
PRACE NAUKOWE GIG GÓRNICITWO I ŚRODOWISKO	RESEARCH REPORTS MINING AND ENVIRONMENT
Kwartalnik	Quarterly

3/2005

Paweł Pałamarczuk, Jan Koniecznyński**

EKOLOGICZNE WALORY STOSOWANIA KOTŁÓW FLUIDALNYCH W SEKTORZE KOMUNALNYM

Streszczenie

Powietrze atmosferyczne na terenie Śląska zostało silnie zanieczyszczone przez procesy przemysłowe w ciągu ostatniego stulecia. Artykuł wskazuje na korzyści wynikające ze stosowania spalania fluidalnego. Wspomniane korzyści mają charakter ekologiczny – możliwość utylizacji różnych paliw, w tym biomasy oraz paliw niskiej jakości przy zachowaniu surowych norm emisyjnych. Opisano sposób redukcji emisji podstawowych zanieczyszczeń. Stosowanie palenisk fluidalnych umożliwia poczynienie wielu oszczędności: od przygotowania paliwa, przez wysoko sprawne przetwarzanie energii.

Ecological features of using boilers with fluidized combustion bed in municipal sector

Abstract

The Silesian atmosphere has been polluted since last century with the industrial processes. The article shows profits coming off using fluidal combustion. Referred profits has an ecological character – it's possible to utilize different fuels: biomass and waste fuels with keeping rigour emission norms. The ways of reduction basic pollution substances were described. Using fluidized combustions makes possible savings on preparing fuel and transforming energy.

WPROWADZENIE

Spalanie ziaren węgla zawieszonych w strumieniu przepływającego powietrza, co stanowi istotę paleniska ze złożem fluidalnym, stwarza korzystne warunki dostępu tlenu do cząstek paliwa i zapewnia dużą intensywność spalania, przy niższej temperaturze, nie przekraczającej 1200 °K. Intensywność spalania przejawia się w wysokiej wartości obciążenia jednostki objętości paleniska. Wskutek tego, że w palenisku fluidalnym współczynnik wnikania ciepła od warstwy fluidalnej do powierzchni parownika jest kilkakrotnie większy w porównaniu z ciągiem konwekcyjnym w palenisku pyłowym, kocioł fluidalny o porównywalnej mocy jest mniejszy. Obniżenie temperatury spalania skutkuje ograniczeniem ilości powstających tlenków azotu, a duża intensywność wymiany masy na granicy fazy stałej i gazowej umożliwia wiązanie ditlenku siarki, chloro- i fluorowodoru przez dodatek alkalicznego addytywu do złoża fluidalnego w palenisku. Inną zaletą paleniska ze złożem fluidalnym jest możliwość spalania węgla o dużej zawartości substancji mineralnej i węgla z dodatkiem paliw z odpadów i biomasy.

* Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze.

Jeśli do tego dodać mniejszą energochłonność przygotowania paliwa (mniejsze rozdrobnienie węgla) okaże się, że zalety ekologiczne spalania w złożu fluidalnym są wielorakie i godne uwagi (Nowak 1998; Kordylewski (red.) 1999; Kucowski, Laudyn, Przekwas 1997; Topper, Cross, Goldthorpe 1994).

1. ZANIECZYSZCZENIE POWIETRZA PYŁEM W AGLOMERACJACH MIEJSKO-PRZEMYSŁOWYCH

Stężenie pyłu o wielkości ziarna nie przekraczającej 10 μm , czyli pyłu zawieszonego w powietrzu w aglomeracjach miejsko-przemysłowych w Polsce, jest znacznie wyższe w porównaniu z państwami zachodnioeuropejskimi, co potwierdza panujące przekonanie o wyraźnym odstawaniu od standardów obowiązujących w UE.

Obowiązująca w Polsce norma dopuszczalnego średniorocznego stężenia PM10, wynosząca 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, często jest przekraczana. W 2003 roku przekroczenie normy (1–2 razy) stwierdzono na 63% stanowiskach pomiarowych, a w woj. śląskim na 88% stanowisk. Norma dopuszczalnego średniodobowego stężenia PM10 wynosi 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Jak wykazują badania, z przejściowym, malejącym marginesem tolerancji, była przekraczana z niedopuszczalną częstością w miastach woj. śląskiego.

Nadmierne stężenie pyłu w powietrzu powoduje wyraźne obniżenie natężenia promieniowania słonecznego, w widzialnej i nadfioletowej części widma, docierającego do powierzchni Ziemi, o ponad 10%. Zawarte w ziarnach pyłu, lub obecne na powierzchni ziaren pyłu, zwłaszcza w przedziale respirabilnym, związki metali ciężkich, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i dioksyny powodują narażenie ludności na pogorszenie zdrowia. Wyniki badań toksykologicznych potwierdzają coraz większe znaczenie substancji śladowych zawartych w pyłach. Niepokojąco wysokie stężenie benzo(a)pirenu w powietrzu w miastach woj. śląskiego, przekraczające wielokrotnie normę średnioroczną jest związane z nadmiernym stężeniem pyłu zawieszonego, pochodzącego ze spalania paliw (Koniecznyński, Pasoń-Koniecznyńska 2004).

