

Ryszard WILK
Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej

OCHRONA ŚRODOWISKA W ENERGETYCE

Streszczenie. Przeprowadzono studium nad zmniejszeniem emisji szkodliwych substancji w energetyce. Omówiono działania w zakresie oszczędności energii przez konsumentów oraz producentów energii jako sposobu na ograniczenie emisji szkodliwych substancji. Omówiono możliwości pierwotnych i wtórnych metod ograniczania emisji, stosowania czystszych paliw i palenisk fluidalnych. W podsumowaniu dokonano porównania poziomu emisji SO_2 , NO_x i pyłu oraz sprawności dla kilku przyszłościowych technologii energetycznych.

ENVIRONMENTAL PROTECTION IN POWER INDUSTRY

Summary. The problems of the air pollution from energy industry was considered. The different clean technologies for example energy saving, applying of clean fuels, primary and secondary methods of NO_x , SO_2 , dust removal and the new thermal cycles were taken into consideration. In conclusion the emissions of NO_x , SO_2 and fly ash were compared together with thermal efficiency for all above mentioned technologies.

1. Wstęp

Procesy energetycznego spalania paliw są z jednej strony głównym sposobem pozyskiwania energii pierwotnej (85+95%), a z drugiej strony są głównym źródłem antropogenicznej emisji zanieczyszczeń. W tych procesach wytwarza się ponad 70 szkodliwych substancji lub grup tych substancji. Około 75+85% emisji NO_x i SO_2 , 55+75% emisji CO, 55+80% emisji pyłów i 100% emisji CO_2 pochodzi z procesów spalania paliw. Dlatego procesy spalania paliw powinny być optymalizowane jednocześnie wg dwóch kryteriów energetycznego i ekologicznego. Kryterium energetyczne wymaga dotrzymania założonych parametrów technologicznych (wydajność, temperatura, ciśnienie, skład

produktów, emisyjność cieplna i inne) przy możliwie największej sprawności energetycznej. Kryterium ekologiczne prowadzi do minimalizacji emisji szkodliwych substancji. Równoczesne spełnienie obydwu kryteriów jest możliwe do realizacji, choć niekiedy trudne.

W krajach wysoko rozwiniętych zaczyna przeważać pogląd o zwiększającej się roli węgla kamiennego i brunatnego w produkcji energii elektrycznej po 2000 roku [1,2]. Obok stosowanego w tych krajach klasycznego spalania pyłu węglowego wraz z odsiarczaniem i odazotowaniem spalin prowadzi się szeroko zakrojone prace badawczo-wdrożeniowe nad nowymi technologiami energetycznymi, a mianowicie nad cyrkulacyjną warstwą fluidalną (FBC), elektrownią parowo-gazową zintegrowaną ze zgazowaniem węgla (IGCC), elektrownią dwupaliwową oraz nad obiegami parowo-gazowymi opartymi na spalaniu gazu ziemnego. Celem tych prac jest zwiększenie sprawności energetycznej przy równocześnie zmniejszonej emisji do środowiska naturalnego.

2. Szkodliwość ekologiczna procesów spalania

Substancje szkodliwe lub zanieczyszczające środowisko emitowane podczas spalania w pierwszej kolejności zanieczyszczają powietrze atmosferyczne, a następnie wody i glebę. Jako zanieczyszczenie przyjmuje się wszystkie te substancje, które nie występują w czystym powietrzu lub te, które występują w ilości odbiegającej od średniego składu czystego powietrza [3]. Podział substancji szkodliwych można realizować wg różnych kryteriów. Naturalnym kryterium jest podział wg przyczyn powstawania, co przedstawiono w tabeli 1. Najbardziej uciążliwymi zanieczyszczeniami są SO_2 , NO_x , pył oraz CO_2 . Wynika to z faktu, że wyżej wymienione substancje są emitowane w dużych ilościach, co powoduje ich duży ujemny wpływ na środowisko. Biorąc pod uwagę indywidualne właściwości najbardziej szkodliwym związkiem jest benzo(a)piren, którego współczynnik toksyczności mieści się w granicach 6000-40000 w zależności od sposobu określania [4]. Związek ten należy do wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i posiada silne właściwości mutagenne i kancerogenne. Wśród znanych WWA stwierdzono występowanie w spalinach ponad 40 tych związków [5].

Tabela 1

Podział zanieczyszczeń wg przyczyn powstawania

Przyczyna	Zanieczyszczenie
Surowcowa	dwutlenek siarki, trójtlenek siarki, paliwowy tlenek azotu, podtlenek azotu (częściowo), chlorowodór, fluorowodór, dwutlenek węgla, dioksyny, furany (PCDD, PCDF), związki metali (Ba, Be, Na, K, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, As, Sr, V, Zn, Mo, Hg, Se, Ti), niemetale (Ca, Si), żużel, popiół lotny, amoniak
Niezupełne, niecałkowite spalanie	sadza, koksik, cenosfera, węgiel w żużlu i w popiele, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, lotne związki organiczne, benzo(a)piren, tlenek węgla, metan
Uboyczny produkt procesu spalania	termiczny tlenek azotu, cyjanowodór, aminy, podtlenek azotu (częściowo)

Obecnie można stwierdzić, że od strony techniczno-technologicznej jest prawie opanowane odsiarczanie, odpylanie i odazotowanie spalin. Ograniczeniem są wysokie koszty tych procesów. Punkt ciężkości w ograniczaniu emisji szkodliwych substancji z procesów energetycznych przesuwają się w kierunku ograniczania emisji CO₂, węglowodorów aromatycznych, sadzy oraz związków metali i niemetali.

