

Wojciech SUWAŁA\*

## Perspektywy technologii węglowych w energetyce w warunkach ograniczenia emisji dwutlenku węgla

**STRESZCZENIE.** Polityka klimatyczna UE, przede wszystkim problem obniżenia emisji dwutlenku węgla ma zasadnicze znaczenie dla kraju takiego jak Polska, gdzie 95% energii elektrycznej jest wytwarzane z węgla kamiennego i brunatnego. Artykuł podejmuje problem redukcji emisji dwutlenku węgla w elektroenergetyce polskiej w warunkach wprowadzenia podatku węglowego. Odpowiada to sytuacji zakupu całości pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub> na aukcjach lub innych systemach, bez darmowego przydziału administracyjnego. System taki, według opinii ekonomistów, jest najbardziej efektywny i sprawiedliwy, unika się zawsze budzących protesty decyzji administracyjnych. Na podstawie badań modelowych określono strukturę paliwowa produkcji energii dla różnych poziomów cen pozwoleń. Dane posłużyły ponadto do dekompozycji redukcji emisji o oceny ilościowe wpływu najważniejszych czynników: technologii, efektywności przetwarzania i popytu. Ta ostatnia analiza pomaga określić efektywność różnych narzędzi polityki energetycznej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** energetyka węglowa, redukcja emisji CO<sub>2</sub>, ekonomika energii, modelowanie, dekompozycja

---

\* Dr hab. inż., prof. AGH – Wydz. Paliw i Energii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

## Wprowadzenie

Zdominowanie polskiego systemu energetycznego przez węgiel, zarówno kamienny jak i brunatny, ma istotne skutki dla jego perspektyw w warunkach prowadzenia polityki klimatycznej. Ograniczenie emisji dwutlenku węgla może być w takim systemie bardzo trudne i kosztowne. Dla oszacowania możliwości redukcji emisji CO<sub>2</sub> zastosowano model systemu wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, w którym emisje CO<sub>2</sub> były opodatkowane na zróżnicowanym poziomie odpowiadającym opłatom za uprawnienia emisyjne. Model rozważa wiele technologii wytwarzania oraz kilka grup konsumentów o popycie zmiennym, zależnym od cen energii. Wyniki pozwalają określić technologie stosowane w warunkach redukcji emisji oraz poziom emisji.

Poza ilościowym określeniem skali redukcji emisji ważna jest ocena działania różnych mechanizmów, takich jak: spadek popytu, wzrost sprawności wytwarzania czy zmiana paliw na niskoemisyjne. Metoda dekompozycji jest tu użyteczna i pozwala określić ilościowo skutki każdego z czynników. Wyniki takie są pomocne przy doborze najbardziej efektywnych instrumentów polityki energetycznej.

### 1. Model system wytwarzania energii elektrycznej i ciepła

Podstawowym narzędziem w długo- i średnioterminowych badaniach rozwoju systemów paliwowo-energetycznych są modele, najczęściej komputerowe. Przy obecnym poziomie rozwoju sprzętu i oprogramowania pozwalają w krótkim czasie uzyskać oceny ilościowe nawet złożonych problemów rozwojowych. Model będący uproszczonym obrazem rzeczywistego systemu nie daje jednak pewnych odpowiedzi co do ich przyszłości, niemniej uzyskiwane wyniki obniżają poziom ryzyka związanego podejmowaniem decyzji gospodarczych.

Zastosowany w pracy model jest typowym modelem *bottom-up*, w którym dobierane są technologie wytwarzania dla warunków zadanych ograniczeniami<sup>1</sup>. Należą do nich przede wszystkim poziom popytu na energię, który w tym wypadku był zmienny i zależny od poziomu cen energii. Taka cecha modelu pozwala na ocenę wpływu polityk energetycznych i ekologicznych nie tylko na dobór technologii ale i zachowania konsumentów, którzy reagują zmniejszeniem popytu na wzrost cen<sup>2</sup>. Elastyczność popytu dobrano do cech wyróżnianych grup konsumentów (tab. 1). Wartości te wraz z danymi o poziomie cen i zużycia w latach ubiegłych posłużyły do budowy schodkowych krzywych popytu o stałej elastyczności.

---

<sup>1</sup> Model jest wzorowany na metodyce zastosowanej w modelu EFOM – *Energy Flow Model* i był stosowany do oceny wpływu kosztów zewnętrznych [3,4] oraz rozwoju technologii czystego węgla.