Szkodliwe oddziaływanie pyłu dotyczy zarówno powietrza zewnętrznego, jak i wewnętrznego. Pod względem wielkości stężenia frakcji respirabilnej środowisko wewnętrzne nie różni się od zewnętrznego (Pastuszka 2001).

Istotną przyczyną niskiej jakości powietrza atmosferycznego jest wtórne pylenie występujące z dużą intensywnością w miastach, zwłaszcza wzdłuż tras komunikacyjnych i spowodowane porywaniem najmniejszych ziaren pyłu osiadłego, głównie wskutek ruchu pojazdów.

2. UDZIAŁ ENERGETYCZNEGO SPALANIA WĘGLA W ZANIECZYSZCZENIU POWIETRZA PYŁEM W POLSCE

Utrzymujące się od wielu lat nadmierne wysokie stężenie pyłu zawieszonego w powietrzu na obszarach miejsko-przemysłowych jest powodem zainteresowania źródłami emisji pyłu, jego składem ziarnowym, mineralogicznym i chemicznym oraz

morfologią. Posiadana wiedza i doświadczenie uzasadniają pogląd, że energetyczne spalanie stałych paliw w kotłowniach i ciekłych paliw węglowodorowych w silnikach pojazdów samochodowych, przyczyniają się w decydującym stopniu do zanieczyszczenia powietrza. Szczególnie duży udział węgla kamiennego jako paliwa w Polsce uzasadnia prowadzenie dokładnych badań nad składem produktów spalania węgla. Niezadowalająca jakość powietrza w dużym stopniu wynika ze szczególnie niekorzystnej struktury zużycia pierwotnych nośników energii, wśród których dominuje węgiel, zwłaszcza kamienny.

Jeszcze w latach 80. ubiegłego wieku udział węgla wynosił 79%, a gazu ziemnego i paliw ciekłych pochodzących z przeróbki ropy naftowej około 20% (łącznie). Obecnie (dane z 2003 r.) udział węgla kamiennego i brunatnego wynosi 64%, podczas gdy udział wymienionych paliw gazowych i ciekłych stanowi 31,1%. Chociaż monokultura węglowa odchodzi w przeszłość, nadal w Polsce struktura zużycia pierwotnych nośników energii odbiega od tej, która jest w Europie Zachodniej, gdzie udział węgla wynosi mniej niż 19%, a paliw gazowych i płynnych ponad 63%.

Krajowe wydobycie węgla kamiennego, w 2003 roku wynoszące 102,9 mln Mg wraz z niewielkim importem – 2,5 mln Mg, pokrywało zużycie krajowe, które wynosiło 83,1 mln Mg (głównie procesy przetwarzania na inne nośniki energii – 66,3 mln Mg, w tym około 52,5 mln Mg zużycia w elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach). Z kolei 60,9 mln Mg wydobytego węgla brunatnego zużyto w kraju, niemal w całości w energetyce zawodowej. Ten stan rzeczy kształtuje strukturę emisji pyłu w Polsce. Ocenia się, że na 473 tys. Mg pyłu wprowadzonego do powietrza ze wszystkich źródeł 301 tys. Mg, a więc blisko 64%, pochodziło ze spalania paliw, głównie węgla.

Należy jednak podkreślić, że w ostatnich latach w Polsce postępuje w szybkim tempie spadek emisji pyłu z dużych obiektów należących do energetyki zawodowej, wyposażanej w coraz skuteczniejsze elektrofiltry, zapewniające stężenie pyłu w odpylonych spalinach nie wyższe od 50 mg/m^3 . Jeśli dodać, że w największych elektrowniach zainstalowano absorbery do odsiarczania spalin, spełniające dodatkowo funkcję odpylacza drugiego stopnia, staje się zrozumiałe, że rzeczywiste stężenie pyłu w spalinach kierowanych do atmosfery jest jeszcze dwu- a nawet trzykrotnie mniejsze. W odróżnieniu od energetyki zawodowej, stosującej kotły z paleniskami pyłowymi, w energetyce ciepłej komunalnej i zakładowej używa się kotłów z rusztem mechanicznym, wyposażonych w cyklony pojedyncze lub bateryjne. Ze względu na trudną do przekroczenia granicę skuteczności cyklonu, wynosząca 85%, wskaźnik emisji pyłu, wyrażony w masie pyłu przypadającej na Mg spalonego węgla jest wielokrotnie wyższy w porównaniu z paleniskami pyłowymi w dużych elektrowniach. Okolicznością pogorszającą sytuację jest zlokalizowanie obiektów energetyki komunalnej i zakładowej w dzielnicach mieszkaniowych lub w sąsiedztwie osiedli przyfabrycznych, a także znacznie niższe emitory wprowadzające spaliny do atmosfery (Koniecznyński, Pason-Koniecznyńska 2004).

