

Eugeniusz MOKRZYCKI\*, Alicja ULIASZ-BOCHENŃCZYK\*\*

## Elektrownia bez emisji?

**STRESZCZENIE.** Elektrownie i elektrociepłownie są źródłem emisji do atmosfery: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, pyłu zawieszonego, gazów cieplarnianych takich jak: N<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub>. Od wielu lat energetyka na całym świecie stara się ograniczyć a w przyszłości może nawet wyeliminować emisję zanieczyszczeń do atmosfery. W artykule przedstawiono najważniejsze rodzaje emisji z energetyki i możliwości ich ograniczenia zalecane przez Dokument referencyjny na temat najlepszych dostępnych technik dla dużych obiektów energetycznego spalania IPPC oraz ideę *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants*.

**SŁOWA KLUCZOWE:** energetyka, emisje, ograniczenia emisji, elektrownia bez emisji stosująca paliwo konwencjonalne

## Wprowadzenie

W wyniku spalania przez elektrownie i elektrociepłownie paliw kopalnych emitowane są do atmosfery: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, pył zawieszony, gazy cieplarniane takie jak: N<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub>. W mniejszej ilości występuje emisja metali ciężkich, związków halogenowych i dioksyn [5].

Od wielu lat energetyka stara się ograniczyć emisję zanieczyszczeń do atmosfery, co jest widoczne w okresie ostatnich dziesięciu lat. Pozwalają na to rozwinięte i od wielu lat wdrożone różne metody redukcji emisji.

\* Prof. dr hab. inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;  
e-mail: mokrzy@min-pan.krakow.pl

\*\* Dr inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;  
e-mail: aub@min-pan.krakow.pl

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Roman NEY

W celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń przez krajowe elektrownie i elektrociepłownie, Ministerstwo Środowiska opracowało standardy emisyjne dla instalacji, w tym elektrowni i elektrociepłowni z dnia 20 grudnia 2005 r. (Dz.U. 2005.260.2181).

W rozporządzeniu tym zawarte są standardy emisyjne dla dwutlenku siarki, tlenków azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu i pyłu. Rozporządzenie to określa również standardy emisyjne dla współspalania odpadów.

## Główne emisje z elektrowni

### Emisja tlenków siarki

Emisja  $\text{SO}_2$  jest rezultatem przede wszystkim obecności siarki w paliwie. Paliwa naturalne posiadają siarkę w formie związków organicznych i nieorganicznych. Podczas spalania większość siarki powstaje w formie  $\text{SO}_2$  [5].

Dla paliw stałych zawierających 3—4% siarki może tworzyć się również trójtlenek siarki  $\text{SO}_3$ , który jest adsorbowany na częściach stałych.

Gaz ziemny jest zwykle uważany za wolny od siarki.

Dla ograniczenia emisji wykorzystuje się paliwa o niskiej zawartości siarki oraz stosowane są różne metody odsiarczania [5].

W Polsce emisja  $\text{SO}_2$  z energetyki zawodowej zmalała znacząco. W 1995 r. wynosiła 1 221 992 ton przy 16 funkcjonujących instalacjach odsiarczania i zmalała w 2005 r. do 679 849 ton przy wzroście funkcjonujących instalacji odsiarczania do liczby 31 [2, 3].

### Emisja tlenków azotu

Tlenki azotu są emitowane głównie podczas spalania paliw i są to: tlenek azotu (NO), dwutlenek azotu ( $\text{NO}_2$ ) i podtlenek azotu ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Pierwsze dwa z nich tworzą jako mieszaninę znaną jako  $\text{NO}_x$ .

Dla zmniejszenia emisji  $\text{NO}_x$  w elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych miałem węglowym stosuje się selektywną redukcję katalityczną (SCR) lub selektywną redukcję niekatalityczną (SNCR). W elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych miałem węgla brunatnego do redukcji  $\text{NO}_x$  stosuje się nowoczesne niskoemisyjne palniki w połączeniu z metodami takimi jak: recyrkulacja gazów spalinowych, spalanie etapami, dopalanie itp. W kotłach fluidalnych opalanych paliwem stałym stosuje się rozdział powietrza oraz recyrkulację gazów spalinowych [5].

