6,0–11,0%,
- emisja CO<sub>2</sub> dla technologii NGCC bez układu CCS jest o prawie 50,0% mniejsza niż dla wszystkich technologii opartych na węglu,
- instalacja układu CCS zwiększa nakłady inwestycyjne o około 40,0% dla technologii zgazowania węgla, o około 70,0% dla instalacji spalania węgla i o około 116,0% dla NGCC,
- najniższe całkowite nakłady inwestycyjne posiada technologia NGCC bez układu CCS oraz z układem CCS,
- najniższe nakłady z spośród technologii opartych na zgazowaniu węgla prezentuje wariant firmy E-Gas.

Należy tutaj zauważyć, że wszystkie powyższe wnioski – choć pomocne – nadal nie są rozstrzygające. Dlatego też w kolejnym etapie wybrana grupa parametrów została podzielona na: nakłady dyspozycyjne, nakłady niedyspozycyjne, rezultaty niepożądane, rezultaty pożądane.

Przez nakłady rozumiemy wielkości (czynniki, parametry wejścia), umożliwiające uzyskiwanie określonych rezultatów działalności. Uogólniając powyższy opis, nakład to taki parametr lub czynnik związany z pozyskaniem rezultatów, który chcemy zminimalizować. Z kolei rezultat pożądany to taki parametr lub czynnik, który chcemy zmaksymalizować. Natomiast rezultaty niepożądane to takie parametry lub czynniki, które są związane z wykorzystaniem danych nakładów, ale nie są przez nas pożądane, np. nakład – węgiel, niepożądany rezultat – emisja CO<sub>2</sub>.

Ponadto użyto w tym przykładzie podejścia rozgraniczającego nakłady decyzyjne od niedecyzyjnych. Podejście przyjmujące całkowitą decyzyjność wszystkich parametrów (tradycyjne modele DEA) zakłada, że mogą one ulec zmianie poprzez proste decyzje zarządcze, co nie zawsze jest prawdą. Przykładem parametrów niebędących w dyspozycji jednostek decyzyjnych, a mających wpływ na ich efektywność, mogą być czynniki makroekonomiczne takie jak np. dynamika cen paliwa itp. Przykładowy podział parametrów wybranych po analizie prezentuje tabela 3.

Do analizy wybrano model opierający się na nieradialnej ocenie niedefektywności z założeniem stałych efektów skali. Większość podstawowych modeli ma jedną wspólną wadę

TABELA 2. Zestawienie parametrów technologii

TABLE 2. List of technology parameters

	B1A	B1B	B4A	B4B	B5A	B5B	B5B-Q	B11A	B11B	B12A	B12B	B31A	B31B
Moc brutto (MWe)	737,0	673,0	738,0	704,0	748,0	734,0	684,0	581,0	644,0	580,0	642,0	641,0	601,0
Zużycie własne (MWe)	108	177	113	190	126	191	190	31	94	30	91	11	42
Moc netto (MWe)	629	497	625	513	622	543	494	550	550	550	550	630	559
Sprawność netto (%)	42,1	31,2	39,7	31,0	39,0	32,6	29,7	39,0	31,2	40,7	32,5	51,5	45,7
Zużycie wody (gpm)	3 362	4 631	3 477	4 662	3 771	4 754	5 008	4 401	6 521	4 045	6 069	2 051	3 024
Emisja CO <sub>2</sub> (lb/MWh-net)	1 595	218	1 711	217	1 724	206	228	1 779	223	1 705	214	786	89
Nakłady inwestycyjne (2011\$/kW)	2 725	3 981	2 372	3 540	2 449	3 387	3 405	1 960	3 467	2 026	3 524	685	1 481
Koszt paliwa (2011\$/MWh-net)	23,8	32,1	25,2	32,3	25,7	30,7	33,8	25,7	32,2	24,6	30,9	40,7	45,9
Koszt zmienne (2011\$/MWh-net)	9,3	13,0	9,2	12,8	9,4	12,2	12,2	9,2	15,1	9,1	14,7	1,7	4,0
Koszty stałe (2011\$/MWh-net)	14,7	20,5	13,5	19,1	13,70	18,2	18,0	9,3	15,1	9,6	15,4	3,4	6,6

Źródło: opracowanie własne.