W celu szybkiego zatrzymania degradacji powietrza planuje się przedsięwzięcia inwestycyjne, organizacyjne i w zakresie zagospodarowania przestrzennego [10], a wśród nich: wprowadzanie do eksploatacji instalacji opartych o niskoemisyjne techniki spalania paliw, budowę lokalnych systemów pracujących w układach kogeneracji z wykorzystaniem energii odnawialnej.

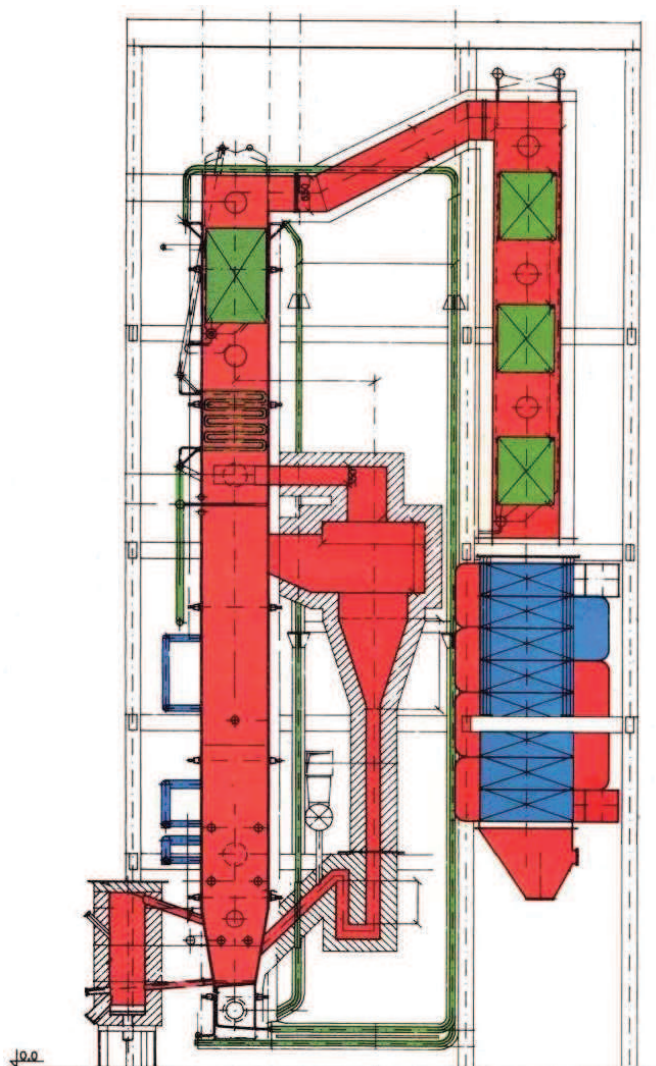
3. CHARAKTERYSTYKA KOTŁA Z PALENISKIEM FLUIDALNYM

Historia procesów fluidalnych sięga 1921 roku, kiedy Fritz Winkler zauważył, że ruch ziarenek pod wpływem strumienia powietrza przypomina wrzenie cieczy. Procesy fluidalne zastosowano w latach 60. XX wieku, jednak nie w celu spalania paliw stałych, lecz w procesach katalitycznego krakingu w przemyśle petrochemicznym. Dopiero na początku lat 80. uruchomiono pierwsze paleniska z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym w obiektach energetycznych. Przemysłowe zastosowania tej technologii wiążą się z firmami: Ahlstrom, Foster Wheeler i ABB. W Polsce duże osiągnięcia ma na tym polu Fabryka Kotłów Rafako w Raciborzu [13]. Obecnie technologia fluidalna jest najlepszym sposobem utylizacji węgla w energetyce. Technologia spalania w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym (CWF ang. CFB – *circulating fluidized bed*) znalazła szerokie zastosowanie w energetyce. Obok innych zalet umożliwia ona sprostanie wymogom emisyjnym podczas spalania paliw niskiej jakości.

Komora spalania w kotle z CWF bardzo różni się od tych, jakie są znane z kotłów rusztowych czy pyłowych. Dostarczane do paleniska ziarna paliwa o średnicy nie większej niż 6 mm są zawieszane w strumieniu gazów. Ze względu na zróżnicowanie średnic ziaren dostarczanego paliwa w warstwie fluidalnej dochodzi do segregacji. Grubsze ziarna pozostają w dolnej części warstwy, mniejsze są unoszone do góry. Układ nawrotu, oddzielając gazy spalinowe od części stałych, pozwala na zatrzymanie drobnych, niedopalonych frakcji oraz addytywów i skierowaniu ich ponownie do paleniska. Wydzielone w cyklonie palące się ziarna węgla przed ponownym przedostaniem się do paleniska ulegają wygaszeniu.

Proces ma charakter periodyczny – w pierwszym cyklu węgiel zostaje odgazowany, a części lotne spalone, w następnych następuje już tylko dopalenie części stałych. Ziarna cyrkulują w układzie tak długo, jak długo cyklon nawrotu może je wydzielać. W rezultacie następuje wydłużenie realnego czasu pobytu paliwa w palenisku i osiąga się wysoki stopień wypalenia (ponad 99%). Układ nawrotu może znajdować się na zewnątrz komory paleniska (rys. 1) albo, w nowszych konstrukcjach, centralnie w jej wnętrzu (rys. 2).