W Polsce emisja  $\text{NO}_2$  z energetyki zawodowej zmalała znacząco. W 1995 r. wynosiła 380 821 ton i zmalała w 2005 r. do 246 483 ton [2, 3].

## Emisja pyłu zawieszonego

Pył zawieszony powstaje podczas spalania paliw naturalnych prawie całkowicie z frakcji mineralnej paliwa. Dla zmniejszenia emisji pyłów mogą być stosowane odpylacze elektrostatyczne lub filtry tkaninowe. We wstępnej fazie oczyszczania spalin mogą być stosowane odpylacze mechaniczne i cyklonowe [5].

Emisja popiołu lotnego z energetyki zawodowej w ciągu ostatnich 10 lat zmalała. W 1995 r. wynosiła 193 660 ton przy wskaźniku uchwycenia 98,61%, a już w 2005 r. wyniosła tylko 39 588 ton przy wskaźniku uchwycenia 99,71% [2, 3].

## Emisja metali ciężkich

Emisja metali ciężkich wynika z ich obecności w paliwach naturalnych. Większość metali ciężkich (As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, V, Zn) wydziela się w formie związków takich jak np.: tlenki czy chlorki, razem z cząstkami pyłu [16]. Dla ograniczenia emisji metali ciężkich stosuje się przede wszystkim odpylacze o wysokiej sprawności takie jak: odpylacze elektrostatyczne lub filtry tkaninowe itp.

Emisja metali ciężkich w ciągu kilku ostatnich lat zmalała co przedstawia tabela 1.

TABELA 1. Przykładowe emisje metali ciężkich z energetyki zawodowej [Mg]

TABLE 1. Power industry exemplary heavy metals emission rates [Mg]

Rok	As	Cr	Zn	Cd	Cu	Ni	Pb	Hg
1996	8,7	10,5	138,2	4,5	31,3	43,1	43,0	15,3
2003	2,7	3,3	25,0	0,2	8,4	10,3	10,2	7,9

Źródło: [3, 9]

## Tlenek węgla

Tlenek węgla zawsze pojawia jako bezpośredni produkt procesu spalania.

Emisja tlenku węgla może być ograniczona przez zastosowanie zaawansowanych technik spalania.

W Polsce emisja CO z energetyki zawodowej zmieniała się: w 1995 r. wynosiła 31 047 ton, wzrosła w 1998 r. do 38 447 Mg i zmalała w 2005 r. do 32 615 ton [2, 3].

## Emisja gazów cieplarniach

Gazami cieplarnianymi powstałymi przy spalaniu paliw naturalnych są ditlenek węgla (CO<sub>2</sub>) i podtlenek azotu (N<sub>2</sub>O).

Ditlenek węgla jest produktem spalania wszystkich paliw naturalnych i jest związany bezpośrednio z zawartością węgla w paliwie. W tabeli 2 przedstawiono wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> dla różnych paliw.

TABELA 2. Wskaźnik emisji CO<sub>2</sub> dla głównych paliw

TABLE 2. Main fuel CO<sub>2</sub> emission factor

Paliwo	Wskaźnik emisji (t CO <sub>2</sub> /TJ) [g/kWh]
Gaz ziemny	55 (198)
Ciężkie paliwa olejowe	80 (288)
Lekkie paliwa olejowe	77 (277)
Węgiel kamienny	95 (342)
Węgiel brunatny	110 (396)

Źródło: [5]

Możliwości zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych zalecane w Dokumencie referencyjnym na temat najlepszych dostępnych technik dla dużych obiektów energetycznego spalania [5], to przede wszystkim metody redukcji emisji CO<sub>2</sub>. W dokumencie tym metody redukcji CO<sub>2</sub> podzielono na dwie opcje:

1. Unikanie emisji przez poprawienie sprawności procesów spalania, efektywne wykorzystanie energii i racjonalne gospodarowanie zasobami naturalnymi.
2. Wychwytywanie CO<sub>2</sub> ze strumienia spalin.