Przy podejmowaniu strategicznych decyzji energetycznych należy uwzględnić w kategoriach ekonomicznych skutki emisji zanieczyszczeń powstałych w wyniku spalania paliw. Finansowa ocena strat ekonomicznych jest trudna ze względu na szeroki zakres zagadnień gospodarczych, zdrowotnych i społecznych. Istnieją różne sposoby określania współczynników strat ekologicznych. Przyjmując te współczynniki w wysokości 700 USD/t dla SO₂, 1500 USD/t dla NO_x i 200 USD/t dla pyłów [3] można było oszacować stratę ekologiczną w Polsce, która w odniesieniu do dochodu narodowego w okresie 1990÷1997 wynosiła 11÷6%. Straty te maleją w kolejnych latach, co wynika z coraz powszechniejszego oczyszczania spalin. W rozbiciu na źródła emisji to energetyka zawodowa i przemysłowa, gospodarka komunalna (ciepłownictwo) i transport samochodowy są źródłem emisji 70÷85% SO₂, 70÷90% NO_x, 55÷65% emisji pyłów i 100% emisji CO₂. W przyszłości udział energetyki i ciepłownictwa będzie maleć, rosnąć natomiast będzie udział transportu samochodowego w zanieczyszczaniu środowiska.

3. Sposoby i metody ochrony środowiska w energetyce

Istnieje wiele obszarów działalności inżynierskiej, których celem jest ograniczenie emisji szkodliwych substancji. Wybór przyjętej metody jest funkcją oczekiwanych rezultatów oraz kosztów. Logiczne wydaje się w pierwszej kolejności zapobiegać powstawaniu emisji, następnie spalać czyste paliwa, a dopiero gdy to nie daje oczekiwanych rezultatów, należy stosować inne droższe technologie proekologiczne.

3.1. Oszczędzanie energii

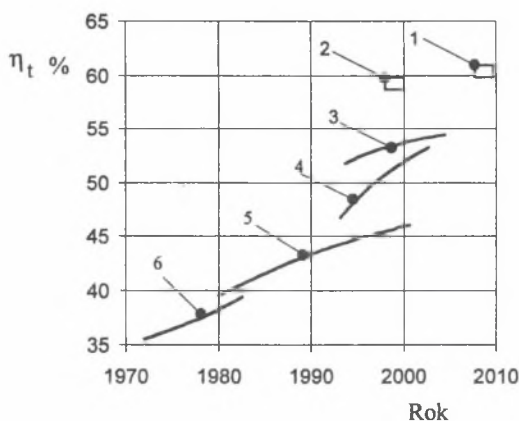
Oszczędzanie energii jest najlepszym sposobem ochrony środowiska naturalnego, gdyż daje równocześnie korzyści ekonomiczne i ekologiczne. Powinno się je realizować zarówno u konsumentów, jak i producentów energii. Oszczędzanie energii przez konsumentów jest w ostatnich latach skutecznie realizowane, a działania te można podzielić na następujące grupy:

- poprawa izolacyjności budynków, rurociągów i urządzeń,
- działania w obszarze transportu (poprawa organizacji, nowe generacje silników oraz układów przenoszenia napędu),
- nowe generacje technologiczne (np. niskoenergetyczne żarówki, podzielniki częstotliwości itd.),
- energooszczędne technologie.

Działania oszczędnościowe spowodowały w ostatnich latach znaczny spadek zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepłą zarówno w Polsce, jak i na świecie. Objawiło się to niewykorzystywaniem mocy produkcyjnej elektrowni. Cena energii elektrycznej w dekadzie 1990÷1999 była relatywnie najniższa w historii technicznej cywilizacji.

Oszczędzanie przez producentów energii jest realizowane przez wzrost sprawności energetycznej maszyn i urządzeń wytwarzających lub przetwarzających energię. Na przykład, sprawność energetyczna wodnych kotłów ciepłowniczych zmienia się w zależności od rodzaju kotła w przedziale 60÷94%. Dolne wartości odpowiadają węglowym kotłom ze stałym rusztem, górne odpowiadają gazowym lub olejowym kotłom z nowoczesną automatyką. Tak więc w obszarze ciepłownictwa istnieją duże potencjalne, stosunkowo proste możliwości poprawy sprawności kotłów, czyli zaoszczędzenia paliwa i środowiska naturalnego. Klasyczne kondensacyjne elektrownie w obecnej chwili są głównym źródłem energii

