

Łukasz LELEK*, Joanna KULCZYCKA**, Anna LEWANDOWSKA***

Środowiskowa ocena prognozowanej struktury wytwarzania energii elektrycznej w Polsce do 2030 r.

STRESZCZENIE. Celem artykułu jest zaprezentowanie możliwości wykorzystania metody LCA (*Life Cycle Assessment*) do oceny skuteczności i efektywności realizacji polityki energetycznej w obszarze ochrony środowiska i innych działań strategicznych na szczeblu krajowym, regionalnym i lokalnym. W artykule omówiono znaczenie energii w badaniach LCA oraz dokonano charakterystyki polskiego sektora energetycznego. Analiza polegała na określeniu oddziaływania na środowisko produkcji energii elektrycznej w Polsce zgodnie z różnymi scenariuszami (scenariusz bazowy struktura na rok 2012) oraz obliczeniu potencjalnego efektu ekologicznego dla zmian planowanych do wprowadzenia w polskim systemie energetycznym do 2030 roku. Do tych badań wykorzystano dane ogólne pochodzące z bazy danych Ecoinvent oraz udziały procentowe poszczególnych nośników w strukturze produkcji energii elektrycznej. Aktualna oraz przyszła (2015–2030) struktura wytwarzania energii w Polsce została zamodelowana na podstawie danych statystycznych i założeń *Polityki energetycznej Polski do 2030 roku*. Wykonane analizy pozwoliły na ocenę i weryfikację działań podjętych w polityce energetycznej kraju, a uznanych za niezbędne dla poprawy jakości środowiska (zwłaszcza w zakresie maksymalnej redukcji emisji gazów cieplarnianych), dzięki którym sektor ma stać się niskoemisyjny i bardziej konkurencyjny. Analiza bazująca na przyszłych założeniach programowych polskiej polityki energetycznej pozwoliła ocenić ich słuszność oraz wskazać obszary wymagające podjęcia szybkich działań naprawczych.

SŁOWA KLUCZOWE: LCA, polityka energetyczna, energetyka, energia elektryczna, ocena środowiskowa

* Mgr inż. – Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi I Energia PAN, Kraków; autor do korespondencji: tel.: (+48) 12 617 16 52, e-mail: lelek@meeri.pl.

** Dr inż. – AGH Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie; Wydział Zarządzania, Kraków.

*** Dr hab., prof. ndzw. – Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu; Wydział Towaroznawstwa, Poznań.

Wprowadzenie

Polski sektor energetyczny stoi przed szeregiem wyzwań, które wynikają z rosnącego zapotrzebowania gospodarki na energię finalną i nieadekwatnego do tego stanu infrastruktury wytwórczej i przesyłowej, uzależnienia od zewnętrznych dostaw gazu ziemnego i ropy naftowej, a także zobowiązań międzynarodowych m.in. w zakresie wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz ochrony klimatu. W związku z tym konieczne jest podjęcie zdecydowanych działań, zwłaszcza w obliczu szeregu niekorzystnych zjawisk, np. znacznego wzrostu cen surowców energetycznych, poważnych awarii systemów energetycznych oraz pogarszania jakości środowiska. Zjawiska te przyczyniają się do coraz szerszego wykorzystywania OZE, modernizacji systemów energetycznych, jak i poszukiwania nowych, niskoemisyjnych rozwiązań technologicznych (Lelek i Koneczna 2012). Wszystko to w najbliższym okresie (do 2030 r.) wymaga zmiany podejścia w polityce energetycznej, której cele i zadania powinny bazować na wiarygodnych i rzetelnie udokumentowanych danych. Ponadto wzrost udziału różnego typu dotacji z UE wymaga przejrzystej i regularnie wykonywanej oceny, zwłaszcza dotyczącej inwestycji sektora energetycznego, która powinna uwzględniać zaostrzające się wymagania m.in. dotyczące ochrony środowiska, zubożenia zasobów paliw itp.

Biorąc pod uwagę strukturę produkcji energii (tab. 1) oraz zobowiązania wynikające z umów międzynarodowych, do strategicznych założeń *Polityki energetycznej Polski do 2030 roku* zalicza się (odnośnik literaturowy):

- ✧ poprawę efektywności energetycznej,
- ✧ wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii,
- ✧ dywersyfikację struktury wytwarzania energii elektrycznej, w tym poprzez wprowadzenie energetyki jądrowej,
- ✧ rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w tym biopaliw,
- ✧ rozwój konkurencyjnych rynków paliw i energii,
- ✧ ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko (Polityka... 2009).

Prognozy dla Polski przewidują znaczne obniżenie zużycia energii pierwotnej na jednostkę PKB (tab. 2) z poziomu około 56,7 toe/mln zł'07 w 2015 r. do około 33,0 toe/mln zł'07 w 2030 r. Zakłada się także obniżenie elektrochłonności PKB z poziomu 90,4 MWh/zł'07 w 2015 r. do 60,6 MWh/zł'07 w 2030 r. Ponadto przewiduje się, że poziom efektywności energetycznej polskiej gospodarki odpowiadający średniemu poziomowi efektywności krajów UE15 z 2005 r. (177,4 toe/mln\$'00) zostanie osiągnięty pod koniec okresu prognozy (2030 rok) (Prognoza... 2009).

