

Wojciech SUWAŁA\*, Mariusz KUDELKO\*, Jacek KAMIŃSKI\*\*

## Ekologiczne scenariusze rozwoju krajowego sektora paliwowo-energetycznego

**STRESZCZENIE.** Przedmiotem artykułu jest wykorzystanie analizy systemowej w prognozowaniu rozwoju krajowego sektora paliwowo-energetycznego. Scharakteryzowano i opisano wyniki najnowszych badań prowadzonych w Pracowni Polityki Energetycznej i Ekologicznej IGSMiE PAN, związanych z funkcjonowaniem tego sektora w Polsce. W szczególności przedstawiono problematykę oceny skutków przyjęcia różnorodnych rozwiązań prawnych z zakresu ochrony środowiska na jego przyszłe funkcjonowanie oraz wykorzystanie krajowych paliw kopalnych. Rozważane scenariusze ekologiczne obejmują zarówno krajowe, jak i unijne przepisy prawne dotyczące ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych. Dokonano także oceny wpływu ewentualnej internalizacji kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** modelowanie matematyczne, sektor paliwowo-energetyczny, ekologiczne scenariusze rozwoju

### Wprowadzenie

Jednym z kierunków badawczych rozwijanych w IGSMiE PAN są badania z zakresu zastosowania analizy systemowej w gospodarce surowcami mineralnymi, paliwami i ener-

---

\* Doc. dr hab. inż., \*\* Dr inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Roman NEY

gią. Istotnym elementem tych prac są sektorowe ograniczenia środowiskowe, związane m.in. z implementacją przepisów Unii Europejskiej do prawodawstwa krajowego. Przedmiotem szczegółowych badań były m.in.:

- ✧ analiza możliwości zapewnienia odpowiedniej jakości dostaw węgla kamiennego dla krajowego sektora wytwarzania energii elektrycznej,
- ✧ wpływ instrumentów ekonomicznych (np. handlu pozwoleniami zbywalnymi, podatku węglowego) na funkcjonowanie sektora paliwowo-energetycznego,
- ✧ problematyka wyceny kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych oraz ich wpływ na strukturę wytwarzania energii elektrycznej i ciepła,
- ✧ ocena możliwości przeprowadzenia tzw. ekologicznej reformy podatkowej.

Wnioski z prowadzonych badań formułowane są w oparciu o zbudowane w IGSMiE PAN modele matematyczne i ich implementacje komputerowe, wykorzystujące bogaty dorobek z zakresu teorii badań systemowych, nauk technicznych i ekonomicznych oraz praktyki funkcjonowania sektorów energetycznych<sup>1</sup>. Bardzo obszerny i szczegółowy materiał empiryczny, będący niezbędnym wsadem dla prowadzonych symulacji, weryfikuje przydatność tego typu badań oraz możliwość ich praktycznego wykorzystania w różnorodnych pracach planistycznych. Modele te były z powodzeniem wykorzystywane w ekspertyzach zamawianych m.in. przez Polskie Sieci Energetyczne S.A., EC Warszawskie S.A., KWB Konin S.A., Ministerstwo Środowiska.

W artykule podjęto problematykę oceny wpływu przyjęcia różnorodnych rozwiązań prawnych z zakresu ochrony środowiska na przyszłe funkcjonowanie krajowego sektora energetycznego oraz wykorzystanie krajowych paliw kopalnych. Tematyka ta była i wciąż jest przedmiotem wielu prac realizowanych przez różne zespoły naukowe i instytucje branżowe (m.in. dawny Zakład Problemów Energetyki IPPT PAN, EnergSys, Agencję Rynku Energii, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.). Analizowane scenariusze rozwojowe uwzględniały cały szereg rozwiązań prawnych z dziedziny ochrony środowiska, zgodnie z harmonogramem ich wprowadzania i stopniem ważności dla sektora energetycznego. Należy podkreślić, że prace modelowe prowadzone w IGSMiE PAN cechują się kompleksowym sposobem ujęcia poruszanej problematyki badawczej — zarówno od strony techniczno-ekonomicznej, jak i wzajemnych relacji cechujących poszczególne ograniczenia środowiskowe. Ponadto w badaniach w szczególności sposób oceniano wpływ rozwiązań prawnych z dziedziny ochrony środowiska na krajowy sektor węgla kamiennego, będący głównym dostawcą paliw dla krajowej energetyki.

W artykule przedstawiono syntetyczne wyniki prac opartych na zbudowanym w IGSMiE PAN modelu rozwoju krajowego sektora energetycznego (Kudełko 2003; Suwała i in. 2005). Rozważane scenariusze ekologiczne obejmują zarówno krajowe, jak i unijne przepisy prawne dotyczące ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych. Model umożliwia także ocenę wpływu ewentualnej internalizacji kosztów zewnętrznych, powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych, na strukturę wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w sektorze energetycznym. Analiza tego zagadnienia pozwala na weryfikację zamierzonych

---

<sup>1</sup> Szczegółowy opis struktur, zadań i sposobów wykorzystania wyników zbudowanych w IGSMiE PAN modeli można znaleźć m.in. w: Suwała 1995, Suwała i in. 2001, 2002, 2004, 2005, Kudełko 2000, 2003, 2004, 2005, Kudełko i in. 2001, Sztaba i in. 2004, Kamiński i in. 2002.

celów ekologicznych z punktu widzenia efektywności alokacyjnej i ekonomicznej racjonalności wprowadzania rozwiązań środowiskowych.

## 1. Model rozwoju krajowego sektora energetycznego

Zbudowany model jest narzędziem umożliwiającym średnioterminowe planowanie rozwoju krajowego systemu energetycznego. Ze względu na typ i zakres ujętych zależności można go porównać do takich narzędzi jak MARKAL, MESSAGE czy EFOM-ENV, których zadaniem jest zaprojektowanie optymalnego planu rozwoju krajowego systemu energetycznego, przy założeniu dotrzymania określonych, np. środowiskowych, ograniczeń rozwojowych. W zależności od wariantu popyt na energię finalną może być zdeterminowany egzogenicznie lub może być wyliczony na podstawie odpowiednich zależności rynkowych (cenowych i dochodowych elastyczności popytu na energię u odbiorców końcowych).

W modelu najważniejsze relacje obejmują stronę podażową i popytową krajowego systemu energetycznego. Strona podażowa określa pozyskanie paliw (z kraju lub importu) i ich przetwarzanie w energię użyteczną za pomocą technologii energetycznych. Wybory podejmowane po stronie przetwarzania energetycznego paliw dotyczą wielkości produkcji, importu energii elektrycznej i ciepła oraz poziomu inwestycji technologicznych i ochronnych. Technologie energetycznego spalania paliw to istniejące, modernizowane i nowe elektrownie i elektrociepłownie zawodowe i przemysłowe oraz ciepłownie zawodowe, przemysłowe i komunalne. Strona popytowa obejmuje wykorzystanie energii elektrycznej i ciepła przez głównych odbiorców, czyli sektory gospodarki: przemysł i budownictwo, transport, rolnictwo, handel i usługi, odbiorcy indywidualni oraz eksport.

W modelu zdefiniowano dwa odmienne kryteria decyzyjne. Pierwsze kryterium zakłada osiągnięcie tzw. **efektywności kosztowej**, czyli minimalizację kosztów rozwoju krajowego systemu energetycznego. Drugie kryterium oparte jest na maksymalizacji tzw. **dobrobytu społecznego**, definiowanego jako suma nadwyżek konsumentów i producentów. W teorii ekonomii suma tych nadwyżek uznawana jest jako ekonomiczna miara korzyści społecznych możliwych do osiągnięcia na pojedynczym rynku produktów czy usług.