Opcja pierwsza może być osiągnięta przez optymalizację procesów produkcji energii na drodze zastępowania lub dalszej optymalizacji głównych elementów procesów takich jak: turbiny, pompy i systemy kontroli zanieczyszczeń oraz optymalizację zużycia energii. Przyszłe poczynania dla zwiększenia sprawności konwencjonalnych elektrowni, to przede wszystkim obniżenie ciśnienia kondensacji, stosowanie międzystopniowego przegrzewania pary i regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej, utylizacja ciepła odpadowego i zastosowanie warunków cyklu nadkrytycznej pary wodnej.

Sposobem na zwiększenie wydajności stosowanego paliwa, a tym samym ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> zalecanym przez Dokument referencyjny [5] jest również produkcja skojarzona elektryczności i ciepła. W zakładach skojarzonej produkcji energii cieplnej i elektrycznej można zaoszczędzić około 50% energii w porównaniu do produkcji osobnej ciepła i energii elektrycznej.

Opcja druga redukcji emisji CO<sub>2</sub>, to jego usuwanie poprzez separację i wychwytywanie ze strumienia spalin. Separacja CO<sub>2</sub> ze spalin może być przeprowadzana poprzez [5, 6, 8, 10, 11]:

- ✧ absorpcję — najczęściej stosowaną metodą oddzielania CO<sub>2</sub> ze spalin jest absorpcja chemiczna. Absorpcja może odbywać się na drodze fizycznej i chemicznej;
- ✧ adsorpcję — metoda oparta jest na fizycznym przyciąganiu pomiędzy gazem a ciałami stałymi;

- ✧ separację membranową — metoda ta polega na różnicach we wzajemnych fizykochemicznych i chemicznych oddziaływaniach pomiędzy składnikami mieszaniny gazów a materiałem membrany;
- ✧ metodę kriogeniczną — metoda polegająca na sprężaniu i schładzaniu gazu do temperatury około  $-56^{\circ}\text{C}$ , a następnie wydzielaniu  $\text{CO}_2$  w postaci ciekłej;
- ✧ technikę Carnola — system Carnola łączy usuwanie  $\text{CO}_2$  ze spalin z elektrowni stosujących węgiel z wytwarzaniem metanolu.

W 1995 r. emisja  $\text{CO}_2$  wynosiła 147 079 tys. Mg i nieznacznie zwiększyła się w 2005 r. do 147 298 Mg.

## Zero Emission Fossil Fuel Power Plants

Pojęcie *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* zostało zdefiniowane przez Unię Europejską. Dla realizacji tego celu została powołana platforma technologiczna *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants Technology Platform*. Platforma przygotowuje *Strategic Research Agenda* dla stworzenia najbardziej sprawnych elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne mogące przyczynić się do zachowania źródeł energii. W zakładach tych zostaną zastosowane różne procesy wychwytywania  $\text{CO}_2$  i jego bezpiecznego składowania lub powtórnego zastosowania (metoda zaawansowana sekwestracji  $\text{CO}_2$  — *re-use*).

Zerowa emisja z elektrowni spalającej paliwa energetyczne zostanie osiągnięta przez poprawienie sprawności energetycznej wraz z rozwojem i wdrażaniem technologii wychwytywania  $\text{CO}_2$  [1].

Wzrost wydajności energetycznej elektrowni konwencjonalnych prowadzi zarówno do zmniejszenia emisji  $\text{CO}_2$  jak i redukcji zużycia paliw kopalnych.

Jednak podstawowym warunkiem stworzenia *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* jest opracowanie opłacalnego ekonomicznie systemu separacji i wychwytywania  $\text{CO}_2$ .