W Polsce, w strukturze produkcji energii elektrycznej, dominują wciąż dwa podstawowe nośniki energii – węgiel kamienny i brunatny (ok. 85%). W ostatnich latach zauważalny jest jednak wzrost znaczenia OZE, w tym energii wody i biomasy. Biomasa wykorzystuje się głównie w biogazowniach oraz w procesie współspalania z węglem (Kulczycka i Pietrzyk-Sokulska, red. 2012). W tabeli 3 zestawiono aktualną (na rok 2012 r.) oraz prognozowaną strukturę produkcji w przeliczeniu na przewidywaną produkcję energii elektrycznej netto jak i dane inwentarzowe pobrane z bazy Ecoinvent (<http://www.ecoinvent.org/database>; Polityka... 2009). Jak widać, wyraźnie zmniejsza się udział węgla kamiennego z 49,7% w 2012 roku do

TABELA 1. Struktura produkcji energii elektrycznej w elektrowniach krajowych – wielkości brutto

TABLE 1. Structure of the production of electricity in national power plants, gross value

Lp.	Wyszczególnienie	2013 r.
		[GWh]
1.	Produkcja ogółem (1.1+1.2+1.3+1.4)	162 501
1.1	Elektrownie zawodowe	147 435
1.1.1	El. zawodowe wodne	2 762
1.1.2	El. zawodowe ciepłne	144 673
1.1.2.1	na węgla kamiennym	84 566
1.1.2.2	na węgla brunatnym	56 959
1.1.2.3	gazowe	3 149
1.2	El. inne odnawialne	72
1.3	El. wiatrowe	5 823
1.4	Elektrownie przemysłowe	9 171

Źródło: http://www.pse.pl/index.php?modul=8&y=2013&m=12&id_rap=212

TABELA 2. Energochłonność i elektrochłonność PKB – prognozy dla Polski w latach 2006–2030

TABLE 2. Energy and electricity intensity of GDP – forecasts for Poland from 2006–2030

Rok	2015	2020	2025	2030
Energochłonność [toe/mln zł'07]	56,7	46,6	38,6	33
Elektrochłonność [MWh/ mln zł'07]	90,4	77,8	67,8	60,6

Źródło: Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku, Załącznik 2 do Polityki energetycznej Polski do 2030 roku, Ministerstwo Gospodarki, Warszawa 2009 r.

35,6% w 2030 roku, co stanowi różnicę 14,1%. Zauważalny jest także spadek znaczenia węgla brunatnego, który na przestrzeni 2012–2030 wyniesie niemal 12,3%. Przewiduje się powolny wzrost udziału gazu ziemnego (do 6,6%) oraz istotny udział energii jądrowej od 2020 roku. Zgodnie z założeniem wkład energii odnawialnej w 2030 ma sięgnąć poziomu 18,8%. Głównymi prognozowanymi źródłami energii odnawialnej mają być biomasa, biogaz i wiatr.

Jeśli porównać dane dotyczące struktury produkcji energii elektrycznej w Polsce zawarte w bazie Ecoinvent według nośników z prognozowanymi wartościami dla pozostałych lat, to widać, że różnice są znaczące, szczególnie od 2015 roku. Dane Ecoinvent zbliżone są do statystyk z lat 2010, co znaczy, że przewidziana dla nich reprezentatywność czasowa (1992–2004) jest słuszna i że mogą one służyć jako wiarygodne źródło danych inwentarzowych dla procesów realizowanych np. dla 2010 roku. Jednak analiza analogicznych danych statystycznych od 2012 roku pokazuje, że należałoby skorygować dane w następujących kierunkach:

TABELA 3. Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce według nośników w wybranych latach