W oparciu o ten model powstała jego wersja przystosowana do szczegółowej analizy możliwości wykorzystania w krajowej energetyce tzw. **technologii czystego węgla (TCW)**. W jednym zadaniu obliczeniowym, dla narzuconych ograniczeń podażowych i popytowych, technologicznych oraz emisyjnych, w oparciu o klasyczne kryterium optymalizacji oparte na minimalizacji kosztów, analizowane są różnorodne technologie energetycznego spalania paliw. Pełna lista technologii energetycznych obejmuje około pięćdziesiąt pozycji, do których należy zaliczyć: klasyczne elektrownie na węgiel kamienny i brunatny, elektrownie zmodernizowane, elektrownie o parametrach nad- i ultra-krytycznych, zintegrowane zgazowanie węgla (IGCC), elektrociepłownie gazowe, nowe elektrownie jądrowe, elektrownie słoneczne, wiatrowe, wodne, itp. Charakterystyki technologii ustalono na podstawie źródeł

krajowych oraz literatury zagranicznej, te ostatnie przede wszystkim w odniesieniu do nowych technologii. Niektóre z parametrów, jak koszty czy sprawności, były zmieniane w czasie, co odzwierciedlało efekt procesu uczenia się (*learning curves*), a odpowiednie współczynniki wyznaczono na podstawie wyników innych projektów przyjmując, że koszty inwestycyjne i operacyjne będą kształtowane przez procesy globalne. Model wybiera te technologie, które zapewnią minimalny koszt (cenę) energii przy spełnieniu ograniczeń dotyczących emisji i wykorzystaniu dostępnych paliw.

W przypadku krajowego sektora energetycznego istotną rolę odgrywają możliwości podaży węgla kamiennego. W modelu określono je na podstawie szczegółowych charakterystyk ilościowo-jakościowych, uwzględniających produkowane w kraju poszczególne klasy jakościowe węgla oraz uzupełnione o wykorzystanie technologii wzbogacania węgla.

Prawidłowe odwzorowanie funkcjonowania krajowego sektora energetycznego wymagało odpowiedniego skalibrowania modelu i przyjęcia szeregu założeń techniczno-ekonomicznych. W szczególności dotyczyło to określenia potencjalnych możliwości dostaw nośników energetycznych i ich prognoz cenowych, charakterystyk technologii produkcji energii elektrycznej i ciepła oraz technologii ochronnych, przyjęcia odpowiednich wskaźników jednostkowych kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń oraz prognozy popytu na energię elektryczną i ciepło. W szczególności w badaniach wykorzystano:

- ❖ dane dotyczące potencjalnych dostaw nośników energetycznych ze źródeł krajowych i importu oraz ich parametry jakościowe, które zaczerpnięto z oficjalnych sprawozdań statystycznych, dokumentów rządowych, ekspertyz branżowych i opinii autorskich,
- ❖ wielkości zasobów i możliwości wykorzystania surowców odnawialnych,
- ❖ prognozy cenowe nośników energetycznych — na podstawie publikowanych dokumentów rządowych i opracowań zagranicznych,
- ❖ charakterystyki technologii produkcyjnych i ochronnych — w oparciu o docelowe parametry techniczne, ekonomiczne i środowiskowe planowane do osiągnięcia w trakcie ich eksploatacji,
- ❖ wielkości jednostkowych kosztów zewnętrznych powodowanych emisją poszczególnych zanieczyszczeń gazowych — odpowiednie wielkości zaczerpnięto z wyników projektu ExternE-POL, którego jednym z wykonawców był IGSMiE PAN,
- ❖ popyt na energię elektryczną i ciepło, który oszacowano na podstawie rządowego dokumentu „Długoterminowa prognoza...” (2004) w scenariuszu odniesienia, zweryfikowanego przez autorów niniejszej pracy.

Całość obliczeń optymalizacyjnych wykonano w walucie krajowej o sile nabywczej z roku 2005. Okres obliczeniowy został podzielony na okresy jednoroczne — 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 i 2010 — oraz okresy pięcioletnie — 2011—2015, 2016—2020. Obliczenia prowadzono dla 8% stopy dyskontowej.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Szczegółowy opis wykorzystanych danych i przyjętych założeń można znaleźć w pracy Kudełko (2003).

## 2. Ekologiczne scenariusze rozwoju sektora energetycznego

Punktem wyjścia dla określenia i analizy ekologicznych scenariuszy rozwoju sektorów energetycznych jest wyjaśnienie terminu „**zawodność rynku**” (*market failure*). Terminem tym określamy wszelkie sytuacje, gdy równowaga kształtująca się na wolnych, nie będących przedmiotem regulacji rynkach (tzn. na rynkach nie poddanych bezpośredniej kontroli rządu — cenowej lub ilościowej) nie prowadzi do tzw. **efektywnej alokacji zasobów**. Ekonomiści zajmujący się problematyką z zakresu ekonomii dobrobytu podają trzy źródła tych zakłóceń: niedoskonałość konkurencji, preferencje społeczne oraz efekty zewnętrzne.

Istnienie **efektów zewnętrznych** jest jedną z podstawowych przesłanek usprawiedliwiających interwencję państwa w celu eliminacji zniekształceń rynkowych. Efekt zewnętrzny powstaje wtedy, kiedy decyzja jednostki o produkcji lub konsumpcji wywiera bezpośredni wpływ na produkcję lub konsumpcję innych osób inaczej niż za pośrednictwem cen rynkowych. Oprócz potencjalnych korzystnych efektów zewnętrznych istnieją również niekorzystne efekty zewnętrzne, powodowane przede wszystkim zanieczyszczeniem środowiska. Dlatego przyjmuje się, że nie poddany żadnym formom regulacji rynek nie jest wystarczającym regulatorem zakresu i intensywności wykorzystania różnych zasobów środowiska przyrodniczego.

Do najbardziej typowych obszarów, gdzie powstają zakłócenia rynkowe, należą sektory energetyczne. Co prawda prace badawcze z zakresu funkcjonowania sektorów energetycznych w coraz większym stopniu uwzględniają postulat planowania ich rozwoju w oparciu o uwarunkowania środowiskowe, jednak zadanie to wciąż napotyka na opór natury politycznej i społecznej. Zgodnie z tym postulatem planowanie ich rozwoju oparte powinno być na pełnym rachunku kosztowym, uwzględniającym zarówno bezpośrednie koszty budowy i eksploatacji urządzeń energetycznych, jak i monetarną wartość efektów zewnętrznych przez nich powodowanych. Efekty zewnętrzne definiowane są jako koszty zewnętrzne odzwierciedlające negatywne skutki oddziaływania sektorów energetycznych w określonych obszarach ich powstawania.