TABELA 3. Wybrane parametry analizy

TABLE 3. Selected parameters of analysis

Nakłady dyspozycyjne	Nakłady niedyspozycyjne	Rezultaty pożądane	Rezultaty niepożądane
Nakłady inwestycyjne	zużycie własne	moc brutto	emisja CO <sub>2</sub>
Koszt paliwa		sprawność netto	zużycie wody
Koszty zmienne			
Koszty stałe			

Źródło: opracowanie własne.

związaną z peletonowym charakterem otrzymanej efektywności. Mianowicie często prawie połowa badanych obiektów jest w pełni efektywna, co zazwyczaj znacznie przekracza potrzeby prowadzonej analizy. Jednym z rozwiązań tego problemu są właśnie modele oparte na pomiarze nadefektywności (ang. *super-efficiency*).

$$E_j = \min_{\theta} \frac{\sum_{q=1}^Q \theta_{jq}}{Q} \quad (1)$$

p.o.

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K x_{nk} \lambda_{kj} \leq x_{nj}, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K e_{qk} \lambda_{kj} \leq \theta_{jq} e_{qj}, \quad q=1, 2, \dots, Q \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K g_{rk} \lambda_{kj} \geq g_{rj}, \quad r=1, 2, \dots, R \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K b_{fk} \lambda_{kj} = b_{fj}, \quad f=1, 2, \dots, F \quad (5)$$

$$\lambda_{kj} \geq 0, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (6)$$



gdzie:

- $x_j = [x_{nj}]_{n=1, \dots, N}$  – wektor nakładów niedyspozycyjnych obiektu  $j$ -tego;
- $e_j = [e_{qj}]_{q=1, \dots, Q}$  – wektor nakładów dyspozycyjnych obiektu  $j$ -tego;
- $g_j = [g_{rj}]_{r=1, \dots, R}$  – wektor pożądanych rezultatów uzyskanych w obiekcie  $j$ -tym;
- $b_j = [b_{fj}]_{f=1, \dots, F}$  – wektor niepożądanych rezultatów uzyskanych w obiekcie  $j$ -tym;
- $\lambda_{kj}$  – zmienna decyzyjna; waga  $k$ -tego obiektu z punktu widzenia badanego obiektu  $j$ -tego;
- $\theta_{jq}$  – mnożnik poziomu nakładów w obiekcie  $j$ -tym;
- $E_j$  – efektywność obiektu  $j$ -tego.

W modelach nadefektywności nieradialnej współczynnik  $E$  (1) nazywany jest ogólnym współczynnikiem rankingowym. Natomiast efektywność obiektu jest wyliczana według dwóch następujących zależności:

→ Wskaźnik mocnej efektywności Russella:

$$\hat{\eta}_n = \begin{cases} \hat{\theta}_n & \text{gdy } \hat{\theta}_n < 1 \\ 1 & \text{gdy } \hat{\theta}_n \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\eta}_n \quad (8)$$

→ Wskaźnik słabej efektywności Russella:

$$\eta = \begin{cases} E & \text{gdy } \bar{E} < 1 \\ 1 & \text{gdy } \bar{E} \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

Podstawowa różnica pomiędzy słabą i silną efektywnością Russella w modelach nadefektywności nieradialnej sprowadza się do tego, że wskaźnik mocny wynosi 1 wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie wskaźniki rankingowe  $\theta \geq 1$ . Natomiast wskaźnik słaby jest równy 1, gdy średnia wskaźników rankingowych  $E \geq 1$ , a to może być osiągnięte zarówno wtedy, gdy wszystkie wskaźniki rankingowe są nie mniejsze od 1, jak i wtedy, gdy niektóre z nich są większe od 1, a niektóre mniejsze od 1.

Wyniki analizy prezentuje tabela 4. Pierwszy wiersz tabeli zawiera średnią z czterech kolejnych wierszy stanowiących mnożniki poziomu nakładów w danej technologii. Kolejne wiersze to zmienne decyzyjne dla każdej technologii.