TABLE 3. Structure of electricity production in Poland, selected years

	Ecoinvent V2.2 %	2012		2015		2020		2025		2030	
		TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Węgiel kamienny	55,4	80,6	49,7	62,9	44,9	62,7	40,2	58,4	32,4	71,8	35,6
Węgiel brunatny	36,3	54,0	33,3	51,1	36,5	40,0	25,6	48,4	26,8	42,3	21,0
Gaz ziemny	3,3	6,3	3,9	5,0	3,6	8,4	5,4	11,4	6,3	13,4	6,6
Produkty naftowe	1,6	2,9	1,8	2,5	1,8	2,8	1,8	2,9	1,6	3,0	1,5
Energia jądrowa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,5	6,7	21,1	11,7	31,6	15,7
Energia odnawialna	2,1	16,9	10,4	17,0	12,1	30,1	19,3	36,5	20,2	38,0	18,8
<i>w tym: wodna</i>	<i>1,5</i>	<i>2,1</i>	<i>1,3</i>	<i>1,4</i>	<i>1,0</i>	<i>1,6</i>	<i>1,0</i>	<i>1,7</i>	<i>0,9</i>	<i>1,7</i>	<i>0,8</i>
<i>w tym: wiatrowa</i>	<i>0,1</i>	<i>4,7</i>	<i>2,9</i>	<i>3,7</i>	<i>2,6</i>	<i>6,9</i>	<i>4,4</i>	<i>8,9</i>	<i>5,0</i>	<i>9,4</i>	<i>4,6</i>
<i>w tym: biomasa</i>	<i>0,5</i>	<i>8,8</i>	<i>5,4</i>	<i>9,1</i>	<i>6,5</i>	<i>15,8</i>	<i>10,1</i>	<i>16,7</i>	<i>9,3</i>	<i>17,2</i>	<i>8,5</i>
<i>w tym: biogaz</i>	<i>0,1</i>	<i>1,3</i>	<i>0,8</i>	<i>2,8</i>	<i>2,0</i>	<i>5,8</i>	<i>3,7</i>	<i>9,1</i>	<i>5,1</i>	<i>9,8</i>	<i>4,9</i>
<i>w tym: słoneczna</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
Wodne pompowe	1,1	0,49	0,3	1,0	0,7	1,0	0,6	1,0	0,6	1,0	0,5
Odpady	0,0	0,97	0,6	0,6	0,4	0,6	0,4	0,7	0,4	0,7	0,3
RAZEM	100,0	162,2	100,0	140,1	100,0	156,1	100,0	180,4	100,0	201,8	100,0

Źródło: [http://www.rynek-energii-elektrycznej.cire.pl/st,33,207,tr,75,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0](http://www.rynek-energii-elektrycznej.cire.pl/st,33,207,tr,75,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0), podstawowe dane.html

<http://www.ecoinvent.org/database>

Polityka energetyczna Polski do 2030 r., Ministerstwo Gospodarki i Pracy, Zespół do spraw polityki energetycznej; Warszawa, styczeń 2009 r.

zmniejszenie udziału węgla kamiennego i brunatnego, zwiększenie udziału gazu ziemnego, zwiększenie udziału biomasy i biogazu oraz energii wiatrowej. Na podstawie tabeli 3 sporządzono tabele inwentarzowe, odpowiadające poszczególnych rocznikom i przeprowadzono porównawczą analizę LCA.

1. Cel i zakres analizy

Celem badania było określenie oddziaływania na środowisko związanego z wyprodukowaniem energii elektrycznej zgodnie z różnymi scenariuszami (scenariusz bazowy rok 2012) oraz określenie efektu ekologicznego zmian przewidzianych do wprowadzenia w polskim systemie energetycznym do 2030 roku (tab. 4) (Polityka... 2009). Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto wyprodukowanie 1 TJ energii elektrycznej. Analiza objęła zakres od kopalni do wyjścia gotowej energii z elektrowni. Na wzór tabeli zawartej w bazie Ecoinvent sporządzono tabele inwentarzowe dla pozostałych lat, zgodnie z informacjami zawartymi w tabeli 3. Analizę przeprowadzono na danych ogólnych pobranych z bazy Ecoinvent, a jedyną oraz udziały procentowe poszczególnych nośników w strukturze produkcji energii elektrycznej.

2. Metodologia

Analizy wykonano w programie SimaPro. Oceny wpływu cyklu życia dokonano metodą Impact 2002+, stanowiącą połączenie czterech metod LCIA: IMPACT 2002+, Ecoindicator 99/E (Goedkoop i Spriensma 2000), CML (Guinee i in. 2002) oraz IPCC. Na najbardziej skumulowanym poziomie wielkość oddziaływania na środowisko wyrażona jest wartością ekowskaźnika i mierzona w punktach środowiskowych [Pt]. Wynik skumulowanego ekowskaźnika można „rozłożyć” na mniejsze elementy: kategorie szkody (zdrowie człowieka, jakość ekosystemu, zmiany klimatu, zasoby) oraz kategorie wpływu (czynniki rakotwórcze, czynniki nierakotwórcze, promieniowanie jonizujące, wpływ zw. nieorganicznych na układ oddechowy, wpływ zw. organicznych na układ oddechowy, zubożenie warstwy ozonowej, ekotoksyczność, eutrofizacja, zagospodarowanie terenu, zakwaszanie, globalne ocieplenie, eksploatacja surowców mineralnych, energia nieodnawialna). Ważone wyniki wskaźników kategorii wpływu lub szkody wyrażone są także w punktach środowiskowych [Pt] (*endpoints level*). Ponadto kategorie szkody i wpływu można dodatkowo analizować na bardziej zdezagregowanych poziomach: normalizowania i charakteryzowania (*midpoints level*). W tym ostatnim przypadku wyniki wskaźników kategorii wpływu wyrażone będą w ich własnych jednostkach, np. kg CO₂e dla globalnego ocieplenia.