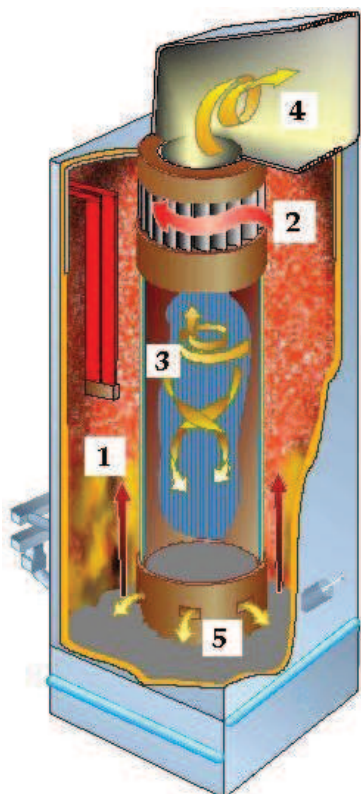
Wewnątrz komory spalania występuje podział na strefy redukcji i dopalenia, uzyskany dzięki podziałowi powietrza na pierwotne i wtórne. Prędkość przepływu powietrza pierwotnego, zwanego też powietrzem nośnym, wewnątrz komory paleniskowej musi być odpowiednio duża, aby mogło powstać złożo fluidalne. Zbyt duża prędkość przyczynia się do erozji powierzchni ogrzewalnych kotła, zatem nie powinna przekraczać 6 m/s. Powietrze wtórne jest wdmuchiwane do górnej części warstwy.



Rys. 1. Schemat kotła z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym i zewnętrznym układem nawrotu
Fig. 1. A layout of kettle with a circulating fluid bed and with an external returning arrangement

Intensywność wymiany energii i masy w warstwie ułatwia spalanie, pozwala na zmniejszenie wymiarów komory paleniskowej oraz na obniżenie temperatury spalania najczęściej do 850–870 °C. Dodatkowym atutem jest ustalony rozkład temperatury wzdłuż całej komory spalania.

Z chemicznego punktu widzenia relatywnie niska temperatura ogranicza powstawanie termicznych tlenków azotu, a jednocześnie zapewnia stabilność reakcji wiązania powstającego dwutlenku siarki przez podawany sorbent. Z fizycznego punktu widzenia nie powoduje mięknięcia ani topienia popiołu, dzięki czemu nie występują problemy z żużłowaniem, a powierzchnie kotłowe nie zarastają.



Rys. 2. Schemat kotła z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym i wewnętrznym układem nawrotu (CYMIC): 1 – powietrze nośne, 2 – wlot na kierownicę gazów, 3 – wir zstępujący i wstępujący w cyklonie, 4 – wylot spalin z cyklonu, 5 – nawrót materiału zatrzymanego w cyklonie

Fig. 2. A layout of kettle with a circulating fluid bed and with an external returning arrangement (CYMIC): 1 – carrier air, 2 – inflow to gases guide apparatus, 3 – descending and ascending whirl in cyclone, 4 – outlet of fumes from cyclone, 5 – return of material stopped in cyclone

Konstrukcja paleniska z CWF sprzyja utylizacji paliwa gorszej jakości o wartości opałowej od około 6300 kJ/kg, bez odbioru ciepła z warstwy fluidalnej i od około 13 000 kJ/kg z odbiorem ciepła. Takim paliwem mogą być: węgiel o dużej zawartości substancji mineralnej, węgiel brunatny, torf, przetworzone odpady komunalne (RDF), zużyte opony (TDF), mączka mięsno-kostna, odpady z instalacji wzbogacania węgla i biomasa. Na podstawie przeprowadzanych badań ustalono, że graniczny stosunek węgla do paliw alternatywnych podawanych do spalania wynosi 1:1. Samo doprowadzenie paliwa do kotła też jest proste i nie następuje dużych problemów technologicznych. Dosyć szeroko stosowanym rozwiązaniem jest doprowadzenie w postaci pasty mieszaniny węgla, sorbentu, balastu i wody (25–30%).

Nakłady finansowe niezbędne do budowy instalacji CWF są podobne do ponoszonych przy budowie instalacji z paleniskami pyłowymi, ale w przeciwieństwie do palenisk pyłowych nie jest potrzebna kosztowna instalacja młynów do mielenia węgla. Procesy przygotowania paliw są energochłonne, a ich udział w kosztach produkcji energii jest niemały. Paleniska fluidalne nie wymagają tak drobnych ziaren, więc można poprzestać na kruszeniu, a w przypadku dostaw miałów energetycznych dalsze rozdrabnianie nie jest konieczne. Pozwala to oszczędzić, co najmniej 10 kWh/Mg spalane go węgla.