Analizowane modele bazują na tych samych założeniach co modele klasyczne, jedyną różnicą jest wykluczenie ze zbioru technologii obiektu analizowanego. Czyli obiekt jest tym bardziej efektywny, im gorzej z jego zadaniami radzą sobie pozostałe obiekty. Dodatkowo współczynnik  $E_j$  dla modeli nadefektywności nieradialnej nazywany jest ogólnym współczynnikiem rankingowym, na podstawie którego można obliczyć wskaźniki mocnej lub słabej efektywności Russella. Obliczone wskaźniki mocnej i słabej efektywności Russella

TABELA 4. Wyniki analizy  
TABLE 4. Analysis results

$E_j$	B1A	B1B	B4A	B4B	B5A	B5B	B5B-Q	B11A	B11B	B12A	B12B	B31A	B31B
	0,92	0,78	1,08	0,83	0,97	0,90	0,86	1,15	1,22	0,93	0,96	0,88	0,70
$0_{jt}$ – Nakłady inwestycyjne	0,78	0,59	1,19	0,67	0,90	0,71	0,75	1,03	1,01	0,87	0,91	1,13	0,68
$0_{jt}$ – Koszty paliwa	1,22	1,36	0,96	1,44	1,17	1,61	1,27	1,63	1,03	1,07	1,11	0,68	0,60
$0_{jt}$ – Koszty zmienne	0,87	0,67	1,04	0,66	0,93	0,70	0,81	0,91	0,81	0,89	0,93	0,59	0,81
$0_{jt}$ – Koszty stałe	0,81	0,51	1,13	0,54	0,87	0,58	0,63	1,04	1,02	0,89	0,91	1,13	0,72
$\lambda_{kj}$ – B1A	–	–0,00	1,09	–0,00	–	0,00	–0,00	0,00	–0,00	–0,00	–0,00	0,67	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B1B	–0,00	–	–0,00	–0,00	–0,00	0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B4A	0,80	–0,00	–	–0,00	0,68	–0,00	–0,00	–0,00	0,00	0,08	–0,00	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B4B	0,00	0,00	–0,00	–	0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B5A	–	–0,00	–0,00	0,00	–	–0,00	–0,00	0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B5B	–0,00	–	–0,00	–	–0,00	–	–	–0,00	–0,00	–0,00	–	–0,06	0,52
$\lambda_{kj}$ – B5B-Q	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	0,00	–	–0,00	–0,00	–0,00	–0,00	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B11A	0,04	–0,00	–0,00	0,00	0,24	–0,00	–	–	–	0,84	–0,00	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B11B	–0,00	0,41	–0,00	0,37	–0,00	0,35	0,51	0,01	–	–0,00	0,87	–0,06	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B12A	–	–0,00	–0,00	–0,00	–	–0,00	–0,00	0,79	0,00	–	–0,00	0,01	–0,06
$\lambda_{kj}$ – B12B	0,00	0,00	–0,00	0,00	0,00	–0,00	–	–	0,55	–0,00	–	–0,06	0,27
$\lambda_{kj}$ – B31A	0,19	0,09	–0,00	0,09	0,17	0,08	0,09	0,54	0,02	0,10	0,01	–	0,61
$\lambda_{kj}$ – B31B	–0,00	0,58	–0,00	0,67	–0,00	0,76	0,50	–0,00	1,04	–0,00	0,12	0,72	–
<b>Mocna efektywność Russela</b>	<b>0,86</b>	<b>0,69</b>	<b>0,99</b>	<b>0,72</b>	<b>0,93</b>	<b>0,75</b>	<b>0,80</b>	<b>0,98</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,94</b>	<b>0,82</b>	<b>0,70</b>
<b>Słaba efektywność Russela</b>	<b>0,92</b>	<b>0,78</b>	<b>1,00</b>	<b>0,83</b>	<b>0,97</b>	<b>0,90</b>	<b>0,86</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>	<b>0,88</b>	<b>0,70</b>

Źródło: opracowanie własne.

znajdują się w ostatnich dwóch wierszach tabeli 4. Według tych wyników nie ma w tym zbiorze obiektów o mocnej efektywności Russella, a tylko 3 obiekty są słabo efektywne w sensie Russella. Przy czym w tak zwanej słabej efektywności Russella mamy do czynienia z kompensacją wskaźników cząstkowych, co oznacza, że obiekt może być uznany za efektywny w przypadku, gdy tylko jeden nakład ma stosunkowo duży wskaźnik efektywności. Jako że model nie wyznacza obiektów mocno efektywnych, wszystkie obiekty biorą udział w rankingu obiektów nieefektywnych.