TABELA 4. Założenia i zakresy analiz LCA przeprowadzonych w odniesieniu do polskiego systemu energetycznego

TABLE 4. Assumptions and ranges of LCA from studies carried out in relation to the Polish energy system

RODZAJ ENERGII UJĘTY ANALIZĄ	⋄ elektryczna
ETAPY CYKLU ŻYCIA WŁĄCZONE DO ANALIZY	⋄ wydobycie surowców ⋄ produkcja energii (infrastruktura elektrowni włączona do analizy)
ZAKRES CZASOWY	2012, 2015, 2020, 2025, 2030
ZAKRES GEOGRAFICZNY	POLSKA
CEL ANALIZY	określenie oddziaływania na środowisko związanego z wyprodukowaniem energii elektrycznej zgodnie z różnymi scenariuszami (bazowy rok 2012) oraz określenie efektu ekologicznego zmian przewidzianych do wprowadzenia w polskim systemie energetycznym do 2030 roku
JEDNOSTKA FUNKCJONALNA	wyprodukowanie 1 TJ energii elektrycznej
JAKOŚĆ DANYCH	dane specyficzne (reprezentatywne dla Polski) tylko w zakresie udziałów procentowych poszczególnych nośników energii w strukturze produkcji energii elektrycznej

3. Wynik potencjalnego oddziaływania na środowisko LCIA (Life Cycle Impact Assessment)

Oddziaływanie na środowisko wyprodukowania (bez dystrybucji) 1 TJ energii elektrycznej zgodnie z przyjętymi na poszczególne lata scenariuszami technologicznymi dla Polski jest zróżnicowane. W 2012 roku (który przyjęto za bazowy) wynosi ono 81 Pt i spada w kolejnych latach. Najmniejszy spadek widoczny jest dla 2015 roku (2,6%), podczas gdy widoczne redukcje oddziaływania następują od 2020 roku (11,4%), by w 2030 osiągnąć poziom 65,9 Pt, co daje pozytywny efekt ekologiczny równy 18,6% (tab. 5, rys. 1).

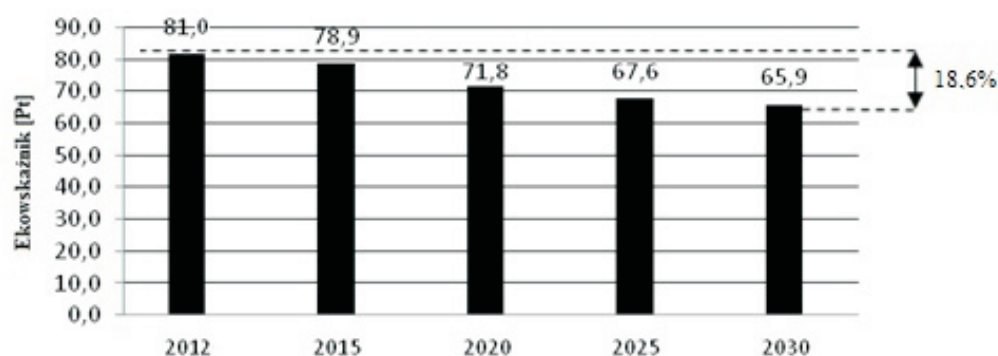
Aby uzyskać więcej informacji dotyczących rodzaju problemów środowiskowych, które potencjalnie mogą wystąpić z tytułu produkcji energii elektrycznej, powyższe wyniki skumulowanego wskaźnika poddano bardziej szczegółowej analizie. W tabeli 6 oraz na rysunku 2 zaprezentowano ważone wyniki wskaźników kategorii wpływu, które pokazują, że bez względu na rok i przyjęty scenariusz istnieją trzy dominujące problemy środowiskowe w strukturze oddziaływania (wyróżnione w tabeli 6): zaburzenia oddechowe wynikające z emisji związków nieorganicznych (kolor czarny na rys. 2) stanowiące średnio 23,8% całego wpływu, globalne ocieplenie (kolor biały na rys. 2) mające przeciętny udział 24,6% oraz wyczerpywanie nieodnawialnych nośników energii (kolor szary na rys. 2), które tworzy średnio 20,3% całego oddziaływania. Dwie pierwsze to typowo emisyjne kategorie wpływu (*input related impact*

TABELA 5. Wyniki skumulowanego wskaźnika dla wyprodukowania 1 TJ energii elektrycznej w Polsce według różnych scenariuszy technologicznych w wybranych latach [Pt]

TABLE 5. Results of the cumulative index for the production of 1 TJ of electricity in Poland according to different scenarios of technology in selected years [Pt]

Ekowskaźnik	2012	2015	2020	2025	2030
Całkowity wpływ na środowisko [Pt]	81,0	78,9	71,8	67,6	65,9
Efekt ekologiczny [Pt] (2012 = 100%)	–	2,1	9,2	13,4	15,1
Efekt ekologiczny [%] (2012 = 100%)	–	2,6	11,4	16,5	18,6

