

Tomasz Czakiert, Wojciech Nowak

Politechnika Częstochowska, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery

Zbigniew Bis

Politechnika Częstochowska, Katedra Inżynierii Energii

## Spalanie w atmosferach modyfikowanych tlenem kierunkiem rozwoju dla kotłów CWF

Problematyka spalania w atmosferach wzbogacanych tlenem (AWT) zajmuje ostatnimi czasy coraz więcej miejsca w technicznej literaturze branżowej. Proces ten określany jest (z ang.) jako „oxygen-enriched combustion”, „oxygen-enhanced combustion”, „oxy-fuel combustion” bądź po prostu „oxy-combustion” lub „oxy-firing”. Jak dotąd terminologia ta nie doczekała się jednak swego odpowiednika w języku polskim, który w sposób krótki i zwięzły oddawałby sens wymienionych powyżej zwrotów. Stosowana dotychczas nomenklatura dopuszcza dwa warianty, mianowicie „spalanie w atmosferach wzbogacanych tlenem” oraz „spalanie w atmosferach modyfikowanych tlenem”.

Duża liczba prowadzonych na całym świecie badań spowodowała również, że technologii AWT poświęcane są całe sesje tematyczne na międzynarodowych konferencjach z zakresu spalania. Rozmach prowadzonych działań i inwestycji przyczynia się również do tego, że prezentowane materiały nie ograniczają się już jedynie do dyskusji wyników z badań w skali laboratoryjnej czy symulacji numerycznych, lecz prezentują praktyczne doświadczenia zdobyte podczas realizacji projektów demonstracyjnych w skali półprzemysłowej.

Duże zainteresowanie, jakim cieszy się proces AWT wynika przede wszystkim z jego kluczowych zalet, tj. podwyższonej sprawności konwersji energii i możliwości bezpośredniej sekwestracji CO<sub>2</sub> [1, 2].

Jednocześnie należy podkreślić, że zdecydowana większość prezentowanych wyników badań odnosi się do warunków panujących w kotłach pyłowych.

Doświadczenia ze skali półprzemysłowej dotyczą również aplikacji w układach z jednostkami PC. Analiza dotychczasowych osiągnięć znanych z literatury oraz wyników badań prowadzonych na Politechnice Częstochowskiej pozwalają sądzić, że proces spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem może być również z powodzeniem realizowany w układach fluidalnych – szczególnie w kotłach z warstwą cyrkulacyjną (CWF) [3,4]. Jakkolwiek w tym przypadku konstrukcja takich jednostek oraz organizacja samego procesu fluidyzacji i spalania różniłaby się istotnie od rozwiązań znanych z aktualnie eksploatowanych bloków CWF.

### Organizacja procesu spalania w AWT

Z realizacją spalania w atmosferach wzbogacanych tlenem nierozzerwalnie powiązane są procesy separacji gazów. Chodzi tu przede wszystkim o prowadzenie wstępnej separacji tlenu i azotu atmosferycznego z powietrza podawanego do komory paleniskowej, prowadzącej do częściowego bądź całkowitego wyeliminowania N<sub>2</sub> z procesu spalania. Przy pewnych rozwiązaniach konieczna staje się również separacja gazów spalinowych o znacznie zwiększonym udziale CO<sub>2</sub> (w porównaniu ze stężeniem CO<sub>2</sub> na poziomie 15% typowym dla konwencjonalnego procesu spalania). Obecnie procesy te stanowią jednak główną barierę dla możliwości szerokiego wdrożenia technologii AWT na skalę przemysłową.

Jednocześnie wydaje się, że prowadzone na całym świecie prace badawcze nad metodami separacji gazów pozwolą w niedalekiej przyszłości na opracowanie taniej, skutecznej i wydajnej technologii separacji zarówno tlenu z powietrza jak i CO<sub>2</sub> ze spalin. Olbrzymi postęp w tej dziedzinie dokonał się ostatnio w technice separacji membranowej oraz PSA i TSA z użyciem zeolitów, jak również zintegrowanej adsorpcji PTSA i adsorpcji pod obniżonym ciśnieniem VSA. Nadal jednak słaba selektywność metod membranowych wymaga zwykle kilkukrotnej recyrkulacji gazów przez membranę lub zastosowania kilkustopniowej separacji. Całość pomnaża koszty i energochłonność rozwiązania, a mimo wszystko czystość otrzymanych gazów jest tu zdecydowanie niższa w porównaniu z innymi technikami [5]. Popularność zyskują również metody adsorpcyjne (gdzie do separacji dwutlenku węgla stosuje się coraz częściej zeolity o różnym składzie chemicznym) oraz procesy absorpcji gazów [6].