4. REDUKCJA EMISJI SUBSTANCJI ZANIECZYSZCZAJĄCYCH Z KOTŁÓW FLUIDALNYCH

Spalanie paliw jest źródłem wielu zanieczyszczeń wpływających negatywnie na wszystkie elementy środowiska naturalnego (powietrze, woda, gleby, organizmy żywe). Cechą charakterystyczną paleniska fluidalnego jest mniejsza w porównaniu z paleniskiem pyłowym emisja podstawowych gazowych substancji zanieczyszczających powietrze: tlenków azotu i siarki, chloro- i fluorowodoru. Do najważniejszych substancji zanieczyszczających należą tlenki azotu, przede wszystkim tlenek NO i niewielkie ilości NO₂ (ok. 5%).

W trakcie spalania węgla, w wyniku endotermicznej reakcji między tlenem i azotem znajdującymi się w powietrzu wprowadzanym do spalania, tworzy się tlenek azotu



Ilość wytwarzanego tlenku azotu zależy od temperatury procesu spalania, rosnąc szybko wraz ze wzrostem temperatury. Ten rodzaj tlenku azotu nosi nazwę termicznego. W węglu występują także organiczne związki azotu: pirol i pirydyna. Zawartość azotu obecnego w związkach chemicznych zawierających ugrupowania azotu, w węglu wynosi od 0,5 do 2% wag., zwykle około 1,4% w węglu energetycznym. W czasie spalania następuje utlenianie azotu i powstaje paliwowy tlenek azotu. Część azotu zawartego w paliwie utlenia się w przedniej części płomienia i tworzy natychmiastowy tlenek azotu. Paliwowy tlenek azotu pojawia się w spalinach już przy relatywnie niskich temperaturach spalania, natychmiastowy dopiero w wyższych temperaturach, przekraczających 1500 K (Koniecznyński 2004). Wspomniane wyżej bardzo dobre mieszanie substratów w fluidalnym palenisku i wprowadzanie niezbędnej ilości powietrza wtórnego w strefie utleniającej pozwalają osiągnąć pełne spalanie paliwa już w temperaturze około 1100 K, a więc o 400 K niższej od panującej w typowym palenisku tradycyjnym. Obniżenie temperatury spalania i redukcyjne warunki panujące w niższej strefie złoża fluidalnego powodują zmniejszenie ilości powstających tlenków azotu do poziomu określonego stężeniem 130–170 mg/m³_n, a więc kilkakrotnie niższego w porównaniu ze zwykłym kotłem (500–1400 mg/m³_n). Zwraca się jednak uwagę, że w specyficznych warunkach panujących wewnątrz komory CWF dochodzi do syntezy relatywnie znacznych ilości N₂O (stężenie w spalinach przekracza 30 ppm, co odpowiada około 30% wszystkich NO_x).

Podczas spalania węgla utlenieniu ulegają związki siarki zawarte w paliwie i w postaci gazowego SO₂ uchodzą wraz z gazami odlotowymi. W warunkach panujących w palenisku fluidalnym utlenieniu ulega piryt (FeS₂) i organiczne związki siarki zawarte w węglu: tiofen, dibenzotiofen, tiole i siarczki. Powstający ditlenek siarki wiąże się, wykorzystując chemisorpcję, na drodze kontaktu z addytywem, w rodzaju wapniaka lub dolomitu, wprowadzanym z rozdrobnionym węglem do paleniska fluidalnego. W wyniku kalcynacji następuje rozkład węglanów i tworzy się tlenek wapniowy lub magnezowy. W przypadku węglanu wapnia reakcja ma przebieg przedstawiony w reakcji 1.

Kalcynacja wapniaka przebiegająca w warunkach panującej w palenisku temperatury przyczynia się do wzrostu powierzchni właściwej wskutek powstania znacznej liczby mikroporów, co sprzyja wzrostowi reaktywności addytywu.

Wprowadzenie wapienika o czystości, co najmniej 80% (zawartości CaCO_3), zmielonego do ziarna mniejszego od 0,7 mm do paleniska fluidalnego powoduje, że tlenki siarki łatwo wiążą się z tlenkiem wapnia. Sprzyjające utlenianiu warunki sprawiają, że w produktach reakcji dominują siarczany wapnia (2). Tlenek wapnia reaguje nie tylko z tlenkami siarki, lecz także z chlorowodorem i fluorowodorem (3 i 4). Zawarte w węglu związki chloru i fluoru, głównie nieorganiczne, występują w ilościach co najmniej o rząd mniejszych niż związki siarki, jednak ich obecność nawet w takiej ilości stwarza nie mniejsze zagrożenie niż SO_2 . Przez podanie sorbentu udaje się związać 55–75% chloro- i fluorowodoru unoszonych z paleniska.



Głównym jednak celem wprowadzania addytywu jest odsiarczanie spalin.

Ziarna sorbentu cyrkulują razem z paliwem, przez co zwiększa się ich czas pobytu w kotle. Niekiedy w strefach redukcyjnych komory spalania powstają CaSO_3 oraz CaS , które jednak łatwo ulegają utlenieniu do CaSO_4 .