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem SimaPro v7.3 oraz IMPACT 2002+ v2.05



Rys. 1. Wyniki skumulowanego wskaźnika dla wyprodukowania 1 TJ energii elektrycznej w Polsce według różnych scenariuszy technologicznych w wybranych latach [Pt]

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem SimaPro v7.3 oraz IMPACT 2002+ v2.05

Fig. 1. The results of the cumulative index for the production of 1 TJ of electricity in Poland according to different scenarios of technology in selected years [Pt]

categories), gdzie emisja (w tym przypadku do powietrza) określonych związków uruchamia mechanizm środowiskowy i inicjuje szereg procesów chemicznych, fizycznych i biologicznych, które w konsekwencji skutkują powstaniem danej presji i wpływu środowiskowego. W przypadku zaburzeń oddechowych mowa o emisji takich związków nieorganicznych jak: amoniak, tlenek węgla, tlenki azotu, pyły oraz tlenki siarki. W odniesieniu do globalnego ocieplenia chodzi o emisję do powietrza związków zaklasyfikowanych jako gazy cieplarniane (GHGs). Oba problemy mogą prowadzić do zaburzeń zdrowotnych u ludzi, w związku z tym wchodzi w zakres kategorii szkody Human Health. Trzecią dominującą w strukturze oddziaływania na środowisko produkcji energii elektrycznej kategorią wpływu jest *Non-renewable energy*, wchodząca w zakres kategorii szkody Zasoby. Presję wywołuje tutaj wykorzystywanie i ubożenie zasobów energetycznych uznanych za nieodnawialne (węgiel kamienny, węgiel brunatny, gaz ziemny, ropa naftowa, złoża uranu).

Analizy LCA dokonywane są w odniesieniu do całych systemów wyrobów uwzględniających procesy jednostkowe, wchodzące w zakres zdefiniowanych granic systemu. Oznacza to,

TABELA 6. Wyniki wskaźników kategorii wpływu dla wyprodukowania 1 TJ energii elektrycznej w Polsce według różnych scenariuszy technologicznych w wybranych latach [Pt]

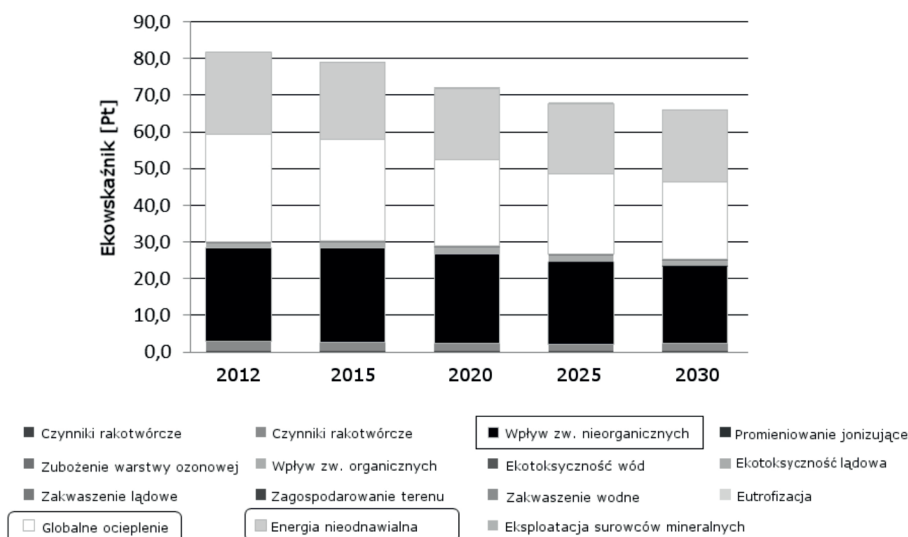
TABLE 6. Results of impact category indicators for the production of 1 TJ of electricity in Poland according to different scenarios of technology in selected years [Pt]

Kategorie wpływu	2012	2015	2020	2025	2030
Czynniki rakotwórcze	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
Czynniki nierakotwórcze	2,5	2,2	2,1	1,8	1,9
Wpływ zw. nieorganicznych na układ oddechowy	25,3	25,8	24,3	22,4	21,1
Promieniowanie jonizujące	0,01	0,01	0,07	0,12	0,16
Zubożenie warstwy ozonowej	0,0003	0,0003	0,001	0,001	0,001
Wpływ zw. organicznych na układ oddechowy	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Ekotoksyczność wód	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03
Ekotoksyczność lądowa	1,1	1,4	1,7	1,6	1,5
Zakwaszanie lądowe	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Zagospodarowanie terenu	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Zakwaszenie wodne	–	–	–	-	-
Eutrofizacja	–	–	–	-	-
Globalne ocieplenie	29,1	27,7	23,4	21,9	21,1
Energia nieodnawialna	22,3	21,0	19,4	19,2	19,5
<i>Suma [Pt]</i>	<i>81,0</i>	78,9	71,8	67,6	65,9