elektrycznej. W Polsce największą osiąganą sprawność ma elektrownia Opole i wynosi ona 38%. Wg opinii specjalistów Wspólnoty Europejskiej elektrownie krajów Europy Środkowo-Wschodniej mają średnią sprawność 28%. We Wspólnocie sprawność ta wynosi 37%. Istnieją więc duże potencjalne rezerwy w poprawie sprawności energetycznej na wschodzie Europy. Wzrost sprawności ponad 38% wymaga zastosowania obiegów ponadkrytycznych lub nowych, bardziej zaawansowanych technologii, do których należą technologie dwupaliwowe (gaz ziemny i węgiel), technologie węglowe w układach z turbinami gazowymi (IGCC) oraz technologie oparte na gazie ziemnym. W tych ostatnich sprawność dochodzi do 55%. Na rysunku 1 przedstawiono aktualny stan oraz prognozę zmian sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej. Wzrost sprawności netto do 55% możliwy jest w układach parowo-gazowych na gaz ziemny [6,7]. Pierwszą elektrownią działającą w oparciu o taki układ technologiczny jest elektrownia Ambarli (Turcja) o mocy sumarycznej 3 bloków 1350 MW i sprawności 52÷53%. Pod koniec 1999 r. będzie uruchomiony w Japonii pierwszy blok energetyczny o mocy 100 MW w oparciu o spalanie wodoru w tlenie (technologia WET-NET, sprawność ok. 60%) [7]. Należy podkreślić, że ciągniona sprawność wytwarzania energii elektrycznej z wodoru, tzn. elektrowni (~60%) i wytwarzania wodoru w procesie dysocjacji wody (~50%) wynosi ostatecznie ok. 30%. Jednakże podczas spalania wodoru z tlenem



Rys.1. Sprawność netto produkcji energii elektrycznej: 1 - ogniwa paliwowe, 2 - obieg WET-NET, 3 - układy parowo-gazowe na gaz ziemny, 4 - układy parowo-gazowe ze zgazowaniem węgla, 5 - bloki kondensacyjne (ciśnienia ponadkrytyczne), 6 - bloki klasyczne

Fig 1. Efficiency of net production of electric energy: 1 - fuel cells, 2 - WET-NET cycle, 3 - steam-gas cycle with natural gas, 4 - steam-gas cycle with coal gasification, 5 - power unit (supercritical pressure), 6 - classical power unit

emisje szkodliwych substancji typu SO_2 , NO_x , pył i CO_2 są zerowe. Następną generację urządzeń wytwarzających energię elektryczną stanowią układy z ogniwami paliwowymi, których sprawność przekracza 60% [8].

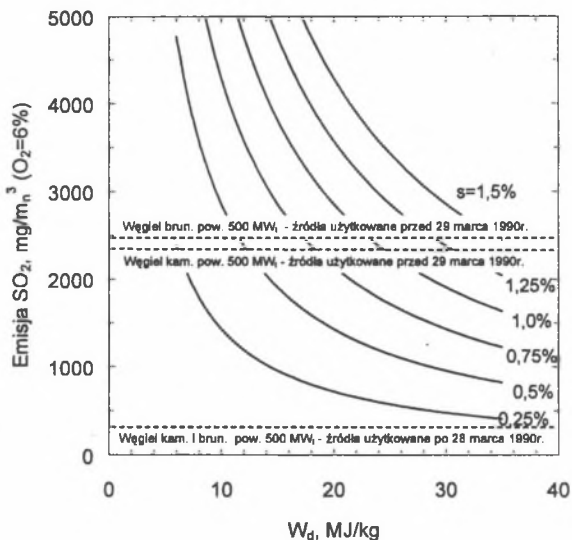
3.2. Czyste paliwo

Spalając czyste, częściowo odsiarczane i odpopielone paliwo można uniknąć budowy instalacji odsiarczania spalin. Usuwając część substancji mineralnej przy okazji zwiększa się wartość opałową paliwa. W świecie są znane i stosowane różne technologie wzbogacania węgla (tab.2). Rysunek 2 przedstawia wpływ wzbogacania na wskaźnik emisji SO_2 w paleniskach węglowych. Spalając niskosiarkowy węgiel można osiągnąć wskaźnik emisji poniżej maksymalnej dopuszczalnej wartości dla urządzeń działających (Dz.U. RP 98.121.793 z dnia 22 września 1998). Również w transporcie coraz częściej spala się czyste paliwa silnikowe [9].

Tabela 2

Technologie wzbogacania węgla [9]

Metody fizyczne		
Usuwana siarka piritowa i substancja mineralna	Tradycyjne	Wykorzystują różnicę gęstości (separacja grawitacyjna) lub własności powierzchniowych (flotacja) węgla i substancji mineralnej. Usuwają 30–50% siarki piritowej i do 60% substancji mineralnej.
	Nowe	Węgiel jest kruszony do znacznie mniejszych ziaren ($d_z < 0,1$ mm), przez co usuwa się więcej minerałów i piritów. Usuwają ponad 90% siarki piritowej i substancji mineralnej. Perspektywiczna jest metoda elektrostatyczna.
Metody chemiczne		Usuują do 90% siarki całkowitej i 90+99% substancji mineralnej.
Usuwana siarka piritowa, organiczna i substancja mineralna		Metoda perspektywiczna to działanie stopionej substancji zawierającej sód lub potas. Stosowane przy oczyszczaniu gazu ze zgazowania węgla.
Metody biologiczne		
Usuwana siarka całkowita (piritowa, organiczna i siarczanowa)		Wykorzystuje się bakterie (beztlenowe i tlenowe), grzyby lub enzymy, które trawią siarkę węglową.