Największa na świecie jednostka pracująca z wykorzystaniem tej technologii znajduje się w Trona w Kalifornii (USA), gdzie 800 ton CO<sub>2</sub>/dzień jest odseparowywanych z gazów wylotowych [7]. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że w przypadku bloku 500 MW zasilanego węglem stanowiłoby to jedynie 10% istniejącego zapotrzebowania.

Proponuje się również metodę kriogeniczną dla prowadzenia procesu separacji tlenu z powietrza.

Na dzień dzisiejszy, czystość tlenu otrzymywanego poprzez separację powietrza sięga już 95,0% – dla metod adsorpcyjnych oraz 99,9% – dla metody kriogenicznej [5]. Nadal jednak są to procesy bardzo kosztowne i charakteryzujące się niską wydajnością, co determinuje je w zastosowaniu na szeroką skalę do celów przemysłowych.

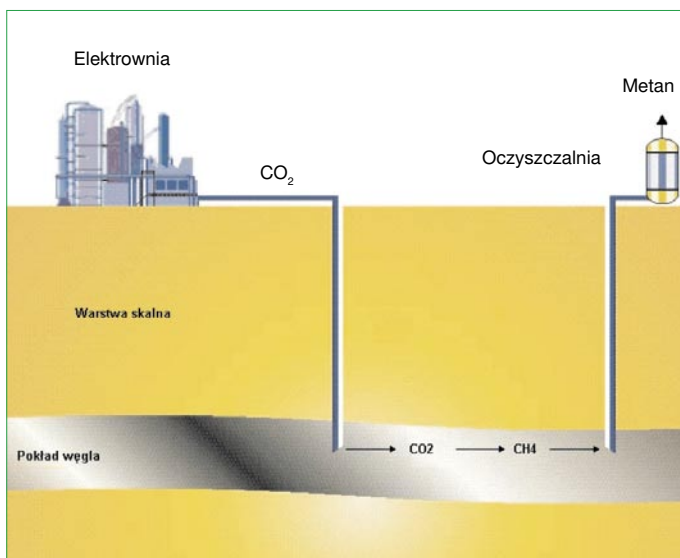
Kolejnym etapem w procesie AWT jest lokowanie pozyskanego produktu w postaci CO<sub>2</sub>. Możliwe jest składowanie dwutlenku węgla we wszystkich stanach skupienia. Jako miejsca deponowania wykorzystuje się głównie wyeksploatowane górnicze wyrobiska, pustki powydobywcze złóż ropy naftowej i gazu ziemnego, znajdujące się głęboko pod powierzchnią ziemi warstwy skalne z pokładami słonej wody oraz duże zbiorniki wodne [2, 8]. W jednym z projektów realizowanych obecnie na świecie, prawie milion ton CO<sub>2</sub> w ciągu roku jest wpompowywanych w przestrzenie powstałe w wyniku eksploatacji złóż gazu ziemnego, zlokalizowane w norweskim sektorze Morza Północnego [7].

Największe możliwości deponowania dwutlenku węgla posiadają jednak wody oceanów. Autorzy [9] podają, że oceany mają teoretycznie pojemność wymaganą do absorpcji całej ilości CO<sub>2</sub> ze źródeł antropogenicznych, jaka mogłaby tylko być osiągnięta w przyszłości na przestrzeni kilku tysięcy lat.