Dla elektrowni bez emisji Unia Europejska rozpatruje trzy podstawowe systemy wychwytywania  $\text{CO}_2$  [1]: wychwytywanie przed spalaniem (*pre-combustion capture*), wychwytywanie po spalaniu (*post-combustion capture*), tlenowe spalanie węgla (*oxy-fuel combustion*), które mogą być zastosowane w elektrowni bezemisyjnej.

Zagadnieniami, które muszą być również rozwiązane dla stworzenia *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* są działania związane z poprawieniem opłacalności procesów konwersji paliwa w energię, opracowanie odpowiedniego i bezpiecznego systemu transportu  $\text{CO}_2$  do miejsca jego magazynowania lub powtórnego zastosowania.

Unia Europejska wskazuje również konieczność rozwiązania pozostałych problemów: technicznych, politycznych, społecznej akceptacji, zdrowia i bezpieczeństwa odnoszących się do składowania i zastosowania wychwyconego z elektrowni  $\text{CO}_2$ .

Jednym z rozwiązań dla elektrowni i elektrociepłowni spalających węgiel, które może być zakwalifikowane jako realizacja założeń dla *Zero Emission Fossil Fuel Power Plant*, jest połączenie sekwestracji ditlenku węgla z utylizacją popiołów lotnych deponowanych

w kopalniach podziemnych. Sekwestracja CO<sub>2</sub> w tym przypadku polega na jego wiązaniu poprzez mineralną karbonatyzację w mieszaninach popiołowo-wodnych deponowanych w kopalniach podziemnych [7, 14, 15].

Bardzo ważnym aspektem stworzenia *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* jest również znalezienie dla danego zakładu najbardziej opłacalnej i możliwej do zastosowania opcji magazynowania lub powtórnego użycia wychwyconego CO<sub>2</sub>.

Ideę *Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* przedstawia również IEA Coal Centre. Idea elektrowni i elektrociepłowni spalającej węgiel propagowana przez IEA Coal Centre zakłada zredukowanie niemal do zera wszystkich emisji zanieczyszczeń [12, 13].

W tabeli 3 przedstawiono obecne poziomy emisji oraz cele zakładane do osiągnięcia w elektrowniach węglowych oraz gazowych w cyklu kombinowanym. Pyłowe spalanie węgla oraz cykl kombinowany ze zgazowaniem węgla są według IEA Coal Centre technologiami bazowymi dla rozwoju technologii bezemisyjnych [13].

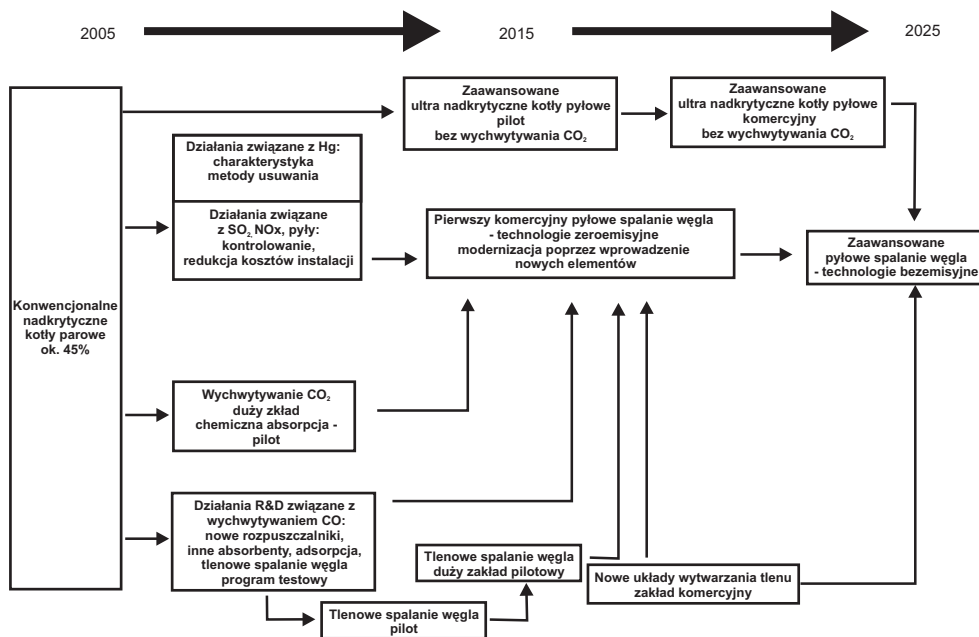
TABELA 3. Emisje obecne oraz zakładane wielkości ich redukcji