Do najważniejszych parametrów, które decydują o skuteczności odsiarczania można zaliczyć: czas pobytu ziaren sorbentu, reaktywność sorbentu i jego skład chemiczny, rozkład strefy redukcyjnej i utleniającej w komorze paleniskowej, temperatura w komorze spalania, skład frakcyjny ziaren sorbentu (Żbik 2002).

Podstawowymi parametrami określającymi właściwości wapienika są wskaźniki reaktywności i sorpcji bezwzględnej oraz stopień przereagowania:

RI – wskaźnik reaktywności określający stosunek molowy Ca/S.

CI – wskaźnik sorpcji bezwzględnej określający ilość siarki w gramach związanej przez kilogram badanego wapienia, (g S/kg).

Tablica 1. Wskaźniki reaktywności oraz sorpcji bezwzględnej sorbentów wapiennych

Ocena wapienia	RI	CI
Znakomity	< 2,5	> 120
Bardzo dobry	2,5–3	100–120
Dobry	3–4	80–100
Dostateczny	4–5	60–80
Niskiej jakości	> 5	< 60

Wprowadzanie addytywu zapewnia nie tylko usuwanie powstającego podczas spalania SO_2 , HCl , i HF , lecz także, zapobiegając nadmiernemu przerostowi temperatury, pozwala na precyzyjne sterowanie procesem.

Stosunek Ca/S mieści się w granicach 2,5–3,5, przy skuteczności odsiarczania na poziomie 90%, co oznacza, że stopień przereagowania addytywu wynosi 25–35%.

Zużycie wapniaka może być mniejsze, jeśli popiół spalanego węgla zawiera dużo tlenków wapnia, magnezu, sodu i potasu. Przypadek taki występuje przy spalaniu niektórych węgla kamiennych.

Należy pamiętać, że dodatek sorbentu do paleniska cyrkulacyjnego bezpośrednio wpływa na skład ziarnowy warstwy fluidalnej, tym samym na aerodynamikę komory paleniskowej oraz przebieg procesów wymiany energii i masy, decydujących o przebiegu spalania oraz zasiarczania sorbentu.

Wprowadzenie addytywu i tworzenie się stałych produktów odsiarczania zwiększa ilość odpadów, ponieważ obok popiołów pojawia się siarczan wapniowy, nieprzereagowane wapno i mineralne zanieczyszczenia kamienia wapiennego, a także chlorek i fluorek wapnia. Wzrost ilości odpadów sięga nawet 40%, co jest mankamentem tej metody. Tym bardziej, że wzrost zawartości CaO w składowanych odpadach powoduje wzrost pH odcieków ze składowisk. Opracowano więc sposoby wykorzystania popiołów z kotłów fluidalnych jako podłoża do budowy dróg lub półproduktu do wyrobu sztucznego kruszywa.

Niezbędne są działania prowadzące do optymalizacji zużycia i wykorzystania sorbentów. W przypadku skuteczności odsiarczania spalin, próba przekroczenia bariery 90% wiązania SO₂, oznacza drastyczny wzrost stosunku Ca/S. Powoduje to obniżenie sprawności kotła (różnica między rosnącym ciepłem kalcynacji a ciepłem reakcji zasiarczania), wzrost strat wylotowych w następstwie zwiększonych ilości popiołów wyprowadzanych z kotła oraz zwiększenie kosztów zagospodarowania odpadów. Innym negatywnym efektem wzrostu ilości związków wapnia w palenisku jest zwiększona emisja NO_x. Stwierdzono, że wzrost Ca/S powyżej 3 wyraźnie zwiększa ilość powstających NO_x, ponieważ nadmiar wolnego CaO wpływa katalitycznie na tworzenie się tlenków azotu (Bis, Radecki 2002). Dążąc do obniżenia NO_x przez zmniejszenie nadmiaru powietrza dostarczanego do spalania należy się liczyć ze wzrostem ilości CO. Zatem kontrola powstających w palenisku CWF zanieczyszczeń wymaga koordynacji działań oraz uwzględnienia kompromisu.

5. EKOLOGICZNE EFEKTY GOSPODARKI SKOJARZONEJ Z UDZIAŁEM KOTŁÓW FLUIDALNYCH

W nowoczesnych elektrociepłowniach procesy cieplne są realizowane w układzie skojarzonym. Głównym produktem jest ciepło, a pozyskiwana energia elektryczna jest produktem ubocznym. Wielkość popytu na ciepło determinuje lokalizację oraz wielkość siłowni. Korzyść wynikająca ze skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej polega na tym, że sprawność łączna, definiowana jako stosunek sumy efektów użytecznych do entalpii napędowej jest większa niż wyliczona sprawność łączna produkcji rozdzielonej. Ilość energii chemicznej paliw pierwotnych, jaka może być zaoszczędzona w skali globalnej dzięki skojarzeniu, jest jednym z najistotniejszych wskaźników porównawczych