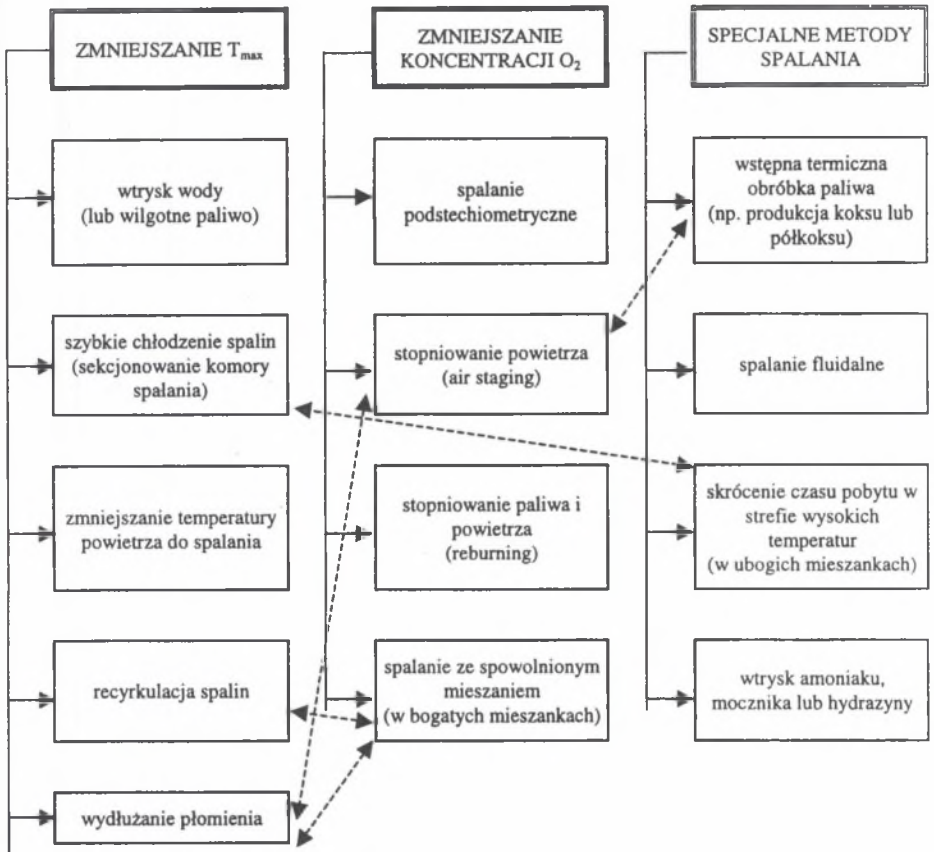
Rys.2. Wpływ wzbogacania węgla na emisję SO₂ z kotła
Fig 2. Influence of coal purification on the SO₂ emission

3.3. Pierwotne metody ograniczania emisji NO_x i SO₂

Pierwotne metody ograniczania emisji NO_x i SO₂ polegają na bezpośredniej ingerencji w proces spalania, tak by zminimalizować powstałą emisję.

Przedsięwzięcia pierwotne zmniejszania emisji NO_x stosuje się na etapie projektowania i budowy palników lub palenisk oraz przez wykorzystanie metod eksploatacyjnych. Biorąc pod uwagę mechanizmy powstawania NO_x metody ograniczające emisję podzielić można na trzy grupy technologiczne: zmniejszające maksymalną temperaturę, utrzymujące lokalną koncentrację tlenu na poziomie odpowiadającym stosunkowi nadmiaru w granicach 0,7÷0,9 oraz specjalne metody spalania (rys.3).

W przypadku spalania pyłu węglowego obniżanie emisji metodą zmniejszenia temperatury ma ograniczoną skuteczność, gdyż zdecydowana większość NO_x jest pochodzenia paliwowego. Modyfikacja procesu spalania polegająca na zmianach konstrukcyjnych palników i palenisk pyłowych jest uznawana za najbardziej skuteczny pierwotny sposób zmniejszania emisji NO_x. Działania te można pogrupować w następujące techniki lub technologie [9]:



Rys.3. Podział metod pierwotnych ograniczania emisji NO_x

Fig 3. Classification of primary methods of the decreasing of the NO_x emission

- Paliwki niskoemisyjne: celem ich jest niedopuszczenie do powstania dużej ilości NO_x. Osiąga się to przez stopniowanie powietrza (air staging) lub stopniowanie paliwa i powietrza (reburning) w płomieniu. Różnorodność konstrukcyjna palników niskoemisyjnych jest bardzo duża.
- Stopniowanie powietrza w komorze paleniskowej: metoda polega na rozdzieleniu powietrza wzdłuż wysokości komory paleniskowej (system OFA) lub w przekroju poprzecznym komory paleniskowej (system LNCFS). Atmosfera redukcyjna, jaka wystąpi bezpośrednio w obrębie płomienia, hamuje powstawanie NO_x.
- Recyrkulacja spalin: metoda polega na recyrkulacji spalin do powietrza spalania i jest dosyć efektywnym środkiem w procesach o wysokiej temperaturze spalania, a więc przy spalaniu gazu i oleju.