TABLE 3. Current emission and assumed reductions

Technologia	Emisja SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Emisja NO <sub>x</sub> (w przeliczeniu NO <sub>2</sub> ) [mg/m <sup>3</sup> ]	Emisja pyłów [mg/m <sup>3</sup> ]	Rtęć	Emisja CO <sub>2</sub> [kg/MW·h <sub>c</sub> ]
PCC (pyłowe spalanie węgla) + FGD (odsiarczanie spalin na mokro)	100—400 (usunięcie do 98%)	100—200 (SCR)	10—25		710—920
CFBC (spalanie w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym)	100—400 (usunięcie do 98%)	<200—400	<50		
PFBC (ciśnieniowe spalanie w złożu fluidalnym)	100—400 (usunięcie do 98%)	120—400	<50		
IGCC (cykl kombinowany ze zgazowaniem węgla)	usunięcie 98—99%	<75	<1		
NGCC (blok gazowo-parowy)	pomijalnie mała	<30 (SCR) –300	0		~370
PCC pułap zeroemisyjny	<100 pułap tymczasowy <30 pułap docelowy	<100 pułap tymczasowy <30 pułap docelowy	<10	usunięcie 90%	usunięcie >80%
IGCC pułap zeroemisyjny	<25	<25	<1	usunięcie 90%	usunięcie >80%

Źródło: [12]

Opracowanie technologii zeroemisyjnej dla elektrowni i elektrociepłowni przewidywane jest przez IEA Coal Centre — przedstawiono ją na rysunku 1. Według założeń IEA Coal Centre zaawansowane spalanie węgla w kotłach pyłowych na poziomie emisji zerowej powinno zostać osiągnięte około 2025 r.



Rys. 1. Schemat możliwości osiągnięcia technologii bezemisyjnego spalania w kotłach pyłowych  
Źródło: [12]

Fig. 1. Possibilities to obtain zero emissions pulverized coal combustion technologies

W artykule przedstawiono schemat przejścia do technologii bezemisyjnej opartej na spalaniu węgla w kotłach pyłowych, ponieważ w technologii wytwarzania energii w zakładach zawodowych w Polsce tego typu kotły przeważają [3].

## Podsumowanie

Problem emisji z elektrowni jest już od szeregu lat rozwiązywany. Technologie ograniczania głównych emisji są unowocześniane i optymalizowane. Uwidacznia się to w zmniejszającej się emisji: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, metali ciężkich i pyłów. Emisją bardzo ważną, która do tej pory nie została ograniczona, a nawet wzrosła jest emisja gazów cieplarnianych, a przede

wszystkim CO<sub>2</sub>. Rozwiązanie tego problemu jest tematem wielu badań. Opracowane do tej pory technologie separacji i wychwytywania CO<sub>2</sub> są bardzo kosztowne oraz powodują zmniejszenie sprawności energetycznej [4, 5, 8]. Tematem licznych projektów na całym świecie jest opracowanie jak najbardziej optymalnej i najtańszej opcji wychwytywania CO<sub>2</sub> dla istniejących zakładów energetycznych oraz opracowanie nowych technologii wytwarzania energii przy maksymalnej redukcji emisji CO<sub>2</sub>.