$$- \Delta \dot{E}_{ch} = \dot{E}_{ch})_R - \dot{E}_{ch})_S > 0 \quad (6)$$

Fizyczny sposób powiązania jest dla odbiorcy nieistotny, największe znaczenie ma zmniejszenie kosztów jednostkowych produkcji. Pod względem termodynamicznym, na skutek skojarzenia, zostają zmniejszone straty egzergii przez jednoczesne realizowanie procesów spełniających różne zadania energetyczne i technologiczne. Skumulowaną oszczędność energii chemicznej paliwa oblicza się, porównując zużycie w gospodarce rozdzielonej i skojarzonej, przy założeniu stałych ilości ciepła grzejjego i energii elektrycznej dostarczanych do odbiorców (Szargut, Ziębik 2000). Dla celów obliczeniowych wzór przyjmuje następującą postać

$$-\Delta E_{ch} = \frac{1}{\eta_d} \left[Q_o \left(\frac{1}{\eta_{Ekc} \eta'_{pc}} - \frac{1}{\eta_{Eec} \eta_{pc}} \right) + E_{elo} \left(\frac{1}{\eta_{Ek} \eta'_{tp}} - \frac{1}{\eta_{Eec} \eta_{tp} (1 - \varepsilon)} \right) \right] \quad (7)$$

gdzie:

- η_d – skumulowana sprawność dostawy paliwa (0,97),
 - η_{Ekc} – średnia sprawność energetyczna ciepłowni (0,8),
 - η'_{pc} – sprawność przesyłania ciepła z ciepłowni (0,85),
 - η_{Eec} – sprawność energetyczna elektrociepłowni (0,85),
 - η_{pc} – sprawność przesyłania ciepła z elektrociepłowni (0,85),
 - η_{Ek} – sprawność energetyczna elektrowni (0,36),
 - η'_{tp} – sprawność przesyłania energii elektrycznej z elektrowni (0,92),
 - η_{tp} – sprawność przesyłania energii elektrycznej z elektrociepłowni (0,92),
 - ε – wskaźnik potrzeb własnych elektrociepłowni,
 - Q_o, E_{elo} – zapotrzebowanie ciepła i energii elektrycznej loco odbiorca.
- W nawiasach podano wartości przyjęte w obliczeniach.

Na przykładzie jednej z elektrociepłowni wyposażonej w kocioł fluidalny obliczono, że oszczędność energii chemicznej, dzięki wykorzystaniu układu kogeneracyjnego wyniosła w 2004 roku około 800 TJ. Aby oszacować efekt ekologiczny skojarzonej gospodarki energetycznej można posłużyć się sposobem obliczeń zastosowanych przy ocenie uciążliwości produkcji energii elektrycznej (Malina, Koniecznyński 2004). Jeśli skumulowany wskaźnik energochłonności produkcji energii elektrycznej wynosi 11,4 MJ/kWh to z 800 TJ energii chemicznej można wyprodukować 70175 MWh energii elektrycznej. Przyjmując za (Malina, Koniecznyński 2004), że w rachunku sekwencyjnym produkcja 1 MWh energii elektrycznej powoduje skumulowaną emisję zanieczyszczeń powietrza odpowiadającą 15,055 kg SO₂ (emisja zastępcza) skojarzona gospodarka energetyczna w przykładowej elektrociepłowni zapobiega emisji 1056 Mg SO₂ (emisja zastępcza). Oszczędność energii wskutek wyeliminowania przemiału węgla, określona na 10 kWh/Mg przekłada się w omawianym przykładzie na oszczędność około 5000 MWh, co oznacza wyeliminowanie dalszych 75 Mg SO₂ (emisja zastępcza).

Należy podkreślić, że warunkiem koniecznym do zastosowania układu skojarzonego jest odpowiednio duże i stabilne zapotrzebowanie na każdy z produktów.

6. SPALANIE PALIW ODNAWIALNYCH A REDUKCJA CO₂

W wyniku spalania paliw węglowodorowych powstaje dwutlenek węgla. Duże stacjonarne źródła emitują ponad 30% całości dwutlenku węgla, pochodzącego ze spalania paliw kopalnych. Największą jednostkową emisją CO₂, wyrażoną w kg/GJ, charakteryzuje się węgiel brunatny, jest ona o 7% większa w porównaniu z węglem kamiennym. W ciągu najbliższych lat Polska jest zobowiązana do redukcji emisji gazów cieplarnianych, a wśród nich CO₂, co wynika z przyjęcia deklaracji z Kioto. Pod względem technologicznym i technicznym nie ma przeszkód, aby dwutlenek węgla ze spalin energetycznych wydzielać i po skropleniu trwale składować w głębi oceanów. Należy jednak liczyć się, że spowoduje to spadek sprawności wytwarzania energii nawet o 33% i wzrost kosztów energii o 40%.