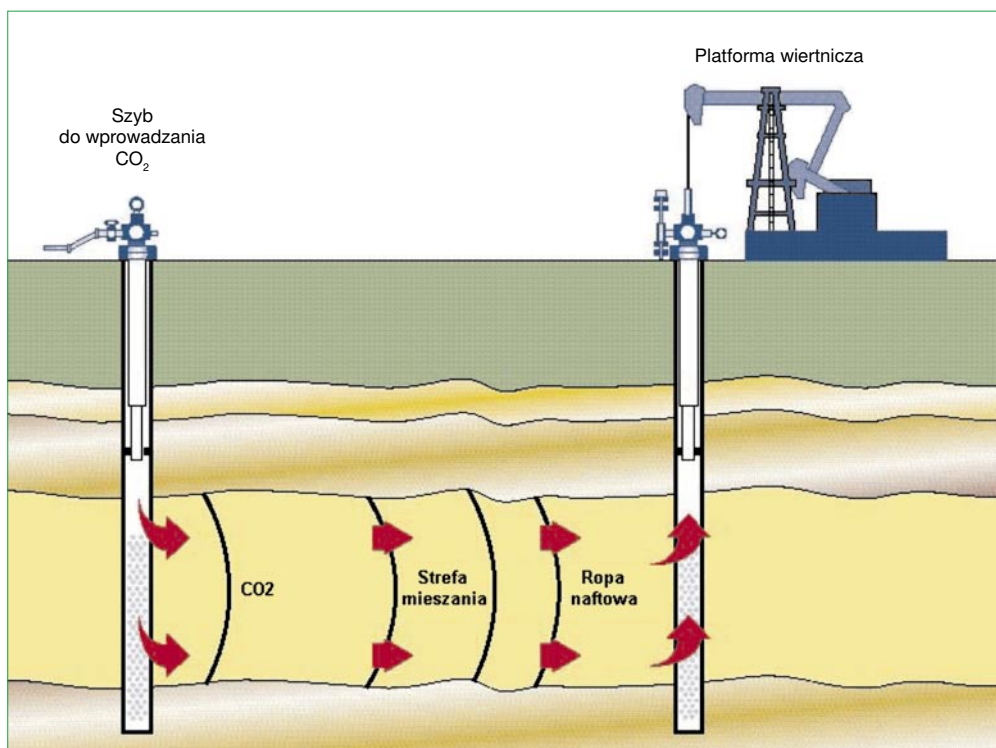
Przykład przedstawiony na rysunku 1 [10] pokazuje, że metoda zagospodarowania odseparowanego z gazów wylotowych CO<sub>2</sub> może stać się jednocześnie sposobem jego składowania. W procesie EOR (Enhanced Oil Recovery) mianowicie, dwutlenek węgla wpompowywany jest w przestrzenie z pokładami ropy naftowej ułatwiając jej wydobywanie, następnie pozostawiany jest w wyeksploatowanych złożach. Obecnie jest to największe przemysłowe zastosowanie CO<sub>2</sub>. Oszacowano, że należące do Europy przybrzeżno-morskie złoża ropy naftowej posiadają objętość wymaganą do ulokowania ilości CO<sub>2</sub> równej jego 6-letniej emisji (na poziomie z roku 1990) ze wszystkich elektrowni

znajdujących się na terenie Europy [11]. Stwierdzono również, że ogólnosiwiatowe możliwości w tym zakresie są dziesięciokrotnie większe [12]. Dużym potencjałem dysponuje USA i Kanada, który określono na 15 lat tamtejszej emisji CO<sub>2</sub> ze źródeł utylizujących paliwa kopalniane [13].

Kolejny przykład na jednoczesne wykorzystanie dwutlenku węgla pochodzącego z procesów spalania paliw kopalnianych, a zarazem rozwiązanie problemu jego deponowania, został przedstawiony na rysunku 2 [10]. Mianowicie, głębokie, na dzień dzisiejszy technicznie niemożliwe do eksploatacji pokłady węgla, stanowią potencjalne źródło gazu ziemnego w postaci metanu. Wprowadzenie w te miejsca dwutlenku węgla pozwoliłoby wypręcić metan uwięziony w złożu węgla.



Rys. 2. Technologia ECBM (Enhanced Coalbed Methane) [10]



Rys. 1. Technologia EOR (Enhanced Oil Recovery) [10]

Realizacja technologii ECBM (Enhanced Coalbed Methane) miała już miejsce w jednym z demonstracyjnych projektów w San Juan Basin (USA), gdzie przez 3 lata około  $10^6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$  dziennie było wpompowywanych przez cztery niezależne szyby w formacje, o których była mowa [14].

## Charakterystyka spalania w AWT

Pojęcie spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem (AWT) oznacza, że na potrzeby procesu utylizacji paliwa kocioł zasilany jest mieszkanką gazową, której stężenie tlenu jest wyższe od stężenia  $\text{O}_2$  w powietrzu. Ze względu na charakter procesu mogą być to mieszanki  $\text{O}_2 + \text{N}_2$ ,  $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}_2$  bądź  $\text{O}_2 + \text{CO}_2$ , przy czym dla tej ostatniej stężenia dwutlenku węgla w gazie wlotowym są znacznie wyższe od udziału  $\text{CO}_2$  w spalinach typowego dla konwencjonalnego procesu spalania realizowanego w powietrzu.