<sup>2</sup> Zastosowano tu metodę zaproponowaną między innymi w modelu MARKAL.

TABELA 1. Wartości współczynników elastyczności cenowej popytu dla analizowanych grup konsumentów

TABLE 1. Price elasticities of demand for considered groups of consumers

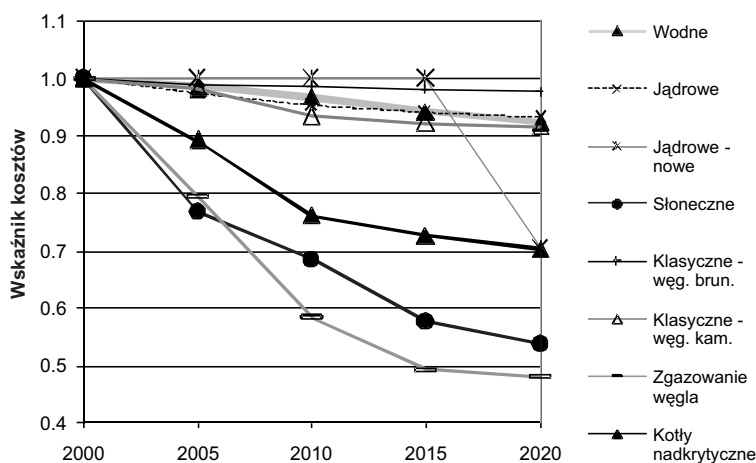
Grupa konsumentów	Energia elektryczna	Ciepło
Przemysł	-0,25	-0,30
Transport	-0,30	-0,30
Rolnictwo	-0,30	-0,30
Handel	-0,25	-0,30
Gospodarstwa domowe	-0,15	-0,20

Ponieważ model rozważa okres 2005–2020, dla lat przyszłych przyjęto prognozowany poziom popytu. W ten sposób uwzględniono efekt przyrostu dochodów ludności wskutek wzrostu gospodarczego.

Podaż energii pierwotnej była reprezentowana przez główne paliwa stosowane w energetyce z tym, że węgiel kamienny podzielono na kilkadziesiąt klas jakościowych. Pozwala to uwzględnić procesy wpływu jakości paliwa na poziom emisji. Paliwa opisano kosztem ich dostawy oraz dostępną ilością. Ten ostatni parametr jest szczególnie ważny dla paliw odnawialnych, które mogą być wykorzystane do spełnienia wymogu produkcji określonej części energii elektrycznej z tych właśnie źródeł. Ponieważ dla węgla rozważono kilku dostawców podaż jest odzwierciedlona schodkową krzywą podaży.

Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła było reprezentowane przez około pięćdziesiąt technologii, od istniejących po perspektywiczne. Każda scharakteryzowana przez zestaw parametrów ekonomicznych i technicznych. Technologie te pokrywały wszystkie obecnie stosowane i przyszłe metody bazujące na paliwach kopalnych, odnawialnych i energii nuklearnej. Technologie obecnie stosowane rozważano w wariantach rozwoju z modernizacją (np. przez dodanie turbiny gazowej) lub zwiększaniem czasu użytkowania. Ponieważ rozważany horyzont czasowy należy zaliczyć do średnioterminowych należy uwzględnić procesy doskonalenia technologii, tutaj – jako obniżanie ich kosztów inwestycyjnych i operacyjnych (rys. 1). Procesy takie były ostatnio dość szeroko analizowane i stwierdzono znaczący efekt poprawy parametrów ekonomicznych, co należy uwzględnić w prowadzonych obliczeniach. Poziom obniżenia kosztów jest zależny od proporcji inwestycji do mocy istniejących, a im proporcja niższa tym spadek mniejszy. Można zauważyć, że tradycyjne technologie wykazują zdecydowanie, mniejszy spadek kosztów niż perspektywiczne, np. klasyczne węglowe i zgazowanie.