**Koszty zewnętrzne** powodowane przez sektory energetyczne odnoszą się do wszystkich negatywnych efektów związanych z technologiami wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, na wszystkich etapach technicznego procesu, jakimi są: budowa i zamknięcie elektrowni, wydobycie i transport surowców energetycznych oraz emisja zanieczyszczeń w trakcie produkcji energii końcowej (Friedrich i in. 1993). W tym ujęciu koszty zewnętrzne określone są dla całego łańcucha technologicznego, a nie tylko w wąskim znaczeniu wykorzystania paliw w procesie ich przetworzenia. Koszty zewnętrzne liczone w całym cyklu pozyskania, transportu i wykorzystania są specyficzne dla poszczególnych paliw energetycznych. Ich zakres obejmuje szkody powodowane w obszarze zdrowia ludzkiego (choroby zawodowe, śmierć), szkody w budynkach, materiałach, plonach rolnych, rybołówstwie, lasach, naturalnych ekosystemach, zmniejszonym komforcie życia w związku z lokalizacją urządzeń energetycznych itp.

Prace nad szacowaniem wielkości kosztów zewnętrznych powodowanych przez technologie energetyczne prowadzone były od początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku.

Ich celem było przede wszystkim zapewnienie solidnych podstaw empirycznych do wprowadzenia nowych regulacji środowiskowych, takich jak np. podatek węglowy (*carbon tax*). Do najważniejszych prac z dziedziny wartościowania kosztów zewnętrznych sektorów energetycznych należą m.in. projekty ExternE (European Commission 1995, 1998), studium prowadzone przez Departament Energii USA (External Costs of Fuel Cycles) (ORNL/RFF 1992) oraz studium realizowane dla Nowego Jorku (Rowe i in. 1995). Ich syntetyczna analiza dla różnych technologii energetycznych przeprowadzona została m.in. przez Sundqvista (2002) i Krewitta (1999, 2002).

Należy podkreślić, iż postulowana od dawna przez ekonomistów środowiskowych interwencja państwa jest w coraz większym stopniu wprowadzana jako skuteczny czynnik poprawy nieefektywności rynkowej. Stworzony i rozwijany system instrumentów prawnych i ekonomicznych tworzy podstawę realizacji postulatu oparcia cen produktów (energii finalnej) na pełnym koszcie społecznym ich wytworzenia. Zadanie to napotyka jednak na poważne trudności związane z zakresem tej interwencji. Po pierwsze, powinien on wynikać z założeń określających sposób funkcjonowania rynku oraz kryteriów podejmowania decyzji przez producentów i konsumentów. Dla różnych typów rynku, zazwyczaj w warunkach braku pełnej informacji o jego funkcjonowaniu, zakres takiej interwencji jest inny, a typ zastosowanego instrumentu może być odmienny. Po drugie, założenie że decyzje produkcyjne podejmowane są wyłącznie na bazie jasno sformułowanych preferencji jedynie w nielicznych przypadkach jest prawdziwe. Powoduje to dużą niepewność co do konieczności i zakresu interwencji państwowej, gdyż nie daje ona gwarancji osiągnięcia najlepszego z możliwych rozwiązań. W rezultacie niezbędny jest kompromis polegający na przyjęciu mniej ambitnych celów niż maksymalizacja dobrobytu społecznego. Oznacza to w praktyce wprowadzenie rozwiązania „drugiego po najlepszym” (*second best*), które pozwoliłoby przynajmniej na osiągnięcie kryterium efektywności kosztowej. Rozwiązanie to zazwyczaj jest prawnie i politycznie akceptowalne oraz nie powoduje skrajnie niekorzystnych skutków dystrybucyjnych.

W praktycznej realizacji tego zadania państwo dysponując systemem instrumentów ekonomicznych realizuje różnorodnie definiowane cele polityki środowiskowej. Instrumenty te, takie jak normy emisji, podatki ekologiczne czy system handlu pozwoleniami zbywalnymi, w większości przypadków umożliwiają osiągnięcie jedynie rozwiązania sub-optimalnego. Oznacza to, że słuszny skądinąd postulat prowadzenia skutecznej i efektywnej polityki środowiskowej w warstwie realizacyjnej bardzo się od siebie różni zakresem proponowanej interwencji. W skali globalnej przykładem tego mogą być rozbieżności w ocenie skutków i tempa realizacji polityki ochrony klimatu. W odniesieniu do polityki środowiskowej realizowanej na szczeblu europejskim czy krajowym można zauważyć ogromną rozbieżność co do rodzajów stosowanych instrumentów, jak i celów środowiskowych zawartych w różnorodnych regulacjach prawnych. W obu przypadkach mamy do czynienia z niepotrzebnym dublowaniem działań i środków, a brak koordynacji w zakresie prowadzenia spójnej polityki środowiskowej naraża podejmowane wysiłki na uzasadnioną krytykę.

Powyższe ogólne uwagi stanowiły podstawę dla szczegółowego określenia i analizy ekologicznych scenariuszy rozwoju krajowego sektora energetycznego. Są one rozpa-

trywane zarówno w swej warstwie postulatycznej, definiowanej w teorii ekonomii jako tzw. internalizacja kosztów zewnętrznych, jak i w warstwie praktycznej, określonej poprzez porozumienia, regulacje i przepisy emisyjne zawarte w odpowiednich dokumentach prawnych. W związku z powyższym, jak już wcześniej zaznaczono, istotne znaczenie ma sposób definiowania kryterium decyzyjnego, na podstawie którego można określać różnorodne scenariusze rozwoju sektora energetycznego. Z ekonomicznego punktu widzenia realizowany scenariusz rozwojowy powinien być jeden — oparty na kryterium efektywności ekonomicznej. Z przedstawionych wcześniej powodów w praktyce realizuje się (w większym lub mniejszym zakresie) scenariusze oparte są na węższej kategorii efektywności kosztowej. W tabeli 1 przedstawiono najważniejsze cechy charakteryzujące przyjęte w obliczeniach ekologiczne scenariusze rozwojowe krajowego sektora energetycznego.

TABELA 1. Charakterystyka ekologicznych scenariuszy rozwojowych

TABLE 1. The ecological scenarios characteristics

Cecha	Scenariusz ODN	Scenariusz EKO	Scenariusz EFEK
Typ modelu	liniowy	liniowy	nieliniowy
Kryterium optymalizacji	minimalizacja kosztów funkcjonowania sektora energetycznego	minimalizacja kosztów funkcjonowania sektora energetycznego	maksymalizacja nadwyżki konsumentów i producentów — koszty zewnętrzne
Popyt	zdeterminowany	zdeterminowany	wyliczany
Emisja	nielimitowana	limitowana	wyliczana
Koszty zewnętrzne	brak	brak	uwzględnione w pełnym zakresie (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> i pyły)

Źródło: opracowanie własne

W scenariuszu **ODN**, gdzie funkcją celu jest minimalizacja kosztów funkcjonowania systemu energetycznego (kryterium zakładające osiągnięcie efektywności kosztowej), popyt na energię elektryczną i ciepło jest zdeterminowany. Rozwiązaniem modelu jest optymalna struktura produkcji energii w poszczególnych technologiach produkcyjnych i ochronnych. Funkcja celu nie zawiera składnika kosztów zewnętrznych, choć ich wartość jest wyliczana. Scenariusz ODN określa warunki rozwoju krajowego sektora energetycznego przy braku obowiązywania jakichkolwiek regulacji i przepisów środowiskowych.

Scenariusz **EKO** różni się od poprzedniego tym, iż przewiduje rozwój krajowego sektora energetycznego przy spełnieniu krajowych i europejskich regulacji środowiskowych, w tym: globalnych limitów emisji SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, wynikających z zapisów Traktatu Akcesyjnego, obiektowej Dyrektywy LCP, limitów emisji CO<sub>2</sub> dla elektroenergetyki zawodowej,

zawartych w dyrektywie o handlu pozwoleniami zbywalnymi, oraz limitów określających ilość produkcji energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych<sup>3</sup>.