Pierwotnie proces AWT skierowany był na ograniczenie emisji  $\text{CO}_2$ . Wiadome jest bowiem, że niemożliwe i sprzeczne jest wyeliminowanie dwutlenku węgla ze składu spalin w procesie spalania, którego istotą jest przecież utlenianie węgla zawartego w utylizowanym paliwie. Dlatego też ideą procesu spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem stało się jedynie zagęszczenie  $\text{CO}_2$  w gazach wylotowych, co stanowić ma przyczynek do ograniczenia jego emisji do atmosfery. Jako fundament dla tej technologii wykorzystano fakt, że jedynie tlen jest wymagany z punktu widzenia procesu spalania, a azot jest absolutnie zbędny wręcz niepożądany i stanowi wyłącznie balast.

Dzięki zastosowaniu zabiegu wstępnego, polegającego na separacji  $\text{N}_2$ -atmosferycznego z powietrza doprowadzanego do procesu spalania, stężenie  $\text{CO}_2$  w odprowadzonym gazie wylotowym może osiągnąć poziom dochodzący do 98% [15, 16]. Taki charakter spalin w znacznym stopniu ułatwia realizację, jak również obniża koszty odzyskiwania dwutlenku węgla z gazów spalinowych bądź też umożliwia bezpośrednią jego sekwestrację, co daje szansę otrzymania zerowej emisji  $\text{CO}_2$ .

Procesy utylizacji paliwa prowadzone w konwencjonalnych kotłach realizowane są z lekkim nadmiarem powietrza. Pomimo wszystko w odprowadzanych gazach spalinowych odnaleźć można tlenek węgla  $\text{CO}$ , będący produktem niepełnego spalania paliwa węglowego. Natomiast silnie utleniająca atmosfera towarzysząca procesowi AWT sprawia, że stężenie  $\text{CO}$  w gazach wylotowych jest zdecydowanie niższe w porównaniu z tradycyjnym procesem spalania w powietrzu [5, 15]. Tym samym prowadzi to z jednej strony do ograniczenia emisji toksycznego związku gazowego, z drugiej zaś do podniesienia sprawności procesu spalania paliwa.

Tradycyjne spalanie paliw kopalnianych powoduje również powstawanie grupy tzw.  $\text{NO}_x$ , których źródłem jest  $\text{N}_2$  zawarty w podawanym paliwie oraz azot z doprowadzanego do procesu powietrza. Przeprowadzane od lat modyfikacje i zabiegi, począwszy od obniżania temperatury w komorze paleniskowej i stopniowania podawania powietrza, a skończywszy na instalacjach odazotowania spalin pozwoliły na obniżenie emisji  $\text{NO}_x$  do atmosfery, powodując jednak tym samym spadek sprawności wytwarzania energii. W procesie utylizacji paliwa w atmosferze wzbogaconej tlenem, w wyniku wstępnej separacji azotu z powietrza podawanego do spalania, całkowita ilość azotu w komorze

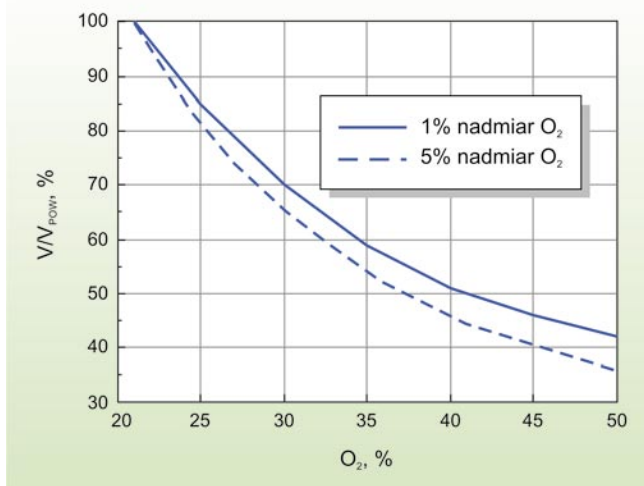
paleniskowej jest zdecydowanie mniejsza (w porównaniu z tradycyjnym procesem spalania węgla w powietrzu), co przyczynia się w dużej mierze do ograniczenia emitowanych do atmosfery  $\text{NO}_x$ . Ponadto badania [4] procesu AWT w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, gdzie udział tlenków termicznych jest znikomy, wykazały, że mimo silnie utleniającej atmosfery w strefie spalania konwersja N-paliwowego do  $\text{NO}_x$  może być również kontrolowana. Dla rozwiązania z recyrkulacją gazu wylotowego badania [16] wyjaśniają mechanizm redukcji tlenków azotu przez rozpad części zawracanego  $\text{NO}$  do postaci azotu cząsteczkowego  $\text{N}_2$ . Poza tym, w przypadku tak zwanej suchej recyrkulacji, wchodzące w skład gazów wylotowych tlenki azotu reagują z wykraplaną i usuwaną z obiegu podczas recyrkulacji wodą zawartą w spalinach i tą drogą odprowadzane są z układu.