- Obniżenie temperatury powietrza do spalania: zmniejsza to maksymalne temperatury w płomieniu obniżając emisję termicznych NO_x . Stosuje się głównie w instalacjach gazowych i olejowych.
- Stopniowanie paliwa w komorze paleniskowej: polega na stosowaniu dodatkowego paliwa, najczęściej gazu palnego, wprowadzonego ponad głównymi palnikami (system MACT lub reburning).
- Doprowadzanie amoniaku lub mocznika do strefy ponadpłomieniowej: jest to tzw. selektywna niekatalityczna redukcja (SNCR) emisji NO_x . Amoniak lub mocznik wtryskuje się w zakresie temperatur $750\div 1150^\circ\text{C}$, przy czym temperatura iniekcji powinna być indywidualnie dobierana.

Tabela 3 przedstawia wartości stopnia redukcji przy zastosowaniu wyżej wymienionych modyfikacji procesu spalania. Są to wartości średnie uzyskane z różnych instalacji stosowanych w praktyce. Przy stosowaniu metod pierwotnych zmniejszania emisji NO_x pojawiają się negatywne skutki, szczególnie podczas spalania pyłu węglowego. Są to następujące zjawiska: żużlowanie komory paleniskowej, pogorszenie stabilności pracy palników, wzrost zanieczyszczeń powierzchni konwekcyjnych, erozja powierzchni konwekcyjnych, korozja wysokotemperaturowa i niskotemperaturowa, niezupełne i niecałkowite spalanie i wzrost temperatury wylotowej spalin. Ponadto istnieje konieczność zastosowania kompleksowej automatyki i sterowania pracą kotła.

Tabela 3

Efekty zmniejszania emisji NO_x metodami pierwotnymi

Sposób	Efekt redukcji %		
	Paliwo		
	Gaz	Olej ciężki/lekki	Węgiel
Recykulacja spalin	20-80	20-60/10-35	5-10
Palniki niskoemisyjne	20-60	20-40/10-50	10-80
Powietrze stopniowane (OFA, LNCFS)	10-40	10-40/10-40	10-50
Obniżona temperatura spalania	10-60	10-60/10-30	-
Użycie paliwa redukcyjnego (olej lub gaz)	30-50	10-50/10-50	10-50
Użycie amoniaku lub mocznika	-	30-80	30-80

Pierwotne metody zmniejszania emisji SO_2 polegają na doprowadzeniu do komory spalania sorbentu (CaCO_3 , MgCO_3 , Ca(OH)_2 , dolomit) w zakresie temperatur $750\div 1250^\circ\text{C}$. Sorbent można doprowadzać przez palnik wykorzystując tzw. trzecie powietrze (palnik LIMB) [10] lub, co ma miejsce częściej, ponad płomień. W literaturze spotyka się również

inne nazwy tej technologii (wysokotemperaturowa, w trakcie spalania, bezpośrednia, sucha lub „in situ”). Jej skuteczność jest rzędu 20÷50% lub 20÷70% przy $Ca/S=2÷4$ w zależności od dodatkowych zabiegów polegających na np. nawilżaniu wodą w skruberze poza komorą paleniskową lub recyrkulacji popiołu. Główną zaletą tej metody jest prostota układu technologicznego i niskie koszty inwestycyjne. Ponadto łatwa jest lokalizacja urządzeń w przypadku obiektów starych lub w ciasnych kotłowniach. Główne wady to stosunkowo mała skuteczność odsiarczania oraz znacznie większe zużycie wapnia w porównaniu z metodami mokrymi.

3.4. Wtórne metody ograniczania emisji NO_x i SO_2

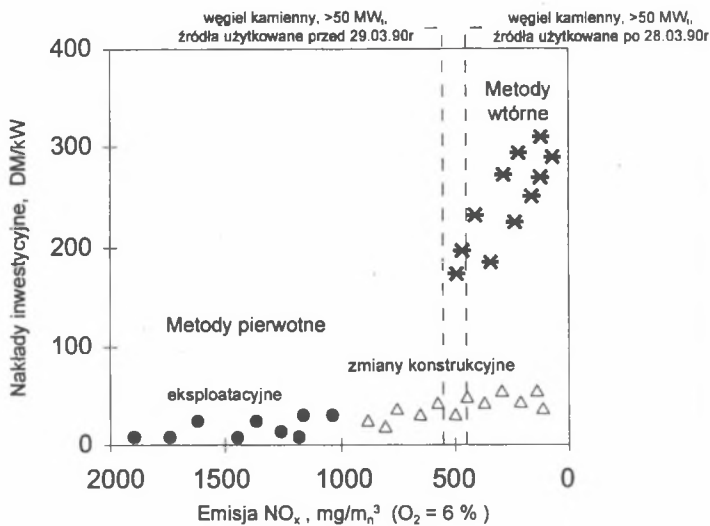
Metody wtórne ograniczania emisji zanieczyszczeń polegają na usuwaniu tych substancji z zimnych spalin, poza kotłem, najczęściej przed filtrem popiołu. Należą one do metod droższych inwestycyjnie oraz często również eksploatacyjnie.