W scenariuszu **EFEK**, zakładającym osiągnięcie kryterium efektywności ekonomicznej, popyt na energię elektryczną i ciepło jest wyliczany w oparciu o kryterium maksymalizacji dobrobytu społecznego, definiowanego dla pojedynczego rynku energii. Funkcją celu jest zatem maksymalizacja nadwyżki konsumentów i producentów, pomniejszona o monetarną wartość kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych. Emisja zanieczyszczeń nie jest limitowana, lecz jest wyliczana w modelu. Wyniki obliczeń otrzymane dla tego scenariusza umożliwiają weryfikację dotychczasowych prognoz popytu na energię, wyznaczają optymalny zakres produkcji, a tym samym emisji zanieczyszczeń, pozwalają na określenie bezpośrednich i społecznych kosztów produkcji energii. Określają także optymalną strukturę produkcji energii, wskazując możliwość szerszego wprowadzenia dotychczas słabo wykorzystywanych alternatywnych źródeł produkcji energii (np. energii odnawialnej czy technologii gazowych).

Bardzo ważnym parametrem wpływającym na wyniki obliczeń w tym scenariuszu jest wysokość kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych. Przypisano je dla poszczególnych rodzajów emitowanych zanieczyszczeń gazowych, a odpowiednie wskaźniki zaczerpnięto z projektu ExternE (European Commission 1998). Punktem wyjścia były następujące wysokości jednostkowych kosztów zewnętrznych: SO<sub>2</sub> — 6000 Euro/Mg, NO<sub>x</sub> — 5000 Euro/Mg i pył — 13 000 Euro/Mg. Są to wielkości średnie wyliczone dla 15 krajów Unii Europejskiej. Dla warunków krajowych przeliczono podane wartości współczynnikiem korekcyjnym równym 0,38, określającym stosunek PKB Polski i krajów UE (Radowic 2002). Po przyjęciu kursu walutowego na poziomie 4 zł/Euro jednostkowe koszty zewnętrzne wynoszą: SO<sub>2</sub> — 9120 zł/Mg, NO<sub>x</sub> — 7600 zł/Mg, pył — 19 760 zł/Mg.

W przypadku emisji CO<sub>2</sub> charakterystyczny jest bardzo duży rozrzut wysokości kosztów zewnętrznych związanych z globalnym ociepleniem. Wyniki prac realizowanych przez zagraniczne zespoły badawcze są zróżnicowane zarówno w odniesieniu do przedziału podawanych wartości, jak i zakresu czasowego powstających strat. Dla porównania, w badaniach prowadzonych w ramach projektu ExternE przyjmowano wysokości kosztów zewnętrznych na poziomie 3, 8, 18, 46 i 139 USD/Mg CO<sub>2</sub> (Krewitt 2002). Z kolei w badaniach przeprowadzonych przez Frankhausera (1994), uważanych za jedne z najbardziej wiarygodnych, wysokość kosztów zewnętrznych szacowana jest na około 20 USD/Mg C, czyli około 5,5 USD/Mg CO<sub>2</sub>. W prezentowanej pracy wybrano wielkość 8 USD/Mg CO<sub>2</sub> (ok. 32 zł/Mg), czyli nieco większą niż u Frankhausera, lecz mieszczącą się w niskim przedziale wartości przyjmowanych w projekcie ExternE.

---

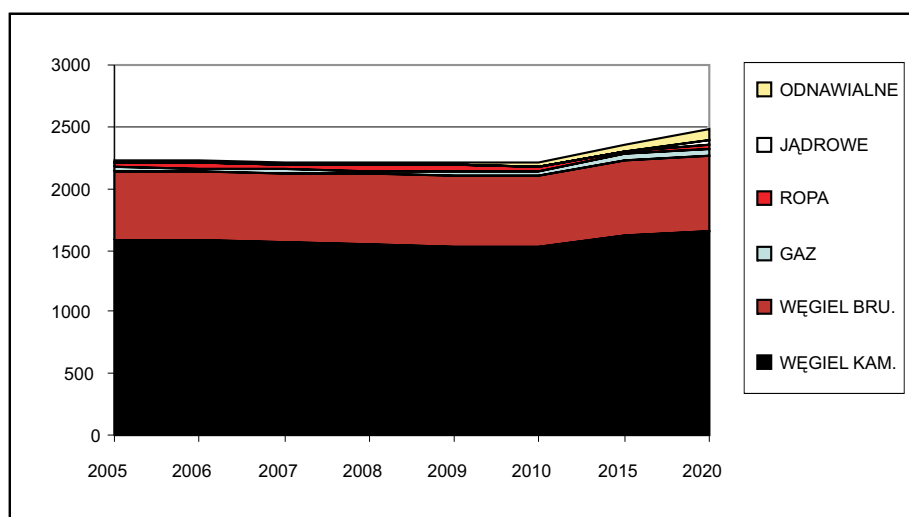
<sup>3</sup> Limity globalnej emisji zawarte w Traktacie Akcesyjnym dotyczące energetyki zawodowej: SO<sub>2</sub>: 2008 — 454 tys. ton, 2010 — 426 tys. ton, 2012 — 358 tys. ton; NO<sub>x</sub> — 2008 — 254 tys. ton, 2010 — 251 tys. ton, 2012 — 239 tys. ton. Limity emisji CO<sub>2</sub> wynikające z dyrektywy o handlu pozwoleniami zbywalnymi (tylko dla energetyki zawodowej): 2005 — 156 200 tys. ton, 2006 — 160 400 tys. ton, 2007 — 164 800 tys. ton. Limity określające ilość produkcji energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych: 2006 — 3,6%, 2007 — 4,3%, 2008 — 5,4%, 2009 — 7,0%, 2010 — 9,0%.



### 3. Wyniki

Prezentowane wyniki obliczeń modelowych obejmują sferę technologiczną, środowiskową oraz ekonomiczną analizowanych scenariuszy rozwojowych krajowego sektora energetycznego. Sfera technologiczna obejmuje analizę zmian technologii produkcji energii elektrycznej i ciepła oraz zużycia paliw. Obszar środowiskowy łączy się z problematyką redukcji emisji gazów powstających podczas ich spalania. Sfera ekonomiczna obejmuje natomiast analizę kosztów bieżących i inwestycyjnych związanych z realizacją przyjętych scenariuszy rozwojowych. Badane są także skutki ekonomiczne w postaci wzrostu jednostkowych kosztów produkcji energii elektrycznej i ciepła, a także wysokość kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń.