*Artykuł przygotowany w ramach projektu badawczego MNiI nr 4T12A03027*

## Literatura

- [1] A Vision for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. Report by the Zero Emission Fossil Fuel Power Plants Technology Platform. Report no EUR 22043, 2006.
- [2] Emitter 1998, Emisja Zanieczyszczeń Środowiska w Elektrowniach i Elektrociepłowniach Zawodowych. Agencja Rynku Energii, Warszawa 1998.
- [3] Emitter 2005, Emisja Zanieczyszczeń Środowiska w Elektrowniach i Elektrociepłowniach Zawodowych. Agencja Rynku Energii, Warszawa 2006.
- [4] GÖTTLICHER G., PRUSCHEK R., 1997 — Comparison of CO<sub>2</sub> removal systems for fossil-fuelled power plant processes. Energy Conversion and Management, vol. 38, p. S73—S78.
- [5] Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. European Commission. July 2006.
- [6] MARZEC A., 2001 — Nadmierna emisja dwutlenku węgla towarzysząca spalaniu kopalnych surowców energetycznych i możliwości jej redukcji. Materiały XV Konferencji z cyklu: Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej, pt. „Stan obecny kompleksu paliwowo-energetycznego Polski i pożądane kierunki jego rozwoju w latach 2002—2030”. Zakopane, 14—17 października 2001 r. Sympozja i Konferencje nr 52. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków, s. 235—244.
- [7] MAZURKIEWICZ M., MOKRZYCKI E., PIOTROWSKI Z., POMYKAŁA R., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., 2005 — Sekwestracja CO<sub>2</sub> i możliwości jej współlokowania w zrobach kopalń podziemnych z popiołami. Przeg. Górń. nr 12, s. 42—49.
- [8] MAZURKIEWICZ M., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., MOKRZYCKI E., PIOTROWSKI Z., POMYKAŁA R., 2005 — Metody separacji i wychwytywania CO<sub>2</sub>. Polityka Energetyczna, tom 8, zeszyt specjalny. s. 527—538.
- [9] Ochrona środowiska 1998. Główny Urząd Statystyczny, Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa 1998.
- [10] Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Praca zbiorowa pod red. M. Ściążko i H. Zielińskiego. Wyd. IChPW i IGSMiE, Zabrze-Kraków, 2003.
- [11] THAMBIMUTHU K. i in., 2002 — CO<sub>2</sub> capture and reuse. Proceedings of IPCC Workshop Carbon Capture and Storage. Regina.
- [12] TOPPER J., HENDERSON C., 2005 — Advanced Technologies Towards Zero Emissions from coal-fired plant and their introduction in EU Member States. Materiały Międzynarodowej Konferencji: „Polityka i strategia zrównoważonego rozwoju energetyki krajów europy środkowo-wschodniej”, Warszawa.
- [13] Towards zero emission coal-fired power plants. Profiles PF 05-08. [www.iea-coal.org.uk](http://www.iea-coal.org.uk)



- [14] ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., MAZURKIEWICZ M., MOKRZYCKI E., PIOTROWSKI Z., 2004 — Utylizacja ditlenku węgla poprzez mineralną karbonatyzację. *Polityka Energetyczna* tom 7, z. specjalny, s. 541—555.
- [15] ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., MOKRZYCKI E., MAZURKIEWICZ M., PIOTROWSKI Z., 2006 — Utilization of carbon dioxide in fly ash and water mixtures. *Chemical Engineering Research and Design* 84(A9), p. 843—846.
- [16] Zintegrowane Zapobieganie Zanieczyszczeniom i ich Kontrola (IPPC). Streszczenie Dokument referencyjny na temat najlepszych dostępnych technik dla dużych obiektów energetycznego spalania. Maj 2005.

Eugeniusz MOKRZYCKI, Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK

## Emission free power plant?

### Abstract

Power and thermal power plants make significant emission sources of such substances as: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulate matter, greenhouse gases like N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>. For many years power industry all over the world has tried to reduce and perhaps even to eliminate totally in the future pollution emission to atmosphere. The paper presents the most important emission kind originating from power industry as well as their reduction recommended by IPPC directive, it also presents an idea of Zero Emission Fossil Fuel Power Plants worked out by EU.

KEY WORDS: power industry, emissions, emissions reduction, zero emission fossil fuel power plants.