Wtórne metody usuwania NO_x można podzielić na:

- metody suche (selektywna redukcja katalityczna, SCR, proces z wykorzystaniem węgla aktywowanego, proces usuwania NO_x i SO_2 przy użyciu wiązki elektronów, EBP, proces CORONOX z użyciem pulsującej elektrycznej komory, proces katalityczno-absorpcyjny DESONOX, inne),
- metody mokre (proces amoniakalno-ozonowy, proces oksydacyjno-absorpcyjny i inne).

Najbardziej rozpowszechniony jest proces SCR, w którym do redukcji NO_x używany jest amoniak w obecności katalizatora przy $t=280÷400^{\circ}C$. Katalizator wykonany jest na ogół z tlenku tytanu, wanadu lub wolframu. Proces jest realizowany w różnym wykonaniu, co wiąże się z różnymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Główne problemy eksploatacyjne to wycieki amoniaku i zatrucie katalizatora. Metody wtórne usuwania NO_x są na ogół skuteczniejsze (70÷95%) od metod pierwotnych. Z drugiej strony metody te są znacznie droższe inwestycyjnie od metod pierwotnych, co obrazuje rysunek 4.

Można zauważyć, że w przypadku zastosowania palników niskoemisyjnych łącznie z systemem OFA (czyli metod pierwotnych) skuteczność zmniejszania emisji NO_x jest porównywalna z metodami wtórnymi. Biorąc pod uwagę ten fakt oraz koszty inwestycyjne, metody wtórne odazotowania spalin nie znalazły poza Japonią szerokiego zastosowania. Jednakże biorąc pod uwagę tendencje ustawodawców do wprowadzania coraz ostrzejszych przepisów dotyczących emisji NO_x zastosowanie metod wtórnych będzie rosło.



Rys.4. Jednostkowe nakłady inwestycyjne na odazotowanie spalin

Fig 4. Unitary investment costs for denitration of flue gases

Wtórne metody zmniejszania emisji SO_2 polegają na usuwaniu SO_2 ze spalin poza kotłem, a przed wlotem do komina. Znanych jest kilkadziesiąt metod odsiarczania spalin. Praktycznie zastosowanie znalazło kilkanaście. Przy klasyfikacji tych metod bierze się pod uwagę różne kryteria. W energetyce najpopularniejszym kryterium jest podział wg stanu skupienia sorbentu. Na tej podstawie metody wtórne odsiarczania dzieli się na metody mokre i półsuche. Metoda mokra odsiarczania spalin polega na myciu spalin zawiesiną alkalicznego sorbentu wapiennego. Jako sorbent stosuje się najczęściej kamień wapienny lub kredę. Najczęściej spotyka się następujące parametry pracy instalacji: temperatura spalin (po odpyleniu) na wlocie do absorbera $130\div 180^\circ C$, temperatura spalin na wylocie $55\div 65^\circ C$ przy wilgotności względnej $\varphi=100\%$, wymagane jest podgrzewanie spalin przed wlotem do komina do $85\div 100^\circ C$, $Ca/S=1,05\div 1,3$ (w USA do 1,7), $pH=5\div 6$ w skruberze, czas pobytu w skruberze $10\div 15$ min, zawartość siarki w węglu $\leq 2,5\%$. Skuteczność odsiarczania dochodzi do 95% przy $Ca/S=1,3$, a produktem odpadowym jest uwodniony gips. Do głównych zalet metody mokrej wapiennej należą: stosunkowo wysoka skuteczność odsiarczania, prosty i sprawdzony w praktyce układ technologiczny, równoczesne dodatkowe odpylenie i usuwanie innych substancji (HCl, FCl, PCDD, itd.), odpad (gips) może być wykorzystany np. w budownictwie, łatwo dostępny i tani sorbent. Do głównych wad metody należą: wysokie koszty

inwestycyjne, niebezpieczeństwo zarastania aparatów i rurociągów, przydatność w zasadzie dla dużych obiektów, czułość na zmienny strumień spalin, konieczność zagospodarowania odpadu.

Metoda półsucha wapniowa polega na wykorzystaniu suszarki rozpyłowej jako reaktora do absorpcji z jednoczesną reakcją chemiczną SO_2 w kroplach roztworu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. W wyniku oddziaływania gorących spalin następuje odparowanie i wysuszenie w przestrzeni suszarki-absorbera produktów odsiarczania i nieprzereagowanych cząstek zawiesiny sorbentu. Produktem końcowym jest mieszanina siarczynu i siarczanu wapnia, nieprzereagowanego $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i CaO oraz lotnego popiołu. Skuteczność odsiarczania dochodzi do 90% przy $\text{Ca}/\text{S}=1,1+1,4$. W metodzie tej pożądane jest stosowanie filtrów workowych, gdyż sprzyja to wzrostowi skuteczności odsiarczania. Zaletą metody półsuchej jest prostota układu. Główną wadą jest konieczność stosowania wodorotlenku wapnia, a to podnosi koszty eksploatacyjne.