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem SimaPro v7.3 oraz IMPACT 2002+ v2.05

że w przeprowadzonych badaniach oddziaływanie na środowisko naliczone zostało z tytułu wejść (zużycia surowców i materiałów przetworzonych) i wyjść (emisje do wody, gleby, powietrza, odpady do zagospodarowania) przypisanych do wszystkich procesów jednostkowych mieszczących się od kołyski do bramy (gotowa energia wyprodukowana w elektrowni), w tym także dotyczących infrastruktury. W przypadku analizowanych siedmiu systemów każdy z nich składał się z około 2 000 procesów jednostkowych. Wykazane poniżej w tabeli 7 informacje dotyczą zatem wszystkich tych procesów łącznie, bez rozdziału na bezpośrednie i pośrednie aspekty środowiskowe. W wykazanych w tabeli 7 emisjach będą uwzględnione zarówno te, które bezpośrednio wynikają ze spalania nośników energetycznych jak i te, które związane są pośrednio z działalnością elektrowni (np. następujące u dostawców). W tabeli 7 zestawiono dwa rodzaje informacji:

- ✧ dane inwentarzowe (LCI) – obejmujące wielkość emisji zanieczyszczeń oraz poboru nośników energii dla całych systemów wyrobów, w przeliczeniu na 1 TJ wyprodukowanej energii elektrycznej [Mg/TJ energii elektrycznej],
- ✧ wyniki oceny wpływu (LCIA) – wykazujące procentowe udziały poszczególnych emisji i poborów w tworzeniu wpływu w ramach trzech kategorii wpływu: zaburzeń oddechowych/związków nieorganicznych, globalnego ocieplenia oraz energii nieodnawialnej.



Rys. 2. Wyniki wskaźników kategorii wpływu dla wyprodukowania 1 TJ energii elektrycznej w Polsce według różnych scenariuszy technologicznych w wybranych latach [Pt]
 Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem SimaPro v7.3 oraz IMPACT 2002+ v2.05

Fig. 2. Results of impact category indicators for the production of 1 TJ of electricity in Poland according to different scenarios of technology in selected years [Pt]

Informacje zawarte w tabeli 7 pokazują, że w poszczególnych latach emisyjność i zasobochłonność produkcji energii elektrycznej będzie się zmniejszać. W zakresie zaburzeń oddechowych główną rolę odgrywa emisja trzech zanieczyszczeń nieorganicznych (tlenków azotu, pyłów < 2,5 um, tlenków siarki), które tworzą łącznie 99,9% oddziaływania w tej kategorii wpływu. O ile w pierwszym roku analizy (2012) dominujący udział wykazują tlenki siarki (ok. 40% wyniku wskaźnika dla zaburzeń oddechowych), o tyle od 2015 roku zmniejsza się ich rola na rzecz emisji pyłów. Wynika to z redukcji zużycia paliw kopalnych (węgla kamiennego i brunatnego) jako nośników energii. Rośnie natomiast ilość emitowanych pyłów, choć wzrost ten jest raczej powolny. W tabeli 7 wykazano także zmniejszanie się wielkości emisji tlenków azotu z poziomu 0,500 Mg w 2012 roku do 0,389 Mg w 2030. Efektem redukcji wykorzystania węgla jest także spadek emisji gazów cieplarnianych, wyraźnie rysujący się z biegiem lat. Niemal w całości (98,0–98,3%) za wpływ w ramach globalnego ocieplenia odpowiedzialna jest emisja ditlenku węgla, w mniejszym stopniu metanu (1,5–1,8%).

Dane wykazane w tabeli 7 pokazują, że spada także zasobochłonność produkcji energii elektrycznej. Wyprodukowanie 1 TJ energii według scenariusza bazowego (2015 r.) zużywa 226,8 Mg surowców energetycznych, podczas gdy w roku 2030 jest to już tylko 150,2 Mg. Wyraźnie wzrasta od 2020 roku zużycie uranu, co jest efektem zaprognozowania wprowadzenia elektrowni jądrowej w Polsce, jednakże według aktualnego Programu Polskiej Energetyki Jądrowej uruchomienie pierwszego bloku tego typu zaplanowane jest najwcześniej na rok 2024. Zużycie uranu w poprzednich latach (do 2015) na poziomie 0,00007 Mg nie wynika z krajowej produkcji energii jądrowej, ale z założenia poczynionego w bazie *ecoinvent*, że transport

TABELA 7. Wielkość i udział emisji zanieczyszczeń oraz zużycia nośników energetycznych w wynikach wskaźników trzech dominujących kategorii wpływu dla analizowanych scenariuszy produkcji energii elektrycznej w Polsce wybranych latach [na 1 TJ energii elektrycznej]

TABLE 7. Volume and share of emissions and consumption of energy carriers in the results of the three dominant categories of indicators for the analyzed scenarios, the impact of electricity production in Poland in selected years [1 TJ of electricity]