Gdyby przyjąć, że żadne regulacje środowiskowe nie obowiązywałyby sektora wytwarzania energii elektrycznej i ciepła (scenariusz ODN), można wówczas zaobserwować stabilizację, a po 2010 roku nawet wzrost zużycia węgla kamiennego (rys. 1). Wiąże się to



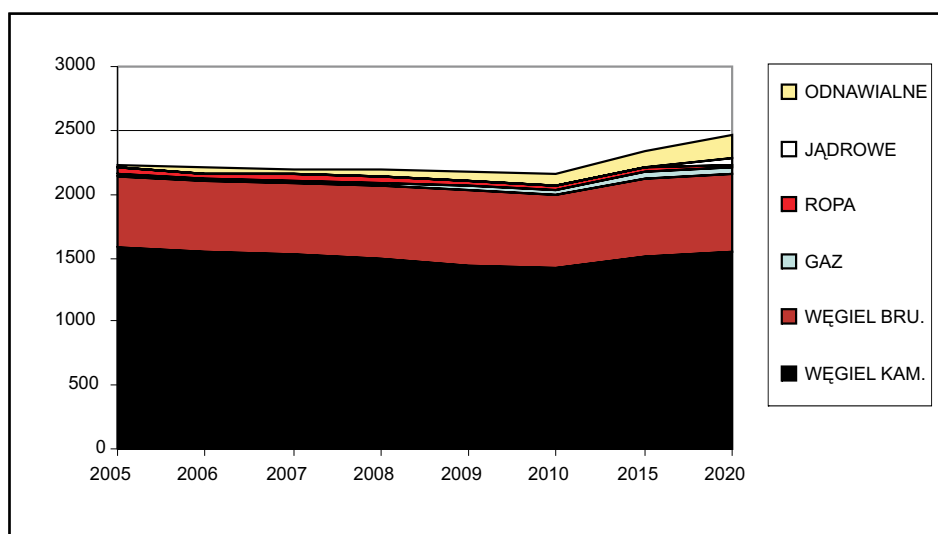
Rys. 1. Zużycie paliw energetycznych do produkcji energii elektrycznej i ciepła — scenariusz ODN [PJ/rok]

Fig. 1. Fuel consumption for heat and energy production — ODN scenario [PJ/year]

z tym, iż technologie energetyczne oparte na tym nośniku są wysoce konkurencyjne pod względem kosztów produkcji w stosunku do pozostałych technologii. Brak regulacji środowiskowych jest zatem powodem wysokiego zużycia węgla kamiennego. Ten sam wniosek dotyczy także technologii opartych na węglu brunatnym. Technologie gazowe są wykorzystywane w ograniczonym zakresie, a wzrost zużycia gazu ziemnego spowodowany jest koniecznością modernizacji dotychczasowych technologii węglowych i wyposażenia ich w turbiny gazowe. Olej opałowy używany jest głównie jako paliwo uzupełniające dla

tradycyjnych technologii węglowych i nie są przewidywane żadne nowe inwestycje wykorzystujące ten nośnik energetyczny. Na skutek kurczących się zasobów krajowego węgla kamiennego i konieczności zbilansowania zwiększonego popytu na energię elektryczną w 2020 roku może zająć potrzeba budowa elektrowni atomowej. Technologie wykorzystujące energię odnawialną (w tym elektrownie wodne, wiatrowe, ciepłownie wykorzystujące biomasę czy energię geotermalną oraz kolektory słoneczne) są stopniowo wprowadzane, lecz ich dynamika jest ograniczona ich stosunkowo wysokimi kosztami.

W scenariuszu EKO tradycyjne nośniki energetyczne, jak węgiel kamienny i brunatny, zachowują swoją dominującą pozycję w bilansie produkcji energii elektrycznej i ciepła, przy czym stopniowo maleje znaczenie węgla kamiennego. Są to jak na razie technologie na tyle konkurencyjne, że wypierają droższe, np. oparte na gazie. Obowiązujące w tym scenariuszu restrykcyjne limity emisyjne możliwe są do osiągnięcia poprzez modernizację technologii istniejących, współspalanie biomasy oraz budowę instalacji odsiarczania w tych elektrowniach, które dotychczas nie były w nie wyposażone. W celu dotrzymania bardzo restrykcyjnych limitów określających wielkość produkcji energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych konieczne są także nowe inwestycje (turbiny wiatrowe, współspalanie biomasy). Podobnie jak w scenariuszu ODN w celu zbilansowania popytu na energię elektryczną konieczna może być budowa elektrowni jądrowej.



Rys. 2. Zużycie paliw energetycznych do produkcji energii elektrycznej i ciepła — scenariusz EKO [PJ/rok]

Fig. 2. Fuel consumption for heat and energy production — EKO scenario [PJ/year]

W poniższych tabelach przedstawiono szacunki wielkości produkcji energii elektrycznej w energetyce zawodowej i przemysłowej dla obydwu scenariuszy. Zgodnie z przyjętymi założeniami dotyczącymi popytu na energię elektryczną, który określono na podstawie rządowego dokumentu „Długoterminowa prognoza...” (2004) w scenariuszu odniesienia (zmodyfikowanych przez autorów niniejszego artykułu), produkcja energii elektrycznej do

2010 roku utrzyma się na ustabilizowanym poziomie około 154—158 TW·h rocznie, po czym będzie wrosnąć do 201 TW·h w 2020 roku. Brak regulacji środowiskowych (scenariusz ODN) powoduje, że w strukturze produkcji najprawdopodobniej dominowałyby tradycyjne węglowe technologie energetyczne, wymagające jedynie zwykłej modernizacji podstawowej lub w ograniczonym stopniu wprowadzenia turbin gazowych. Tam gdzie modernizacja jest niewystarczająca lub niemożliwa, spodziewane byłyby także nowe inwestycje (nowe kotły węglowe). Technologie odnawialne i biomasa byłyby wykorzystywane w ograniczonym zakresie. Natomiast w scenariuszu EKO efektywne kosztowo i pozwalające na osiągnięcie wysokich limitów produkcji energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych jest przede wszystkim współspalanie biomasy. Zdecydowanie rośnie także produkcja energii pochodząca z elektrowni wiatrowych. Technologie gazowe są tutaj wypierane na rzecz źródeł odnawialnych. Z tego samego powodu nowoczesne technologie węglowe (np. układy parowo-gazowe ze zgazowaniem węgla) nie są tu opcją konkurencyjną.

TABELA 2. Wielkość produkcji energii elektrycznej w energetyce zawodowej i przemysłowej [TW·h/rok]

TABLE 2. Electricity production in public and industrial power plants [TW·h/year]

Technologia	Scenariusz ODN								Scenariusz EKO							
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2015	2020	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2015	2020
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
EZ_WK_I	65	63	60	57	54	52	39	26	65	59	59	57	53	51	39	26
EZ_WK_M_P	4	7	9	11	13	16	33	48	4	4	4	4	4	4	28	42
EZ_WK_M_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_WK_M_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_WK_M_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	6	6
EZ_WB_I	53	51	49	47	45	43	32	21	53	48	48	47	45	43	32	21
EZ_WB_M_P	0	2	4	8	12	14	26	37	0	0	0	0	0	0	0	4
EZ_WB_M_T	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_WB_M_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_WB_M_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	8	12	14	26	34
EZ_WOD_I	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
EZ_WK_N	0	0	1	1	1	1	14	24	0	0	0	0	0	0	4	13
EZ_WB_N	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	2	2
EZ_PGK_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_PGB_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_TG_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_PG_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EZ_JAD_N	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12
EZ_WOD_N	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3
EZ_WIA_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	4	6	9	9	10
EC_WK_I	19	18	18	17	16	15	11	8	19	18	18	17	16	15	11	8

TAB. 2 cd.