Inne metody odsiarczania spalin w energetyce nie znalazły szerokiego zastosowania bądź to ze względu na wysokie koszty inwestycyjne lub eksploatacyjne, bądź ze względu na problemy techniczne w ich realizacji. W RFN 90% instalacji odsiarczania spalin kotłowych to instalacje oparte na mokrych metodach wapiennych z produktem końcowym w formie gipsu, 7% to instalacje pracujące wg metod suchych, półsuchych wapiennych lub wapniowych. Pozostałe 3% stanowią jednostkowe instalacje, np. metody Wellman-Lord, Bergbau-Forschung, Walther, z handlowym produktem końcowym w formie ciekłego SO_2 , kwasu siarkowego lub siarczanu amonu. W USA dla nowych obiektów energetycznych preferowane są metody mokre wapienne i metody półsuche (~85%). Natomiast dla istniejących względnie starych obiektów mają zastosowanie raczej metody wapniowe lub wapienne suche i hybrydowe wapienne. Koszty odsiarczania spalin (inwestycyjne i eksploatacyjne) są znacznie zróżnicowane i uzależnione od wielu czynników.

Odpylanie należy do wtórnych metod oczyszczania spalin i uważa się, że jest ono technologicznie opanowane w dostateczny sposób dla schłodzonych spalin. W przypadku gorących spalin lub gorącego gazu palnego technologii odpylania są w trakcie badań i opracowywania.

3.4. Paleniska fluidalne

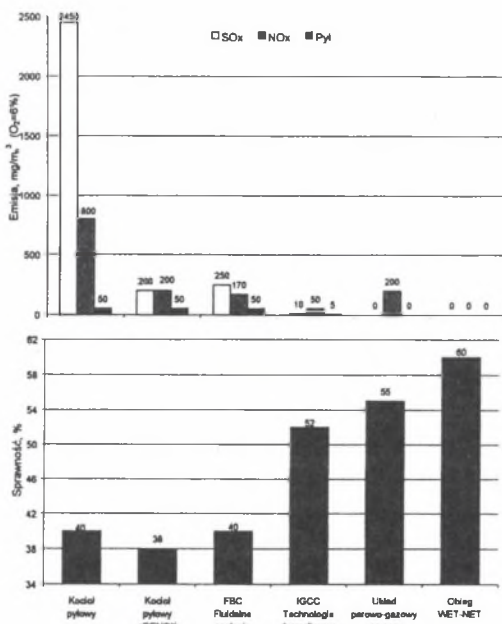
Spalanie fluidalne zostało rozwinięte jako pierwsza technologia czystego spalania, w której uzyskuje się równocześnie zmniejszenie emisji wszystkich podstawowych zanieczyszczeń bezpośrednio w palenisku. W warstwie fluidalnej ze względu na stosunkowo niską temperaturę ($800\div 950^{\circ}\text{C}$) istnieją korzystne warunki dla bezpośredniego (suchego) odsiarczania spalin oraz dla małej emisji termicznych NO_x . Stosując stopniowe doprowadzanie powietrza można osiągnąć emisję NO_x ok. $200\div 300\text{ mg/m}^3_n$ bez konieczności instalowania dodatkowych urządzeń. Dwutlenek siarki można usunąć ze spalin w 80-95% (przy $\text{Ca/S}=2\div 4$), w zależności od zawartości siarki, podając sorbent bezpośrednio do paleniska. Ponadto układ podawania sorbentu jest prosty i niezawodny oraz znacznie tańszy w porównaniu z technologią mokrego lub półsuchego odsiarczania. Nawet zastrzone normy środowiskowe mogą być stosunkowo łatwo i tanio dotrzymane przy zastosowaniu większej ilości wapnia lub metody SNCR z amoniakiem lub mocznikiem. Fluidalna technika spalania rozwinęła zasadnicze trzy podstawowe typy palenisk różniące się rodzajem warstwy fluidalnej:

- warstwa stacjonarna (pęcherzykowa) atmosferyczna; przeciętna moc bloku wynosi $15\div 100\text{ MW}_{el}$, największy kocioł zbudowano dla bloku 350 MW_{el} (el. Takehara, Japonia),
- warstwa cyrkulacyjna atmosferyczna; przeciętna moc bloków $30\div 110\text{ MW}_{el}$, maksymalna moc bloku $\sim 230\text{ MW}_{el}$ (el. Turów, Polska) oraz oferowana 400 MW przez firmę Foster Wheeler, USA,
- warstwa ciśnieniowa; do największych należy kocioł budowany przez firmę ABB o mocy 350 MW_{el} (el. Karita, Japonia).

Eksploatacja kotłów fluidalnych ujawniła szereg ograniczeń i problemów do rozwiązania. Generacja kotłów opartych na technice fluidyzacji cyrkulacyjnej pozwoliła zmniejszyć stratę chemiczną w koksiku. Obecnie wysiłki naukowców i konstruktorów zostały skierowane w stronę warstw cyrkulacyjnych ciśnieniowych w celu spalania i zgazowania różnych typów węgla, szczególnie niskiej jakości. Słabą stroną techniki fluidalnej jest złożoność technologiczna, wysoki koszt inwestycyjny oraz większa szkodliwość odpadów stałych.