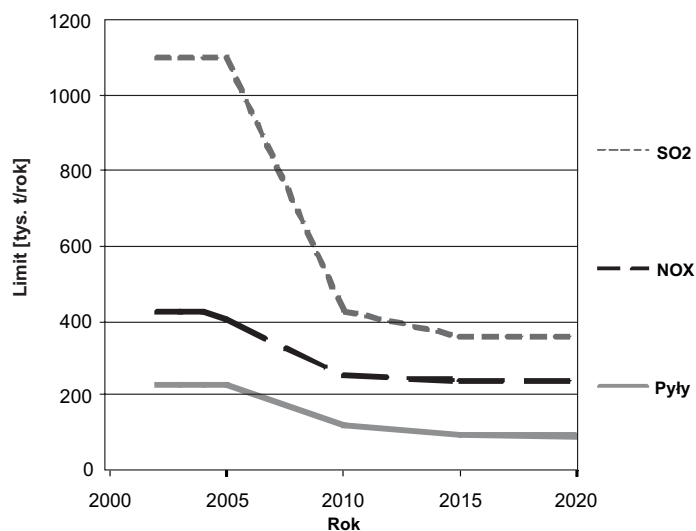
Polski rynek energetyczny potraktowano jako część rynku globalnego, tzn. spadki kosztów wynikające z inwestycji w innych krajach są odnoszone do nakładów na budowy krajowe. Wiele z polskich przedsiębiorstw energetycznych jest obecnie własnością korporacji międzynarodowych. Liczba potencjalnych dostawców urządzeń jest ograniczona, korzystają oni z prac badawczych i gromadzą doświadczenia z budowy kolejnych instalacji, które to procesy dają znaczące niekiedy obniżenie kosztów nowych instalacji.



Rys. 1. Wskaźniki kosztów inwestycyjnych dla wybranych technologii  
Źródło: [8]

Fig. 1. Investment costs indices for the selected technologies

Analizowane scenariusze zmieniały poziom opłat emisyjnych za dwutlenek węgla, który odpowiadał podatkowi węglowemu lub cenie zakupu uprawnień do emisji. Zastosowano poziomy 0, 5, 10, 15, 20, 22, 25, 27 i 30 Euro na tonę CO<sub>2</sub> począwszy od roku 2005. Jest to dość rygorystyczny scenariusz, zwłaszcza jeżeli chodzi o rok rozpoczęcia opodatkowania, jednak takie działania w formie przydziału uprawnień emisji były już wtedy podejmowane przez UE. Dla pozostałych polutantów zastosowano limity krajowe zgodne z traktatem akcesyjnym (rys. 2) i odniesiono do sektora elektroenergetycznego zawodowego. Zmiana

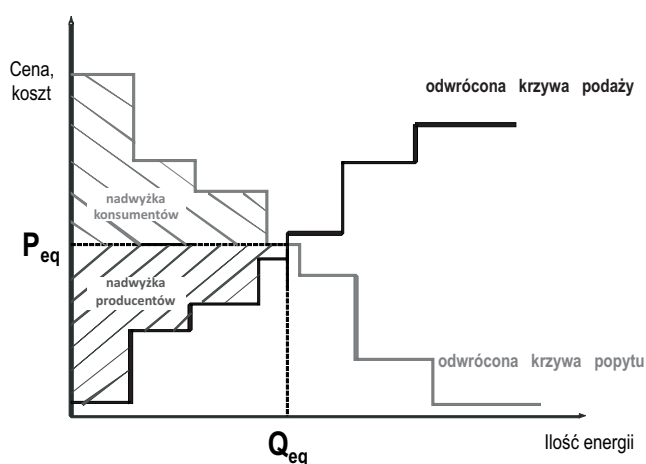


Rys. 2. Limity emisji dla sektora elektroenergetycznego

Fig. 2. Emissions limits for the Power generation sector

dopuszczalnego poziomu jest bardzo duża bo co najmniej 50% po roku 2010. Limity te są uważane za bardziej restrykcyjne w porównaniu z dyrektywą dla dużych źródeł spalania, gdzie normy dla indywidualnych źródeł dopuszczają większy sumaryczny limit dla kraju.

Dla warunków zadanych limitami podaży paliw pierwotnych, wymogiem udziału energii odnawialnej, popytu i emisji, model musi dobrać odpowiednie technologie maksymalizując sumę nadwyżek producenta i konsumenta. Nadwyżka ta jest polem pomiędzy krzywymi podaży i popytu i jej maksymalizacja odzwierciedla proces równoważenia rynków (rys. 3). W modelu dotyczy to rynków energii elektrycznej i ciepła dla grup odbiorców oraz rynków paliw. Model nie uwzględnia innych sektorów gospodarki jest więc modelem równowagi cząstkowej.