TAB. 2 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
EC_WK_M_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC_WK_M_T	1	2	2	2	2	2	2	5	0	0	0	0	0	0	0	3
EC_WK_M_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC_WK_M_B	0	1	1	2	3	3	7	9	0	1	2	3	3	4	7	9
EC_WK_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC_TG_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC_PG_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC_OL_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EP	8	8		7	7	6	6	5	8	8	8	7	7	6	6	5
<b>Suma</b>	<b>154</b>	<b>156</b>	<b>156</b>	<b>156</b>	<b>157</b>	<b>158</b>	<b>177</b>	<b>201</b>	<b>154</b>	<b>156</b>	<b>156</b>	<b>156</b>	<b>157</b>	<b>158</b>	<b>177</b>	<b>201</b>

Oznaczenia:

## \* Elektrownie zawodowe

- EZ\_WK\_I Elektrownie na węgiel kamienny istniejące — przedłużenie życia
- EZ\_WK\_M\_P Elektrownie na węgiel kamienny modernizowane — modernizacja podstawowa
- EZ\_WK\_M\_T Elektrownie na węgiel kamienny modernizowane — modernizacja podstawowa + turbina gazowa
- EZ\_WK\_M\_F Elektrownie na węgiel kamienny modernizowane — kotły fluidalne
- EZ\_WK\_M\_B Elektrownie na węgiel kamienny modernizowane — biomasa
- EZ\_WB\_I Elektrownie na węgiel brunatny istniejące — przedłużenie życia
- EZ\_WB\_M\_P Elektrownie na węgiel brunatny modernizowane — modernizacja podstawowa
- EZ\_WB\_M\_T Elektrownie na węgiel brunatny modernizowane — modernizacja podstawowa + turbina gazowa
- EZ\_WB\_M\_F Elektrownie na węgiel brunatny modernizowane — kotły fluidalne
- EZ\_WB\_M\_B Elektrownie na węgiel brunatny modernizowane — biomasa
- EZ\_WOD\_I Elektrownie wodne zawodowe istniejące
- EZ\_WK\_N Elektrownie na węgiel kamienny nowe
- EZ\_WB\_N Elektrownie na węgiel brunatny nowe
- EZ\_PGK\_N Układy parowo-gazowe ze zgazowaniem węgla kamiennego nowe
- EZ\_PGB\_N Układy parowo-gazowe ze zgazowaniem węgla brunatnego nowe
- EZ\_TG\_N Turbiny gazowe nowe
- EZ\_PG\_N Układy parowo-gazowe na gaz ziemny nowe
- EZ\_JAD\_N Elektrownie jądrowe nowe
- EZ\_WOD\_N Elektrownie wodne nowe
- EZ\_WIA\_N Elektrownie wiatrowe nowe

## \* Elektrociepłownie zawodowe

- EC\_WK\_I Elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny istniejące — przedłużenie życia
- EC\_WK\_M\_P Elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny modernizowane — modernizacja podstawowa
- EC\_WK\_M\_T Elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny modernizowane — modernizacja podstawowa + turbina gazowa
- EC\_WK\_M\_F Elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny modernizowane — kotły fluidalne
- EC\_WK\_M\_B Elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny modernizowane — biomasa
- EC\_WK\_N Elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny nowe
- EC\_TG\_N Turbiny gazowe nowe
- EC\_PG\_N Układy parowo-gazowe na gaz ziemny nowe
- EC\_OL\_N Elektrociepłownie zawodowe na olej opalowy nowe

## \* Elektrociepłownie przemysłowe

- EP Elektrociepłownie przemysłowe na węgiel kamienny istniejące — przedłużenie życia

Zmiany struktury zużycia paliw w energetyce mają swoje konsekwencje w postaci zmian emisji poszczególnych polutantów. Prognozowane łączne poziomy emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, pyłów i CO<sub>2</sub> przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3. Wielkość emisji zanieczyszczeń gazowych w energetyce [tys. ton]

TABLE 3. Emissions of pollutants in energy sector [thous. tons]

Rodzaj zanieczyszczenia	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2015	2020
Scenariusz ODN								
SO <sub>2</sub>	1 256	1 245	1 229	1 221	1 216	1 211	1 173	1 112
NO <sub>x</sub>	482	476	470	466	463	462	456	438
CO <sub>2</sub>	205 193	204 443	203 406	202 843	202 694	202 522	212 692	215 294
Pył	422	411	401	393	388	384	351	310
Scenariusz EKO								
SO <sub>2</sub>	1256	1214	1198	982	959	939	810	741
NO <sub>x</sub>	482	466	459	451	440	433	427	402
CO <sub>2</sub>	204 740	201 186	199 597	197 885	195 236	192 599	203 019	204 610
Pył	423	408	398	390	384	381	349	308

Uwaga:

W tabeli podano łączną emisję zanieczyszczeń gazowych emitowanych przez energetykę zawodową, przemysłową i ciepłownię przemysłowe i komunalne.

W odniesieniu do emisji SO<sub>2</sub> najbardziej restrykcyjny jest scenariusz EKO, w którym zachodzi konieczność dostosowania się do globalnych limitów określonych w Traktacie Akcesyjnym. Dlatego emisja tego gazu jest najmniejsza wśród rozpatrywanych scenariuszy. Jeśli chodzi o emisję NO<sub>x</sub> należy zauważyć, że bez względu na typ scenariusza maleje ona zgodnie ze zmianą struktury zużycia paliw. Z uwagi na wysokie koszty technologii redukcji emisji NO<sub>x</sub> można powiedzieć, że jest to podstawowy czynnik powodujący spadek emisji tego gazu. W odniesieniu do emisji CO<sub>2</sub> należy zauważyć, że brak jakichkolwiek regulacji (scenariusz ODN) powoduje zwiększenie emisji tego gazu w 2020 roku o około 5% w porównaniu z rokiem 2005. Scenariusz EKO wymusza stabilizację emisji w 2020 roku na poziomie 204 mln ton, przy czym kluczową rolę odgrywają tutaj przepisy dotyczące emisji SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Mniejsze znaczenie mają globalne limity emisji CO<sub>2</sub>. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym presję na obniżkę emisji CO<sub>2</sub> jest narzucony przepisami limit produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, w tym głównie biomasy (o praktycznie zerowym współczynniku emisji CO<sub>2</sub>).

W tabeli 3 przedstawiono najważniejsze wskaźniki produkcyjne i ekonomiczne obu scenariuszy. Ich realizacja powoduje wzrost kosztów produkcji, tj. kosztów modernizacji

istniejących technologii energetycznych, kosztów inwestycyjnych nowych technologii energetycznych i ochronnych, kosztów zmiany paliw energetycznych i innych wydatków związane z dokonywanymi zmianami produkcyjnymi. W przypadku obu scenariuszy można zaobserwować stopniowy wzrost jednostkowych i całkowitych kosztów produkcji energii elektrycznej i ciepła, co jest związane z konieczną modernizacją technologii energetycznych oraz nowymi inwestycjami produkcyjnymi i ochronnymi, przy czym scenariusz EKO cechuje się większą dynamiką tych zmian. W tabeli, w celach informacyjnych, podano także wartość kosztów zewnętrznych związanych z emisją zanieczyszczeń. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż są one tego samego rzędu co koszty produkcji. Zatem ewentualna ich internalizacja w cenie energii powinna spowodować około dwukrotny jej wzrost w porównaniu z obecnym poziomem.