W badaniach [17] analizowano oddzielnie mechanizm redukcji recyrkulowanych tlenków azotu oraz oddziaływanie pomiędzy azotem paliwowym a  $\text{NO}_x$  zawracanymi do komory paleniskowej. Stwierdzono bowiem, że w przypadku recyrkulacji gazów spalinowych konwersja azotu paliwowego do  $\text{NO}_x$  spadła do około 1/4 ilości formowanej przy spalaniu paliwa w powietrzu, co zostało również potwierdzone przez [18]. Ponadto zaobserwowano około 50–80-procentową dekompozycję tlenków azotu zawracanych do komory paleniskowej.

Z utylizacją paliw stałych wiąże się również formowanie związków poprzez utlenianie zawartej w paliwie siarki, głównie  $\text{SO}_2$ . Podobnie jak w przypadku  $\text{NO}_x$ , od wielu lat prowadzone są prace mające na celu ograniczenie emisji  $\text{SO}_2$  do atmosfery. Wśród powstałych technik wyróżnić można metody suche, pół-suche i mokre, jak również prowadzone równoległe z procesem spalania bezpośrednio w komorze paleniskowej oraz realizowane w zewnętrznych instalacjach odsiarczania spalin. Badania pozwoliły także na opracowanie wielu technologii mających na celu pozyskanie nowej generacji sorbentów, między innymi sorbentów modyfikowanych na bazie popiołów lotnych, sorbentów ultradrobnych lub poddawanych mechanicznej aktywacji.

Przy spalaniu węgla z wykorzystaniem mieszanek gazowych wzbogaconych tlenem, samo wysokie stężenie  $\text{SO}_2$  w spalinach, jakie ma tu miejsce, sprzyja wyższemu stopniu konwersji sorbentów, podnosząc tym samym skuteczność odsiarczania spalin [19]. Ponadto badania [20] wskazują na analogię w mechanizmie redukcji dwutlenku siarki, przy suchej recyrkulacji, z tlenkami azotu usuwanymi z systemu wraz z odprowadzaną podczas recyrkulacji wodą.

Spalaniu w atmosferach modyfikowanych tlenem towarzyszą również wysokie stężenia  $\text{CO}_2$  w obszarze reakcji związków  $\text{Ca}$  z  $\text{SO}_2$ , co jak wiadomo częściowo ogranicza bądź całkowicie blokuje proces kalcynacji sorbentów wapniowych. Badania [21] wykazały jednak, że proces siarczanowania przebiega w tych warunkach, tyle że drogą bezpośrednią i z mniejszą szybkością. Nie stanowi to jednak problemu, gdyż w kotłach CWF nieprzereagowany sorbent (jako jeden ze składników materiału warstwy) cyrkuluje w konturze komora paleniskowa – układ nawrotu – komora paleniskowa, pojawiając się cyklicznie w strefie przebiegu reakcji siarczanowania. Jest wielce prawdopodobne, że w wyniku zmniejszenia szybkości procesu eliminuje się częściowo niekorzystny efekt blokowania porów sorbentu, co w efekcie prowadzi do zwiększenia całkowitego stopnia jego przereagowania.