Najlepszym spośród obiektów nieefektywnych jest obiekt B4A (CB&I E-Gas bez układu CCS), natomiast najgorszym obiektem jest B31B (NGCC z układem CCS). Brak pełnej efektywności dla B4A, jak pokazuje tabela 4, wynika tylko z lepszego o 4% wyniku, jaki uzyskalaby technologia wspólna zbioru obiektów, jeżeli chodzi o koszty paliwa.

Aby wyjaśnić poszczególne elementy zawarte w tabeli 4, przeanalizowano przykładową technologię B1A – technologię zgazowania węgla Shell bez układu CCS.

Wyniki dla B1A są następujące:  $E_1 = 0,92$ ;  $\theta_{1,1} = 0,78$ ;  $\theta_{1,2} = 1,22$ ;  $\theta_{1,3} = 0,85$ ;  $\theta_{1,4} = 0,81$ ; a  $\lambda_{1,3} = 0,8$ ;  $\lambda_{1,7} = 0,04$ ;  $\lambda_{1,12} = 0,19$ .

Oznacza to że, współczynnik rankingowy tego obiektu jak również słaba efektywność Russella wynosi 0,92. Natomiast silna efektywność Russella wynosi 0,86. Na uzyskany wynik składają się efektywności poszczególnych nakładów:

- Nakłady inwestycyjne –  $\theta_{1,1} = 0,78$  efektywności tego nakładu wynosi około 78% tej, jaką mógłby uzyskać, gdyby swoją technologię wzorował na technologii wspólnej zbioru obiektów.
- Koszy paliwa –  $\theta_{1,2} = 1,22$  nakład w pełni efektywnie wykorzystywany. Gdyby technologia wspólna pozostałych obiektów miała uzyskać takie same rezultaty, zużyłaby o 22% więcej tego nakładu.
- Koszty zmienne –  $\theta_{1,3} = 0,85$  efektywności tego nakładu wynosi około 85% tej, jaką mógłby uzyskać, gdyby swoją technologię wzorował na technologii wspólnej zbioru obiektów.
- Koszty stałe –  $\theta_{1,4} = 0,81$  efektywności tego nakładu wynosi około 46% tej, jaką mógłby uzyskać, gdyby swoją technologię wzorował na technologii wspólnej zbioru obiektów.

Model również pozwala na wyznaczenie technologii wzorcowej dla obiektu, który jest nieefektywny z punktu widzenia chociażby jednego nakładu. Oczywiście przy tak szerokim portfelu różnych technologii rozwiązanie wzorcowe należy traktować bardziej jako sugestie najbliższych rozwiązań technologicznych/konkurencyjnych, a nie jako gotową technologię nowego obiektu.

Dla rozpatrywanego przypadku kalkulację technologii wzorcowej zawiera tabela 5. Analizowany obiekt może stać się w pełni efektywny, jeżeli będzie wzorował swój układ technologiczny na:

- 80% technologii obiektu B4A,
- 4% technologii obiektu B11A,
- 19% technologii obiektu B31A.

W przypadku rozpatrywanego modelu technologia wzorcowa może być rozpatrywana jako informacja o możliwej konkurencji technologicznej ze strony wyznaczonych do niej

TABELA 5. Kalkulacja technologii optymalnej dla technologii B1A

TABLE 5. Calculation of optimal technology for B1A technology

Parametry	J.m.	Wzorce			B1A		
Obiekty		B4A	B11A	B31A	Technologia optymalna	Technologia empiryczna	Wartość optymalna jako % wartości empirycznej
Udział w technologii wspólnej		80%	4%	19%			
Nakłady dyspozycyjne							
Nakłady inwestycyjne	[2011\$/kW]	2372	1960	685	2112	2725	78%
Koszty Paliwa	[2011\$/ MWh-net]	25,2	25,7	40,7	29	23,8	122%
Koszty zmienne	[2011\$/ MWh-net]	9,2	9,2	1,7	8,1	9,3	87%
Koszty stałe	[2011\$/ MWh-net]	13,5	9,3	3,4	11,8	14,7	81%
Nakłady niedyspozycyjne							
Zużycie własne	[MWe]	113	31	11	93,8	108	87%
Rezultaty pożądane							
Moc brutto	[MWe]	738	581	641	737	737	100%
Sprawność	[%]	39,70	39,00	51,50	43,2	42,1	103%
Rezultaty niepożądane							
Emisja CO <sub>2</sub>	[lb/MWh-net]	1711	1779	786	1595	1595	100%
Zużycie wody	[gpm]	3477	4401	2051	3362	3362	100%

Źródło: opracowanie własne.

obiektów. W efekcie technologia wzorcowa będzie generować te same przychody oraz uzyskać sprawność o 3% większą przy niezmiennym poziomie produkcji CO<sub>2</sub> i niezmiennym zużyciu wody procesowej, jednocześnie redukując: nakłady inwestycyjne o 22%, koszty zmienne o 13%, koszty stałe o 19%, oraz zwiększając koszty paliwa o 22%.