TABELA 4. Wskaźniki produkcyjno-ekonomiczne

TABLE 4. Technical and economical indicators

Wyszczególnienie	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2015	2020
Scenariusz ODN								
Produkcja energii elektr. [TW·h]	154	156	156	156	157	158	177	201
Produkcja ciepła [PJ]	571	567	557	553	550	552	552	549
Koszt jedn. prod. en. elektr. [zł/MWh]	113	114	115	115	118	121	130	138
Koszt jedn. prod. ciepła [zł/GJ]	21	21	22	22	23	24	26	28
Całkowite koszty produkcji [mln zł]	29 352	29 667	29 868	30 115	30 998	32 067	37 136	43 133
Koszty zewnętrzne [mln zł]	32 965	32 669	32 322	32 094	31 973	31 864	31 912	31 041
Scenariusz EKO								
Produkcja energii elektr. [TW·h]	154	156	156	156	157	158	177	201
Produkcja ciepła [PJ]	571	567	557	553	550	552	552	549
Koszt jedn. prod. en. elektr. [zł/MWh]	114	120	120	123	126	131	137	145
Koszt jedn. prod. ciepła [zł/GJ]	21	21	21	22	23	24	26	28
Całkowite koszty produkcji [mln zł]	29 530	30 558	30 657	31 250	32 278	33 559	38 262	44 323
Koszty zewnętrzne [mln zł]	32 930	32 079	31 681	29 454	28 963	28 517	27 754	26 714

Nieuwzględnienie, z różnych względów, kosztów zewnętrznych w decyzjach produkcyjnych przedsiębiorstw oznacza, że przedsiębiorstwa opierają swoje decyzje produkcyjne jedynie na kosztach prywatnych. Ich internalizacja znacząco zwiększa poziom osiąganego dobrobytu społecznego, przy czym im jest pełniejsza, tym ten wzrost jest większy.

Świadczą o tym wyniki obliczeń przeprowadzone dla scenariusza EFEK<sup>4</sup>. Na skutek drastycznego wzrostu ceny energii możliwa jest stosunkowo silna reakcja popytowa. Prawdopodobny jest zatem kilkuprocentowy spadek produkcji energii elektrycznej i ciepłej w porównaniu z poprzednimi scenariuszami. Spadek ten należy traktować w kategoriach jednej z możliwych, ale skutecznych opcji realizacji strategii dostosowawczej związanej z włączeniem kosztów zewnętrznych do rachunku kosztów społecznych.

Ponadto konieczne są także istotne zmiany struktury wykorzystania paliw energetycznych. Zdecydowanie maleje rola węgla kamiennego, do tej pory podstawowego nośnika energetycznego kraju. Prognozowany spadek jego zużycia w porównaniu ze scenariuszami ODN i EKO mieści się w granicach 36-51%. Charakterystyczne jest, iż w przypadku węgla brunatnego ten niżkowy trend nie występuje, a produkcja energii z węgla brunatnego jest utrzymywana na niezmiennym poziomie około 200 PJ rocznie. Decydujące znaczenie odgrywają tu stosunkowo niskie koszty produkcji w elektrowniach opartych na węglu brunatnym, co skutkuje maksymalnym wykorzystaniem ich mocy produkcyjnych.

Jedną z możliwych alternatyw dla węgla kamiennego i brunatnego jest większe wykorzystanie gazu ziemnego. Jego znaczenie w bilansie energetycznym w tym scenariuszu zdecydowanie rośnie. Niska emisja zanieczyszczeń, w tym głównie CO<sub>2</sub>, decyduje o tak dużym wzroście znaczenia gazu ziemnego w bilansie energetycznym kraju. Ponadto technologie oparte na energii odnawialnej są także szeroko wykorzystywane, praktycznie na granicy ich możliwości produkcyjnych. Dotyczy to szczególnie energii geotermalnej, wiatrowej i biomasy, które stanowią realną konkurencję do pozostałych nośników energetycznych. Ich rola w bilansie energetycznym kraju rośnie z około 16 PJ w 2002 roku do 154 PJ w 2020 roku. Tak duże znaczenie energii odnawialnej spowodowane jest minimalnym wpływem na środowisko technologii produkcyjnych wykorzystujących ten rodzaj energii. Również energetyka jądrowa może wypierać dotychczasowe technologie, oparte głównie na węglu kamiennym. Choć, jak wynika z obliczeń, nie powinien to być dominujący kierunek rozwoju energetyki, udział energii elektrycznej z technologii jądrowych może w 2020 roku być znaczący.

Inwestycje ochronne (instalacje odsiarczania i odazotowywania spalin) realizowane są tutaj na bardzo dużą skalę. Uwzględniając fakt, iż jednostkowe koszty redukcji emisji zanieczyszczeń są mniejsze niż jednostkowe koszty zewnętrzne, strategia redukcji emisji zanieczyszczeń u źródła ich powstawania jest ekonomicznie uzasadniona. Jest to także kluczowa kwestia wpływająca na taką, a nie inną strukturę wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Przyjęte w obliczeniach bardzo duże wysokości jednostkowych kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych wymuszają przede wszystkim wybór technologii bezemisyjnych. Przeprowadzona analiza czułości wskazała jednak, że obniżenie tych kosztów w poważnym stopniu zwiększa konkurencję tradycyjnych nośników energii<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu nie przedstawiono tu szczegółowych wyników przyjęcia takiej opcji rozwoju krajowego sektora energetycznego, wskazano jedynie możliwe skutki popytowe, strukturalne i ekonomiczne internalizacji kosztów zewnętrznych.

<sup>5</sup> Problematyka szacowania kosztów zewnętrznych sektorów energetycznych jest przedstawiona w pracach Kudelko (2003, 2005) oraz pracach niepublikowanych autorów niniejszego artykułu.

Zmniejszenie popytu na energię, obniżenie znaczenia paliw stałych oraz bardzo duży zakres inwestycji ochronnych powodują obniżkę poziomu emisji zanieczyszczeń pochodzących z krajowego systemu energetycznego. W tym scenariuszu rozwoju przewidywana jest kilkukrotna obniżka emisji zanieczyszczeń gazowych (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i pyły) w porównaniu z dotychczasowym trendem. Zakres redukcji emisji CO<sub>2</sub> jest nieco mniejszy, co wynika z braku alternatywnych — poza zmianą struktury zużycia paliw — i efektywnych kosztowo technologii redukcji emisji.

Jeśli chodzi o skutki ekonomiczne realizacji tego scenariusza radykalnie zmniejsza się wysokość kosztów zewnętrznych. W całościowym rachunku ekonomicznym dobrobyt społeczny zwiększa się o około 19% w porównaniu ze scenariuszem ODN. Z ekonomicznego punktu widzenia internalizacja kosztów zewnętrznych w cenach energii jest więc w pełni uzasadniona.

## Podsumowanie

Rola i znaczenie krajowego sektora energetycznego oraz jego zakres oddziaływania na otoczenie środowiskowe i gospodarcze tworzą warunki dla wypracowania podstaw funkcjonowania tego sektora gospodarki zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. W przeszłości badania nad systemami energetycznymi skupiały się przede wszystkim na planowaniu ich długoterminowego rozwoju w oparciu o krajowe możliwości techniczne, paliwowe i ekonomiczne; problemy środowiskowe były w zasadzie pomijane. Obecnie problematyka zrównoważonego rozwoju systemów energetycznych jest kwestią pierwszoplanową w tego typu badaniach. Podstawowym zadaniem, przed jakim stoi ich rozwój, jest dostosowanie się do aktualnych i przyszłych programów środowiskowych, opartych zarówno na krajowych, jak i międzynarodowych regulacjach emisyjnych. Jak wynika z przeprowadzonych do tej pory analiz przepisy te, wzbudzające tak wiele kontrowersji wśród zobligowanych do ich wypełnienia przedsiębiorstw, mają jednak swoje uzasadnienie, co zostało m.in. udowodnione w niniejszym artykule. Ich spełnienie wymaga co prawda wydatkowania bardzo dużych środków finansowych, jednak w dłuższej perspektywie społeczeństwo jako całość zyskuje na tego rodzaju rozwiązaniach.