Kategorie wpływu/emisje/paliwa kopalne	2012	2015	2020	2025	2030
WPLYW ZW. NIEORGANICZNYCH NA UKŁAD ODDECHOWY					
NO _x [Mg]	0,500	0,486	0,442	0,401	0,389
NO _x [%]	24,6	23,6	22,8	22,6	23,2
Pyły < 2,5 um [Mg]	0,094	0,106	0,114	0,106	0,098
Pyły < 2,5 um [%]	36,8	40,6	46,2	46,7	45,8
SO ₂ [Mg]	1,266	1,197	0,976	0,890	0,844
SO ₂ [%]	38,6	35,7	30,9	30,7	30,9
Suma [Mg]	1,860	1,789	1,532	1,397	1,331
Suma [%]	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9
GLOBALNE OCIEPLENIE					
CO ₂ [Mg]	283,0	269,3	227,0	213,0	205,0
CO ₂ [%]	98,0	98,3	98,1	98,2	98,1
Metan [Mg]	0,665	0,583	0,537	0,461	0,493
Metan [%]	1,8	1,5	1,6	1,5	1,7
Suma [Mg]	283,7	269,9	227,5	213,5	205,5
Suma [%]	99,8	99,8	99,7	99,7	99,7
ENERGIA NIEODNAWIALNA					
Węgiel brunatny [Mg]	121,5	128,4	90,59	94,56	74,45
Węgiel brunatny [%]	35,8	39,8	30,4	32,1	24,8
Węgiel kamienny [Mg]	101,6	87,19	78,39	64,24	70,13
Węgiel kamienny [%]	57,1	52,2	50,8	42,1	45,2
Gaz ziemny [m ³]	2040	2333	3865	4680	4810
Gaz ziemny [Mg] (d = 0,716 kg/m ³)	1,460	1,671	2,767	3,351	3,444
Gaz ziemny [%]	2,5	2,9	5,3	6,5	6,5
Ropa naftowa [Mg]	2,228	2,529	2,562	2,305	2,206
Ropa naftowa [%]	3,1	3,6	4,0	3,6	3,4
Uran [Mg]	0,00007	0,00008	0,0005	0,0008	0,001
Uran [%]	1,4	1,4	9,5	15,6	20,1
Suma [Mg]	226,8	219,8	174,3	164,5	150,2
Suma [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem SimaPro v7.3 oraz IMPACT 2002+ v2.05

kolejowy niektórych materiałów do kopalń węglowych zużywa energię elektryczną wyprodukowaną zgodnie z uśrednionym scenariuszem europejskim, który uwzględnia strukturę produkcji energii elektrycznej krajów UE, wśród których są takie, które wykorzystują energię jądrową.

Podsumowanie

Wykonane analizy pozwoliły na ocenę weryfikującą aktualnie podjęte w polityce energetycznej kraju działania niezbędne dla poprawy jakości środowiska (zwłaszcza w zakresie maksymalnej redukcji emisji gazów cieplarnianych), dzięki którym sektor ma być niskoemisyjny i bardziej konkurencyjny. Analiza bazująca na przyszłych założeniach programowych polskiej polityki energetycznej pozwoliła ocenić ich słuszność oraz wskazać obszary wymagające podjęcia szybkich działań naprawczych. Badania pokazały bowiem, że polski system energetyczny oddziałuje negatywnie na środowisko w trzech głównych obszarach: zaburzenia oddechowe/zw. nieorganiczne, globalne ocieplenie oraz zużycie nieodnawialnych zasobów energii. Dwa pierwsze problemy środowiskowe wywoływane są emisjami. W pierwszym przypadku mowa o związkach nieorganicznych, szczególnie: tlenkach azotu, ditlenku siarki i pyłach. Spośród wszystkich pośrednich i bezpośrednich emisji związków nieorganicznych związanych z całym analizowanymi systemami wyrobów, największy udział w tworzeniu zaburzeń oddechowych mają emisje NO_x i SO₂ następujące w samych elektrowniach i elektrociepłowniach, jako skutek spalania nośników energii. W przypadku pyłów, emisje rozłożone są pomiędzy elektrowniami a łańcuchem dostawców, szczególnie kopalń węgla kamiennego i brunatnego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że największa emisja GHGs związana jest z produkcją energii z węgla brunatnego, a następnie węgla kamiennego, na których bazuje polska energetyka. Elektrownie i elektrociepłownie, wykorzystujące te paliwa, w ponad 90% odpowiedzialne są za tworzenie śladu węglowego.