W modelach DEA możliwe jest też wyznaczenie typu niekorzyści skali dla nieefektywnych obiektów na podstawie współczynników  $\lambda$ , a dokładnie ich sumy dla badanej technologii według formuły (10) (Guzik 2009).

$$L_j = \sum_{k=1}^K \lambda_{kj} \quad (10)$$

Jeżeli:

- $L_j < 1$  – to w rozpatrywanym obiekcie mają miejsce niekorzyści wynikające z małej skali obiektu,
- $L_j > 1$  – to w rozpatrywanym obiekcie mają miejsce niekorzyści wynikające z dużej skali obiektu,
- $L_j = 1$  – to w rozpatrywanym obiekcie niekorzyści wynikają z innych przyczyn niż skala obiektu.

Kryterium to ma następujące uzasadnienie: jeżeli współczynnik  $L$  dla nieefektywnego obiektu jest większy od 1, to obiekty wzorcowe są mniejsze od rozpatrywanego. A skoro obiekt wzorcowy jest efektywny – sugeruje to zmniejszenie skali przez obiekt nieefektywny w celu poprawy efektywności. W rozpatrywanym przypadku  $L_j = 1,03$ , co sugeruje niekorzyści ze zbyt dużej skali działalności.

## Wnioski

W świetle przedstawionych we wstępie uwarunkowań istnieje pilna potrzeba oceny zarówno efektywności dostępnych, jak i perspektywicznych technologii energetycznych. Powinna ona uwzględniać nie tylko czynniki technologiczne, ale brać także pod uwagę inne kryteria, takie jak: czynniki ekonomiczne czy też wpływ na środowisko. Dodatkowym atutem takiej oceny byłaby możliwość szybkiej aktualizacji jej wyników w przypadku zmiany części lub też całości parametrów opisujących analizowane technologie. Tak opracowana procedura oceny efektywności technologii ma szansę stać się jednym z podstawowych narzędzi zarządzania portfelem projektów inwestycyjnych.

Takie możliwości dają nam modele z grupy DEA. Pozwalają one nie tylko na:

- uwzględnienie dużej liczby czynników wpływających na szeroko rozumianą efektywność technologii;
- szybkie aktualizowanie wyników w przypadku zmiany powyższych czynników;

ale także na:

- dostosowanie technologii obiektu – model oceny pozwala na taką konstrukcję przyjętej w nim technologii obiektu, aby jak najdokładniej opisywała rzeczywistą technologię wraz z jej otoczeniem;
- wybór sposobu ewaluacji efektywności – w modelach DEA ocena efektywności może być przeprowadzana na parę sposobów, co pozwala na dokładniejsze dostosowanie modelu do potrzeb danej analizy;
- wskazanie wzorców dla technologii nieefektywnych – co pozwala na lepszą adaptację technologii do zmian zachodzących w jej otoczeniu.

Ta ostatnia zaleta wynika z faktu, iż niektóre technologie energetyczne przedstawiają pewnego rodzaju elastyczność decyzyjną, np. istniejący ciąg technologiczny może zostać przekształcony na produkcję innego produktu końcowego, poprawiającego efektywność w danej sytuacji rynkowej.

Dodatkowymi zaletami modeli z grupy DEA są:

- brak potrzeby identyfikacji zależności pomiędzy analizowanymi parametrami;
- brak potrzeby udziału grupy ekspertów w celu wyznaczania np. wag poszczególnych parametrów;
- brak potrzeby przekształcania wszystkich analizowanych czynników na jedną uniwersalną jednostkę (np. pieniądz).