Rys. 3. Stosunek wymaganej objętości gazu przy spalaniu w atmosferze wzbogaconej tlenem dla koncepcji z recykulacją gazu wylotowego do wymaganej objętości powietrza przy spalaniu w powietrzu w funkcji stężenia tlenu w doprowadzanym gazie [22]

Jak już wspomniano, prowadzenie procesu utylizacji paliwa w atmosferze wzbogaconej tlenem pozwala ograniczyć w znacznym stopniu wymaganą ilość gazu doprowadzanego do spalania, a wynikającą ze stechiometrii realizowanego procesu. Jak wynika z rysunku 3 [22], już przy udziale tlenu w gazie wlotowym na poziomie 40%, zapotrzebowanie na ten czynnik spada o połowę. Umożliwia to radykalne zmniejszenie wielkości straty kominowej, decydującej w głównej mierze o sprawności termicznej kotła.

Pozytywnym aspektem zmniejszenia ilości gazów spalinywych jest również obniżenie kosztów, zarówno inwestycyjnych jak i eksploatacyjnych, w przypadku stosowania ewentualnych instalacji oczyszczania gazów zlokalizowanych na ciągu spalinywym. Możliwe jest również podniesienie sprawności istniejących i użytkowanych wcześniej urządzeń, przy przejściu ze spalania w powietrzu na spalanie w atmosferze wzbogaconej tlenem. Dzieje się tak, ponieważ stężenia poszczególnych zanieczyszczeń są znacznie wyższe w tym przypadku, co ułatwia oczyszczanie gazów wylotowych. Poza tym wysoka koncentracja tlenu w obrębie komory paleniskowej pozwala ograniczyć straty niecałkowitego i niezupełnego spalania, zwiększając sprawność samego procesu spalania [23]. Wymienione powyżej funkcje składają się na wynik w postaci podwyższonej sprawności wytwarzania energii.

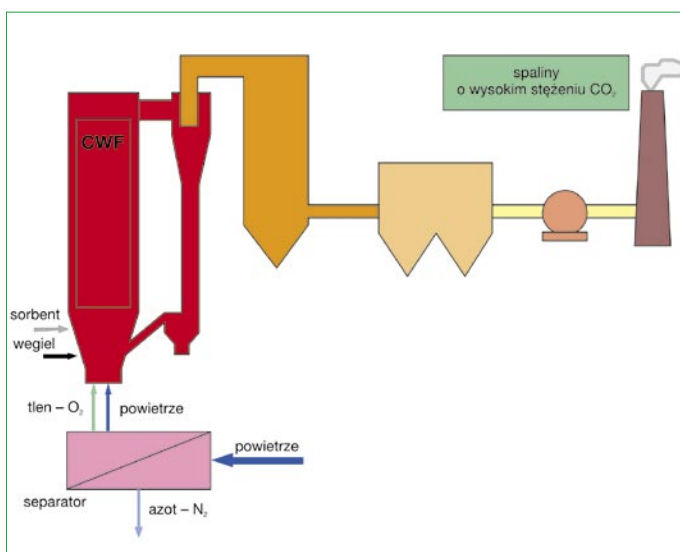
## Koncepcja spalania w AWT w warunkach CWF

Technologia utylizacji paliw w kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną znajduje coraz to większe zainteresowanie, zarówno w Polsce jak i na świecie. Świadczy o tym przede wszystkim wciąż rosnąca liczba wdrożeń przemysłowych, zwłaszcza w celach produkcji energii elektrycznej i ciepła. Znaczącą liczbę wdrożeń technika CWF zawdzięcza głównie licznym zaletom, które wyróżniają ją spośród innych technologii konwersji energii chemicznej zawartej w paliwach. Wciąż poszukuje się jednak coraz to nowszych rozwiązań konstrukcyjnych, spośród których wymienić