Rys. 3. Zasada wyznaczania nadwyżek konsumentów i producentów oraz równoważenia rynków

Fig. 3. Consumers and producers surpluses and market equilibrium

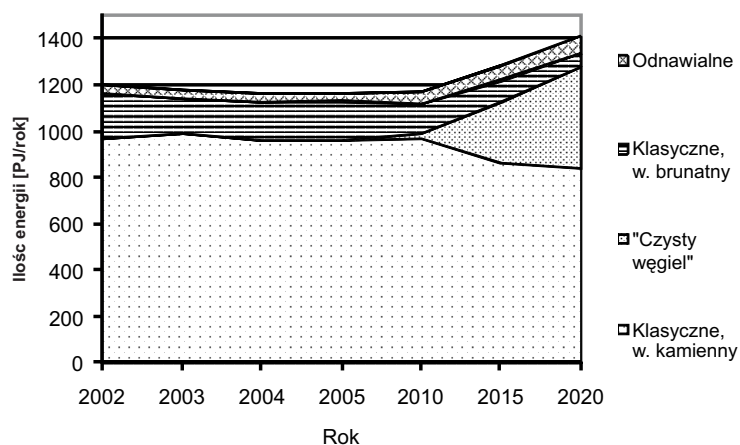
Wyniki modelu, poza wskazaniem grup technologii wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, stanowią wartościowy zestaw danych, który może być wykorzystany do analiz efektywności instrumentów polityki energetycznej służących obecnie przede wszystkim ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych. Pod względem oddziaływania na elementy systemu pozyskania, przetwarzania i użytkowania energii można wyróżnić takie, które będą działały na rzecz emisyjności stosowanych paliw, sprawności procesów przetwarzania energii oraz zmniejszających popyt na energię, co prowadzi do obniżenia emisji. Do tego typu analiz można zastosować metodę dekompozycji [1, 5]. Przyjęta tu procedura dekompozycji [7] pozwalała oszacować wpływ następujących czynników:

- ✧ właściwości stosowanych procesów technologicznych, np. związanie polutanta w procesie reakcji w instalacji redukcji,
- ✧ emisyjność paliw,
- ✧ sprawność przemian energetycznych,
- ✧ popyt.

Oszacowanie udziału każdego z czynników pozwala wybrać najbardziej efektywne instrumenty polityki energetycznej i środowiskowej.

## 2. Perspektywy energetyki w świetle wyników badań

Wyniki badań modelowych szacują udział różnych grup technologii w wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła dla założonych poziomów kosztów uprawnień emisyjnych. Zmiany technologii wynikają także z ograniczeń emisyjnych dla innych poza CO<sub>2</sub> polutantów. Wymogi ograniczeń emisji są bardzo restrykcyjne i wymuszają stosowanie technologii niskoemisyjnych, które są przy tym generalnie o wyższej sprawności niż dotychczas stosowane co przyczynia się do obniżenia emisji CO<sub>2</sub> (rys. 4).



Rys. 4. Grupy technologii wytwarzania – wariant bazowy – koszt pozwolenia 0

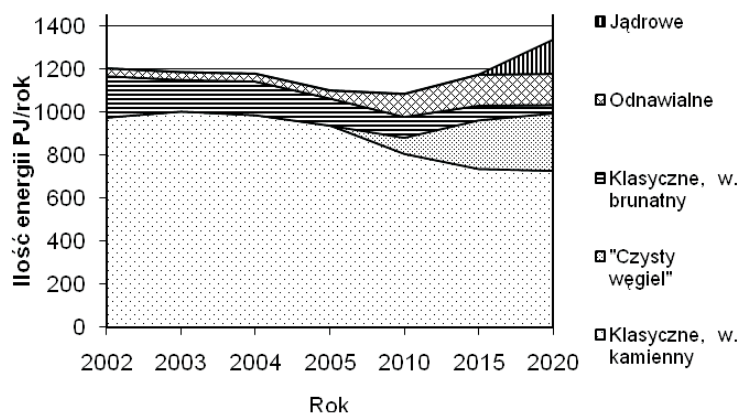
Fig. 4. Technologies of electricity and heat production at zero emission allowance price

Wzrost popytu jest bilansowany przez wzrost produkcji, głównie z węgla, przy czym po roku 2010 tradycyjne technologie węglowe tracą udział na rzecz technologii czystego węgla. Udziały innych paliw nie zmieniają się znacząco, choć warto zauważyć wzrost udziału technologii odnawialnych wskutek wymogu ich stosowania.