W przyjętych założeniach polityki energetycznej państwa do 2025 roku, mającej zapewnić bezpieczeństwo energetyczne, poprawę konkurencyjności oraz ochronę środowiska przed negatywnymi skutkami oddziaływania energetyki, przewiduje się stopniowy wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych. Zaletą biomasy jako paliwa jest stabilizowanie ilości CO₂ w atmosferze. Wynika to z faktu zamknięcia obiegu węgla C. Wskutek fotosyntezy węgiel C zawarty w atmosferycznym CO₂ staje się budulcem tkanek roślinnych. Po obumarciu roślin, wskutek procesów rozkładu dochodzi do uwolnienia CO₂. Spalenie biomasy jako paliwa też uwalnia CO₂, przynosi jednak pożytek w postaci energii.

Biomasa obejmuje wszelką substancję organiczną pochodzącą z roślin lub zwierząt, jak również substancje uzyskane z przetworzenia surowców roślinnych lub zwierzęcych.

Tablica 2. Rodzaje biomasy

Pochodzenie roślinne	Pochodzenie zwierzęce
Słoma z produkcji zbożowej	Biogaz z fermentacji gnojowicy
Odpady drzewne	Biogaz z fermentacji osadów
Odpady z przemysłu celulozowo-papierniczego	Biogaz z fermentacji odpadów na wysypisku śmieci
Makulatura	Obornik

Wartość opałowa biomasy w dużym stopniu zależy od zawartości wilgoci. Na przykład wartość opałowa sosny, gatunku drzewa dominującego w Polsce, może zawierać się w granicach od 11 MJ/kg (80% wilgotności) do 18 MJ/kg (15% wilgotności). W przypadku mączki mięsno-kostnej waha się ona w granicach 17,5–20 MJ/kg. Można przyjąć, że dwie tony biomasy są równoważne jednej tonie węgla (Nowak, Sekret 2001).

Próby współspalania węgla i biomasy były przeprowadzane z powodzeniem w kilku krajowych elektrociepłowniach i elektrowniach. Wymagało to jedynie dobudowania linii przygotowania i podawania biomasy.

Potencjalne światowe zasoby biomasy oszacowane według różnych źródeł od 128 do 810 PJ/rok są ogromne, choć obecnie wykorzystywane jedynie w 7%.

PODSUMOWANIE

Kotły z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym osiągnęły stopień „dojrzałości” konstrukcyjnej i technologicznej, umożliwiając ekspansję w różnych działach krajowej energetyki. Spalając w tych kotłach węgiel kamienny i brunatny, także niskiej jakości, nie wymagający dużego rozdrobnienia, kilkakrotnie zmniejsza się emisję tlenków azotu, a stosując alkaliczny addytyw, również kilkakrotnie zmniejsza się emisję ditlenku siarki. Dodatkowe, znaczne efekty ekologiczne przynosi praca kotła fluidalnego w układzie skojarzonej gospodarki cieplnej. Warunki pracy kotła fluidalnego pozwalają na współspalanie węgla i biomasy, co ma duże znaczenie dla urealnienia programu wykorzystania paliw odnawialnych i ograniczenia emisji ditlenku węgla.

Literatura

1. Bis Z., Radecki M. (2002): *Alternatywne sorbenty wapniowe do odsiarczania spalin w kotłach fluidalnych*, [w:] Materiały IX Konferencji Kotłowej 2002 nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów, tom 1, 12–15 listopada 2002, Szczyrk.
2. Koniecznyński J. (2004): *Ochrona powietrza przed szkodliwymi gazami. Metody, aparatura i instalacje*. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
3. Koniecznyński J., Pason-Koniecznyńska A. (2004): *Energetyczne spalanie paliw a emisja zanieczyszczeń powietrza*, [w:] Zarządzanie energią w miastach, R. Zarzycki (red.), Łódź, Polska Akademia Nauk.
4. Kordylewski W. (red.) (1999): *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1999.
5. Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M. (1997): *Energetyka a ochrona środowiska*. Warszawa, WNT.
6. Malina A., Koniecznyński J. (2004): *Ocena ekologiczna wybranych procesów produkcyjnych*. Monografia Nr 58. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.
7. Nowak W. (1998): *Nowoczesne, ekologicznie czyste i wysoko sprawne technologie utylizacji węgla*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 9, s. 16–25.
8. Nowak W., Sekret R. (2001): *Wykorzystanie biomasy w procesie fluidalnego spalania węgla*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 8, s. 2–3.
9. Pastuszka J.S. (2001): *Narażenie na aerozole ziarniste, włókniste i biologiczne populacji generalnej Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Monografie Nr 40.
10. program dla woj. śląskiego.
11. Szargut J., Ziębik A. (2000): *Podstawy energetyki cieplnej*. Warszawa, PWN.
12. Topper J.M., Cross J.I., Goldthorpe S.H. (1994): *Clean coal technology for power and cogeneration*. Fuel d. 7, No 7, s. 1056–1063.
13. www.elektrownie.com.pl.
14. Żbik M. (2002): *Prezentacja wyników próby zastosowania drobnego sorbentu do odsiarczania spalin*, [w:] Materiały II Krajowej Konferencji Użytkowników Kotłów CFB, 25–27 września 2002, Podlesice.

Recenzent: dr hab. inż. Irena Wilkosz, Politechnika Śląska