Należy podkreślić, że wysoki poziom kosztów zewnętrznych powodowanych emisją zanieczyszczeń gazowych całkowicie uzasadnia podejmowanie przez energetykę działań zmierzających do ich eliminacji. Wydaje się więc celowym i ekonomicznie uzasadnionym wprowadzenie powszechnego obowiązku spełnienia przez elektrownie bardzo restrykcyjnych norm lub obowiązku ich wyposażenia w instalacje redukujące emisje. Procesy tego rodzaju można zresztą już od wielu lat zaobserwować w krajowej energetyce, gdzie istnieje coraz mniej obszarów działalności produkcyjnej nie poddanej żadnym regulacjom ekologicznym. Przepisy te pozwalają także na większe niż do tej pory wykorzystanie źródeł odnawialnych, stanowiących do tej pory jedynie ułamek produkcji energii elektrycznej i ciepłej. Uwzględnienie środowiskowych i pozaśrodkowych skutków funkcjonowania sektora energetycznego jest zatem niezbędnym warunkiem do wypracowania zasad



służących realizacji polityki energetycznej kraju, realizowanej w warunkach rozwoju zrównoważonego.

## Literatura

- Długoterminowa prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię, 2004, ARE S.A., Warszawa.
- European Commission, 1995 — ExternE — externalities of energy vol. 1: Summary, Directorate-General XII, European Commission.
- European Commission, 1998 — Newsletter of the EC study on the externalities of energy, <http://externe.jrc.es/nletter6.html>.
- FRANKHAUSER S., 1994 — The social costs of greenhouse gas emissions: An expected value approach. *The Energy Journal* 15, no. 2, IAEE Publications, Ohio.
- FRIEDRICH R., VOSS A., 1993 — External costs of electricity generation. *Energy Policy* vol. 21, no. 2, Elsevier Science, Amsterdam.
- KAMIŃSKI J., KUDEŁKO M., KWIATKOWSKI M., SUWAŁA W., WAWRZYSZCZUK M., 2002 — Bilansowanie dostaw węgla dla potrzeb długoterminowego planowania rozwoju wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. *Sympozja i Konferencje nr 57*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Kategoria i wycena kosztów zewnętrznych sektora paliwowo-energetycznego — część I. IGSMiE PAN, Kraków 2002. Autorzy: Suwała W., Kudelko M., Kamiński J (praca niepubl.).
- KREWITT W., 2002 — External costs of energy — do the answers match the questions? Looking back at 10 years of ExternE, *Energy Policy* vol. 30, no. 10, Elsevier Science, Amsterdam.
- KREWITT W., HECK T., TRUKENMULLER A., FRIEDRICH R., 1999 — Environmental damage costs from fossil electricity generation in Germany and Europe. *Energy Policy* vol. 27, no. 3, Elsevier Science, Amsterdam.
- KUDEŁKO M., 2000 — Model oceny funkcjonowania instrumentów zarządzania procesami redukcji emisji dwutlenku siarki w elektroenergetyce. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 72*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KUDEŁKO M., 2003 — Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie energetycznym. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 121*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KUDEŁKO M., 2004 — Proekologiczny model decyzyjny przedsiębiorstwa pozyskiwania surowców skalnych — cz. 1. *Ekonomia i Środowisko nr 2(26)*, Białystok.
- KUDEŁKO M., 2005 — Efektywność alokacyjna przy występowaniu kosztów zewnętrznych — model równowagi cząstkowej krajowego sektora energetycznego, *Polityka Energetyczna t. 8, z. 1*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KUDEŁKO M., 2003 — Koszty zewnętrzne systemów energetycznych. *Polityka Energetyczna t. 6, z. spec.*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KUDEŁKO M., SUWAŁA W., KAMIŃSKI J., 2001 — Optymalizacja sprzedaży węgla w spółce węglowej. *Przeg. Górn. nr 10*, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Katowice.
- KUDEŁKO M., 2005 — Znaczenie analizy systemowej w prognozowaniu rozwoju systemów paliwowo-energetycznych. *Polityka Energetyczna t. 8, z. spec.*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- ORNL/RFF, 1992, U.S. — EC fuel cycle study: background document to the approach and issues. Report prepared by Oak Ridge National Laboratory and Resources For The Future. ORNL/M-2500, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831.

- RADOWIC U., 2002 — Uproszczona metodyka szacowania kosztów zewnętrznych w wyniku emisji zanieczyszczeń powietrza związanych z wytwarzaniem energii elektrycznej. Sympozja i Konferencje nr 57, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- ROWE R.D., CHESTNUT L.G., LANG C.M., BERNOW S.S., WHITE D.E., 1995 — The New York environmental externalities cost study: summary of approach and results. IEA, OECD workshop on the External Costs of Energy, Brussels.
- SUNDQVIST T., 2002 — Explaining the Disparity of Electricity Externality Estimates. 25th Annual IAEE International Conference, University of Aberdeen.
- SUWAŁA W., 1995 — Badania modelowe perspektyw górnictwa i rynku węgla kamiennego w Polsce. Studia, Rozprawy, Monografie nr 38, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- SUWAŁA W., KUDEŁKO M., KAMIŃSKI J., 2001 — Zastosowanie modeli komputerowych w gospodarce paliwowo-energetycznej. Konferencja Naukowa „Paliwa i energia dziś i jutro”, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- SUWAŁA W., KUDEŁKO M., KAMIŃSKI J., 2002 — Model zarządzania sprzedażą węgla w przedsiębiorstwie górnictwem. Sympozja i Konferencje nr 54, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- SUWAŁA W., KUDEŁKO M., KAMIŃSKI J., 2004 — Modelowanie rozwoju technologii czystego węgla. Polityka Energetyczna t. 7, z. spec., Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- SUWAŁA W., KUDEŁKO M., KAMIŃSKI J., 2005 — Modelling clean fossil fuels technologies deployment., Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- SZTABA K.S., BLASCHKE Z., TUMIDAJSKI T., GAWĘDA T., SUWAŁA W., KAMIŃSKI J., KUDEŁKO M., 2004 — Model ekologicznego i ekonomicznego prognozowania wydobycia i użytkowania czystego węgla. [W]: Tom 1: Bazy i prognozy gospodarki surowcami mineralnymi i energetycznymi oraz strategię i kierunki rozwoju sektora paliwowo-energetycznego. Praca zbiorowa pod redakcją J. Sablika, Wyd. Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice.

Wojciech SUWAŁA, Mariusz KUDEŁKO, Jacek KAMIŃSKI

## The ecological scenarios of Polish energy sector development

### Abstract

The subject of the paper is the application of system analysis in modelling of economic processes of fuels and energy sectors. The paper presents computer models developed in the Division of Energy and Environmental Policy of Mineral and Energy Economy Research Institute and their application in the decision making processes. The implementation of environmental regulations, both domestic and EU, and their impact on the Polish energy and fuels supplies sectors were studied. The external costs estimations were also applied in the model to find the socially optimal structure of energy production.

KEY WORDS: mathematical modelling, energy sector, ecological development scenarios