Badania LCA pokazały, że istnieje pozytywny efekt ekologiczny planowanych zmian w polskim systemie energetycznym. Szczególnie widoczne redukcje oddziaływania następują od 2020 roku (11,4%), by w 2030 osiągnąć poziom 65,9 Pt, co daje pozytywny efekt ekologiczny w porównaniu do 2012 w postaci redukcji ekowskaźnika o 18,6% (tab. 3, rys. 1). Wyraźnie spada zasobochłonność produkcji energii elektrycznej. Wyprodukowanie 1 TJ energii według scenariusza 2012 r. zużywa 226,8 Mg surowców energetycznych, podczas gdy w roku 2030 jest to już tylko 150,2 Mg. W kontekście zużycia nośników energii należy podkreślić, że wzrasta od 2020 roku wykorzystanie uranu, co jest efektem zaprognozowania wprowadzenia elektrowni jądrowej w Polsce, jednakże według aktualnego Programu Polskiej Energetyki Jądrowej uruchomienie pierwszego bloku tego typu zaplanowane jest najwcześniej na rok 2024. Energetyka jądrowa charakteryzuje się najmniejszą emisją gazów cieplarnianych. Wprowadzenie elektrowni jądrowych pogarsza wskaźniki w dwóch kategoriach wpływu: promieniowanie jonizujące oraz ubożenie warstwy ozonowej, jednak nie podwyższa ogólnego negatywnego oddziaływania na środowisko.

Konieczność osiągnięcia 20% redukcji emisji ditlenku węgla w 2020 roku (w odniesieniu do stanu z roku 2005) stanowi dla Polski – znajdującej się wśród sześciu największych emiterów

w Unii Europejskiej – poważne wyzwanie, o istotnych potencjalnych konsekwencjach społecznych, ekonomicznych i środowiskowych. Do oceny wpływu na gospodarkę działań, planowanych i podejmowanych w celu osiągnięcia niskoemisyjności, wykorzystuje się modele makroekonomiczne, np. model równowagi ogólnej. W celu określenia kosztów środowiskowych takich inicjatyw, wykorzystać można środowiskową ocenę cyklu życia (LCA).

Literatura

- [1] GOEDKOOP, M. i SPIRENSMA, R. 2000. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Assessment. Methodology Report, PreConsultants, The Netherlands.
- [2] GUINEE i in. 2002 – GUINEE, J.B., GORREE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., KONING, A., OERS, L., SLEESWIJK, A.W., SUH, S., UDO DE HAES, H.A., BRUIJN, H., DUIN, R., HUIJBREGTS, M.A.J., LINDEIJER, E., ROORDA, A.A.H., VAN DER VEN, B.L. i WEIDEMA, B.P. 2002. Handbook on life cycle assessment: Operational Guide to the ISO standards. Part 1, 2, 3. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston London ISBN 978-14-02002-28-1.
- [3] <http://www.ecoinvent.org/database/>
- [4] <http://www.rynek-energii-elektrycznej.cire.pl/st,33,207,tr,75,0,0,0,0,podstawowe-dane.html>
- [5] KULCZYCKA, J. i PIETRZYK-SOKULSKA, E. (red.) 2012. *Ewaluacja systemu energetycznego w Polsce*. Wyd. IGSMiE PAN.
- [6] LELEK, Ł. i KONECZNA, R. 2012. Sposoby ograniczenia i instrumenty wsparcia redukcji emisji CO₂ w energetyce Małopolski. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 2.
- [7] PN-EN ISO 14040:2009 Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura, PKN, Warszawa 2009.
- [8] *Polityka energetyczna Polski do 2030 r.* Ministerstwo Gospodarki i Pracy, Zespół do spraw polityki energetycznej; Warszawa, styczeń 2009 r.
- [9] *Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku*. Załącznik 2 do Polityki energetycznej Polski do 2030 roku, Ministerstwo Gospodarki, Warszawa 2009 r.

Łukasz LELEK, Joanna KULCZYCKA, Anna LEWANDOWSKA

Environmental assessment of forecasted structure of electricity generation in Poland until 2030

Abstract

The purpose of this article is to demonstrate the possibility of using the method of LCA (Life Cycle Assessment) to assess the effectiveness and efficiency of energy policy in the area of environmental protection and other strategic actions at national, regional, and local levels. The article examines the

importance of energy in LCA studies and describes the characteristics of the Polish energy sector. The analysis determined the environmental impact of electricity production in Poland under different scenarios and calculated the potential environmental impacts of changes to be introduced in the Polish energy system by 2030. For this study, data from the general database Ecoinvent were used, while specific inputs were comprised of the percentages of individual carriers in the structure of electricity production. The current and future (2015–2030) structure of energy production in Poland has been modeled on the basis of the assumptions in *Polish Energy Policy until 2030*. This examination allowed for assessment and verification of the actions taken with respect to the energy policy of the country, considering the necessity for the improvement of environmental quality (especially in terms of the maximum reduction of greenhouse gas emissions), encouraging the sector to become low-carbon and more competitive. Analyzing the assumptions of future programming from the document *Polish energy policy* helped in the assessment of the accuracy of those assumptions and to identify areas requiring urgent remedial action.

KEY WORDS: LCA, energy policy, energy, electricity, environmental assessment