Podsumowując, modele z rodziny DEA dają wiele nowych możliwości analizy poszczególnych wariantów technologicznych wykorzystywanych w sektorze energetycznym. Oczywiście zakres potencjalnych możliwości praktycznego wykorzystania modeli DEA jest znacznie szerszy i wykracza poza ramy artykułu, którego celem było zasygnalizowanie możliwości zastosowania przedmiotowej metodyki.

Praca wykonana w ramach prac statutowych nr 15/11.200.360 oraz 15/11.200.359 finansowanych przez MNiSW.

## Literatura

- Cooper i in. 2004 – Cooper, W.W., Seiford, L.M. i Zhu, J., 2004. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. Boston: Wyd. Kluwer Academic Publishers.
- Cooper i in. 2007 – Cooper, W.W., Seiford, L.M. i Tone, K. 2007. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Wyd. Springer.
- DOE/NETL, 2010 – Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity. Wyd. U.S. Department of Energy.
- DOE/NETL, 2010 – Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 2: Coal to Synthetic Natural Gas and Ammonia. Wyd. U.S. Department of Energy.
- DOE/NETL, 2011 – Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 3a: Low Rank Coal to Electricity: IGCC Cases. Wyd. U.S. Department of Energy.
- DOE/NETL, 2011 – Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 3b: Low Rank Coal to Electricity: Combustion Cases. Wyd. U.S. Department of Energy.
- DOE/NETL, 2011 – Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 3c: Natural Gas Combined Cycle at Elevation. Wyd. U.S. Department of Energy.
- Dziworska, K. 2000. *Decyzje inwestycyjne przedsiębiorstw*. Gdańsk: Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego.
- Färe i in. 1994 – Färe, R., Grosskopf, S. i Lovell, C.A.K., 1994. *Production frontiers*. Cambridge University Press.
- Glasserman, P., 2004 – Monte Carlo methods in financial engineering, New York, Springer-Verlag.
- Guzik, B. 2009a. *Podstawowe modele DEA w badaniu efektywności gospodarczej i społecznej*. Poznań: Wyd. Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.
- Guzik, B. 2009b. Podstawowe możliwości analityczne modelu CCR-DEA. *Badania operacyjne i decyzje* z. 1, s. 55–75.
- Kaplan i in. 2014a – Kaplan, R., Grzesiak, P., Kwaśniewski, K. i Kopacz, M., 2014a. Ekonomiczna ocena technologii zgazowania węgla ze szczególnym uwzględnieniem sekwencji składania opcji czekania i wzrostu skali. *Przegląd Górniczy* t. 70, z. 14, s. 97–106.
- Kaplan i in. 2014b – Kaplan R., Grzesiak P., Kwaśniewski K., Kopacz M., 2014b. Ocena efektywności ekonomicznej wybranych technologii zgazowania węgla. *Karbo* z. 4, s. 202–213.
- Kaplan i in. 2015 – Kaplan, R., Grzesiak, P., Lebkowski, P., Kwaśniewski, K. i Kopacz, M. 2015. Modele Data Envelopment Analysis (DEA) wykorzystywane do oceny efektywności energo-chemicznego przetwórstwa węgla. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 18 z. 2, s. 43–59.
- Komisja Wspólnot Europejskich, 2006 – *Zielona Księga – Europejska strategia na rzecz zrównoważonej, konkurencyjnej i bezpiecznej energii*. Bruksela.
- Komisja Wspólnot Europejskich, 2007 – *Pakiet energetyczny*. Bruksela.

- Komisja Wspólnot Europejskich, 2007 – *Pakiet liberalizacyjny*. Bruksela.
- Komisja Wspólnot Europejskich, 2008 – *Pakiet klimatyczny*. Bruksela.
- Kwaśniewski, K. i Kopacz, M. red. 2015. *Zgazowanie węgla : uwarunkowania, efektywność i perspektywy rozwoju*. Kraków: Wyd. AGH.
- Szapiro, T. 2000. *Decyzje menedżerskie z Excelem*. Warszawa: PWE.
- Trigeorgis, L. 1996. Evaluating leases with complex operating options. *European Journal of Operational Research* Vol. 91, s. 315–329.
- Wanielista i in. 2002 – Wanielista, K., Saługa, P. i Kicki, J. 2002. *Wycena wartości zasobów złoża: Nowa strategia i metody wyceny*. Kraków: Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria z Lampką Górnictwem nr 12, IGSMiE PAN.