Scenariusz ceny uprawnień rzędu 20 Euro/t CO<sub>2</sub> daje odmienne, choć nie diametralnie różne wyniki (rys. 5).

Produkcja z węgla pozostaje ilościowo na poziomie takim samym jak na początku analizowanego okresu, co praktycznie oznacza spadek udziału. Nie jest to jednak jednoznaczne, bo duże koszty uprawnień powodują spadek popytu w latach 2005–2015, i wtedy udział węgla jest dalej duży. Znaczące zmiany zachodzą po roku 2015, gdy pojawia się energetyka jądrowa<sup>3</sup>, a udział energii odnawialnej jest bardzo duży, choć mógłby być większy gdyby nie ograniczenie potencjału pozyskania tej formy energii. Korzysta się z energii wiatru, geotermalnej i wodnej, relatywnie mniej biomasy. Tak jak poprzednio tradycyjne technologie węglowe są zastępowane czystymi.

<sup>3</sup> Obecne prognozy wskazują na późniejszy termin wprowadzenia energetyki jądrowej.



Rys. 5. Grupy technologii wytwarzania – wariant kosztu pozwolenia 20 Euro/Mg CO<sub>2</sub>

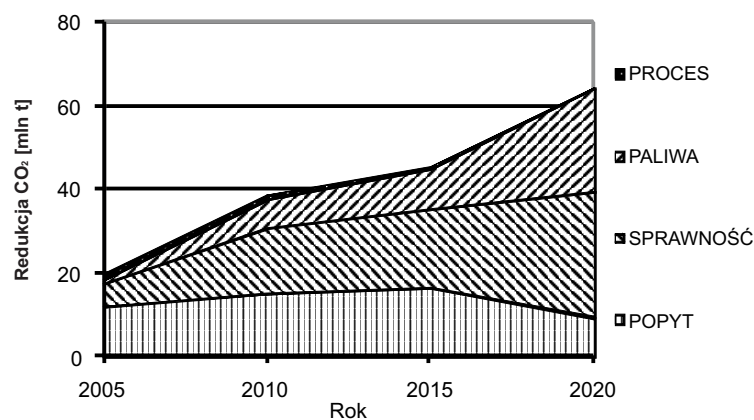
Fig. 5. Technologies of electricity and heat production for the 20 Euro/Mg CO<sub>2</sub> allowance price

Udział technologii węglowych pozostaje we wszystkich analizowanych wariantach znaczący, przy czym wzrasta rola technologii czystego węgla. Dla dużych wartości cen uprawnień redukcja emisji jest duża przez stosowanie energii odnawialnej i nuklearnej, bez stosowania wychwytywania i magazynowania CO<sub>2</sub>.

### 3. Dekompozycja redukcji emisji CO<sub>2</sub>

Jak wcześniej wspomniano, redukcję emisji analizowano w tym przypadku pod kątem działania czterech czynników. Na rysunku 6 pokazano udział tych czynników dla różnic emisji między przypadkami ceny uprawnień 0 i 20 Euro/Mg CO<sub>2</sub>. Czynnikiem stosowanego procesu ma niewielki, praktycznie pomijalny udział, wynika tylko z niewielkich korzyści wynikających ze stosowania węgla o nieco lepszej jakości, który daje niewielkie obniżenie emisji. Pozostałe czynniki decydują o redukcji emisji, przy czym w okresie do około 10 lat najważniejszy jest spadek popytu i w konsekwencji emisji. W dłuższym terminie ważna jest poprawa sprawności oraz zmiana paliwa. W końcowym okresie efekty ich działania są porównywalne.

Wyniki te wskazują, że dla uzyskania efektów w krótkim terminie, działania polityki energetycznej i ekologicznej powinny wpływać na obniżenie popytu. W długim terminie należy stosować instrumenty nakierowane na poprawę sprawności i zmianę paliw. Te ostatnie działania, to łącznie zmiany stosowanych technologii, należałoby zatem wspierać rozwój badań nad nowymi technologiami i instalacjami demonstracyjnymi.