4. Podsumowanie

Paliwa kopalne są i pozostaną przez najbliższe dziesięciolecia głównym źródłem energii oraz emisji szkodliwych substancji. Dlatego wysiłki badaczy i inżynierów skupiają się na zmniejszeniu uciążliwości procesów spalania dla środowiska. Rysunek 5 przedstawia porównawczo emisje i sprawności w procesach wytwarzania energii elektrycznej: klasyczny obieg z kotłem pyłowym, to samo wraz z odsiarczaniem i odazotowaniem, obieg ze spalaniem węgla w kotłach fluidalnych, obieg parowo-gazowy ze zgazowaniem węgla (IGCC), układ parowo-gazowy z gazem ziemnym oraz układ z wodorem jako paliwem (WET-NET). Wyraźnie widoczne jest, że najlepszym rozwiązaniem jest ten ostatni przypadek. Należy tu jednak wziąć pod uwagę fakt, że wodór nie występuje w przyrodzie w stanie naturalnym i jego wytwarzanie jest procesem energochłonnym. Również układy oparte na gazie ziemnym, układ IGCC oraz technologie dwupaliwowe mają dobre osiągi energetyczno-ekologiczne. Technologia oparta na kotłach fluidalnych (FBC) również wypada lepiej niż technologia z kotłem pyłowym. Wszystkie te technologie stwarzają szansę na czyste spalanie. Dlatego



Rys. 5. Emisje oraz przeciętna sprawność termiczna różnych technologii energetycznych
Fig 5. Emissions and thermal efficiency for different energetics technologies

między innymi powracające zainteresowanie węglem jako źródłem energii w przyszłości. Problemem staje się ograniczenie emisji CO₂. Pod tym względem najlepszym paliwem jest wodór. Również użytkowanie gazu ziemnego i węgla w technologii IGCC przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂ o ok. 18% przy sprawności potencjalnie do 55%.

Reasumując, można stwierdzić, że możliwa jest czysta energetyka. Rozwiązanie tego problemu w Polsce wymaga jednak dużych nakładów finansowych oraz zgody społeczeństwa na poniesienie tych nakładów. W ostatnich latach widać wyraźnie pozytywne tendencje w kierunku zmniejszenia uciążliwości energetyki dla środowiska w Polsce.

LITERATURA

1. Bemtgen I.: Clean Coal Technology for the 21th Century: RTD Strategy of the European Community. Second International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment, Lisboa, July, 1993 (nie publikowane).
2. Ruth L.A.: Advanced Coal-Fired Power Plants. RAN 98, 2nd International Symposium on Advanced Energy Conversion Systems and Related Technologies, Nagoya, 1-3.12.1998, s. 260-269.
3. Szargut J., Ziębik A., Koziół J., Janiczek R., Kurpisz K., Chmielniak T., Wilk R.: Racjonalizacja użytkowania energii w zakładach przemysłowych. Fundacja Poszanowania Energii, Warszawa 1994.
4. Wilk R.: Energetyka a ochrona środowiska. Materiały konferencyjne "Spalanie węgla'99", Ustroń-Zawodzie 1999, s. 77-88.
5. Słupek S.: Powstawanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania. Materiały konferencyjne „Niskoemisyjne techniki spalania”, Ustroń-Zawodzie 1996, s. 165-185.
6. Chmielniak T.: Główne tendencje rozwojowe czystych technologii węglowych w produkcji energii elektrycznej i ciepła. Konferencja "Fluidalne spalanie węgla", Politechnika Częstochowska, El. Turów, 1995.
7. Yoshiki H.: On R&D of Hydrogen Combustion Turbine in WET-NET Project. RAN'98, 2nd International Symposium on Advanced Energy Conversion Systems and Related Technologies, Nagoya 1-3.12.1998, s. 196-199.

8. Wanolt H., Bohme O., Leidich F.U.: Prozesstechnik von Brennstoffzen Uenkroftwerken der Karbonat - Schmelzentechnik. VDI Berichte 1029, 1993.
9. Spalanie paliw ze szczególnym uwzględnieniem procesów ekologicznych. Ekspertyza PAN, Wydz. IV, (red. J.Tomeczek), Warszawa 1992.
10. Jarosiński J.: Techniki czystego spalania. WNT, Warszawa 1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Ziębik

Abstract

This paper contains the summarizing review of different methods of air protection in the power industry. The interdependence between power industry and environment pollution was widely considered. It was shown that combustion processes are the main sources of anthropogenic pollution and are responsible for contamination of the environment. In the next part of this paper the technical manners and technological methods of environmental protection in energy industry were presented and discussed. Taking into consideration the utility and the level of investments costs, the saving of energy seems to be the best way of environmental protection. The new, high efficient combined cycles gas turbine (CCGT) also could be acceptable but unfortunately the relatively high investments costs causes real limitation in spreading of this technology. The applying of clean fuel technology is very convenient for environmental protection also. The next step is an application of primary methods depending on clean combustion and next secondary methods (wet or semiwet desulphurization and denitrogenation). These last methods are effective but the investment and operating costs are relatively high. Taking into account the thermal efficiency and simultaneously the degree of pollution abatement the WET-NET cycle with combustion of hydrogen-oxygen mixture is the best solution. Emissions of SO_2 , NO_x , dust and CO_2 in this technology is equal to zero.