Rys. 6. Czynniki redukcji emisji dla ceny uprawnień emisyjnych 20 Euro/Mg CO<sub>2</sub>

Fig. 6. Decomposition of emissions reduction

## Podsumowanie

Artykuł prezentuje wyniki analizy perspektyw, opartej na węglu kamiennym i brunatnym, energetyki polskiej w warunkach prowadzenia polityki klimatycznej przez wprowadzenie podatku od emisji lub zakupu uprawnień emisyjnych na dwutlenek węgla. Model wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej został użyty jako narzędzie tej analizy. Poprzez dobór technologii w warunkach ograniczeń emisyjnych maksymalizuje się w nim nadwyżki konsumentów i producentów. Model jest typowym modelem typu *bottom-up* z równowagą cząstkową rynków paliw i energii. Oszacowano skutki dla scenariuszy różniących się poziomem podatku za emisje CO<sub>2</sub>, limity emisji pozostałych polutantów ustalono na poziomie wynikającym z Traktatu Akcesyjnego.

Wyniki wskazują na utrzymanie znaczącej roli węgla kamiennego i brunatnego w wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła. Jednakże w miarę wzrostu kosztów uprawnień emisyjnych zwiększa się udział czystych technologii węglowych. Wysoki poziom kosztów związanych z emisją CO<sub>2</sub> wymusza także wzrost produkcji z technologii odnawialnych, pojawia się także energetyka jądrowa.

Wyniki modelu posłużyły także do analizy efektów działań potencjalnych narzędzi polityki energetycznej i ekologicznej. Redukcję emisji w krótkim okresie najłatwiej uzyskać poprzez obniżenie popytu. W dłuższym okresie dominują efekty zmian technologicznych, to jest poprawa sprawności wytwarzania oraz zmiana paliw (technologii) na niskoemisyjne (odnawialne, nuklearne). Wyniki takie otrzymano stosując metodę dekompozycji dla wynikających z wprowadzania podatku węglowego różnic w poziomie emisji.

Zastosowana metodyka badań pozwala uzyskać wyniki informujące o wielu aspektach rozwoju energetyki i wskazać najbardziej efektywne działania instrumentów polityki energetycznej i ekologicznej. Przyczynia się to do zmniejszenia ryzyka działalności gospodarczej przedsiębiorstw oraz zwiększenia efektywności polityki państwa.



## Literatura

- [1] ANG B.W., 2004 – Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? *Energy Policy* 31, 1131–1139.
- [2] LOULOU R., GOLDSTEIN G., NOBLE K., 2004 – Documentation for the MARKAL Family of Models. Energy Technology Systems Analysis Programme, [www.etsap.org](http://www.etsap.org).
- [3] KUDEŁKO M., 2003 – Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie energetycznym. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 121*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [4] KUDEŁKO M., 2006 – Internalization of external costs in the Polish power generation sector: A partial equilibrium model. *Energy Policy* 34, 3409–3422.
- [5] SUN J.W., 1998 – Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model. *Energy Economics* 20, 85–100.
- [6] SUWAŁA W., KUDEŁKO M., KAMIŃSKI J., 2005 – Modelling clean fossil fuels technologies deployment. Mineral and Energy Economy Research Centre, Kraków.
- [7] SUWAŁA W., 2007 – Decomposing Carbon Dioxide Emissions Reduction for Coal Based Energy System, 9<sup>th</sup> IAEE European Energy Conference “Energy Markets and Sustainability in a Larger Europe”, Florence.
- [8] WETO 2030, WETO – World Energy, Technology And Climate Policy Outlook 2030, 2003. European Commission, Directorate-General for Research, EUR 20366.

Wojciech SUWAŁA

## Prospects of coal based power in the carbon emissions limiting system

### Abstract

Poland is one of the coal based countries, where abundant domestic reserves and limited access to other fuels created energy system with more than 94% power generation from hard coal and lignite. Reduction of greenhouse gases emissions in such a system is a challenge. The bottom-up model of power and heat generation system was used to analyze paths of technologies development required to comply with the expected carbon dioxide emissions reductions. The model considered power generation for various groups of consumers of flexible demand and limits on emissions for sulphur dioxide, nitrogen oxides and particulates. Taxes on carbon dioxide emissions or auctioned emission allowances were the mean for the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. Firstly, technologies changes were observed to define the prospects of coal based generation. Decomposition method was used to identify the effects of technological processes, fuels structure, efficiency improvements and demand changes on CO<sub>2</sub> emissions reduction. The effects indicate most efficient policy instruments to foster carbon dioxide emissions reduction.

KEY WORDS: coal based power generation, carbon dioxide emissions reduction, energy and environmental economics