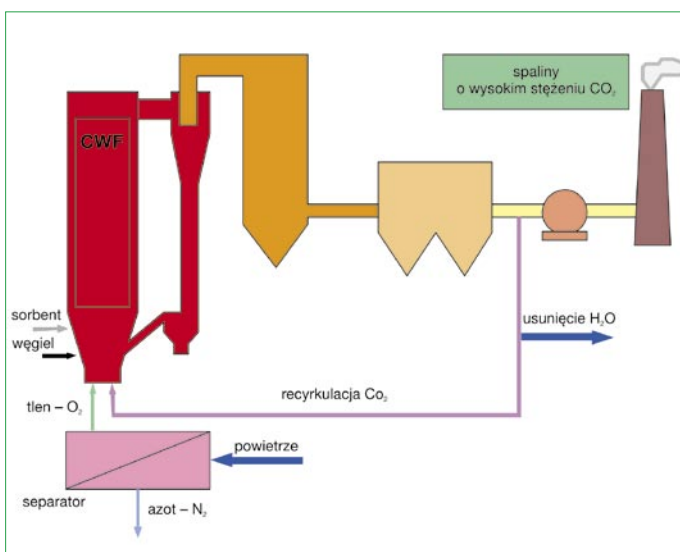
można m.in. wymienniki ciepła Intrex, kotły typu Kompakt czy jednostki pracujące przy parametrach nadkrytycznych. Ciekawą propozycją wydaje się zatem koncepcja scalenia technologii CWF i procesu AWT, szczególnie w dzisiejszych czasach, które stawiają coraz to surowsze wymagania w zakresie ochrony środowiska, przy jednoczesnym zachowaniu tak wielu innych czynników, jak sprawność, elastyczność, oszczędność itp.. Sugeruje się w tym zakresie dwa rozwiązania, mianowicie: bez lub z recykulacją spalin (dwutlenku węgla). Obie koncepcje przedstawiono schematycznie na rysunkach 4 i 5.

W pierwszym przypadku (bez recykulacji CO<sub>2</sub>) otrzymany wcześniej tlen podaje się w ustalonych wstępnie proporcjach równoległe z powietrzem doprowadzanym do komory paleniskowej.

Z uwagi na specyfikę konstrukcji kotłów CWF, możliwych jest kilka sposobów zasilania układu przewidzianymi tu gazami, tj. powietrzem i tlenem.



Rys. 4. Koncepcja spalania w CWF w atmosferze wzbogaconej tlenem bez recykulacji CO<sub>2</sub>



Rys. 5. Koncepcja spalania w CWF w atmosferze wzbogaconej tlenem z recykulacją CO<sub>2</sub>



W pierwszym z nich powietrze i tlen mieszane są wstępnie i doprowadzane bezpośrednio do skrzyni powietrznej oraz wlotów powietrza wtórnego. W ten sposób uzyskuje się równomierny stopień wzbogacenia tlenem w obrębie całej komory paleniskowej.

Kolejna opcja to mieszanie tlenu jedynie z powietrzem wtórnym, bez ingerencji w strumień powietrza pierwotnego zasilającego dno dyszowe kotła. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie strefy redukcyjnej w dolnej części komory paleniskowej z fazą gęstą (jak ma to miejsce w konwencjonalnym procesie spalania z wykorzystaniem powietrza) oraz stworzenie ponad nią lokalnych obszarów charakteryzujących się podwyższonym stężeniem tlenu. Modyfikacją tego rozwiązania jest podawanie czystego tlenu w miejsce mieszanki powietrza wtórnego i  $O_2$ , co doprowadzi do powstania obszaru o silnie utleniających właściwościach tuż nad dolną redukcyjną strefą komory CWF. Podobnie dla koncepcji, w której  $CO_2$  jest nawracany do komory spalania (rys. 5), zaproponować można kilka zbliżonych wariantów podawania gazów, tu tlenu i  $CO_2$ , do komory paleniskowej.

W pierwszym z nich analogicznie, czysty tlen i dwutlenek węgla są pierwotnie mieszane, a następnie bezpośrednio podawane do skrzyni powietrznej oraz wlotów powietrza wtórnego, co prowadzi do równomiernego stopienia wzbogacenia tlenem w obrębie całej komory paleniskowej. Kolejna opcja to mieszanie  $O_2$  i  $CO_2$  odpowiednio w proporcjach 21%/79% tworząc strumień gazu pierwotnego zasilającego dno dyszowe kotła oraz dalsze wzbogacanie tej mieszanki tlenem w celu uzyskania gazu wtórnego o podniesionej koncentracji  $O_2$ . W ten sposób utrzymuje się strefę redukcyjną w dolnej części komory paleniskowej oraz tworzone są ponad nią lokalne obszary charakteryzujące się podwyższonym stężeniem tlenu.

Modyfikacją tego rozwiązania jest doprowadzanie czystego  $O_2$  do wlotów gazu wtórnego, czego konsekwencją jest powstanie obszaru o silnie utleniających właściwościach tuż nad dolną redukcyjną strefą komory paleniskowej. Należy stwierdzić jednak, że dla obu koncepcji (z recyrkulacją i bez recyrkulacji  $CO_2$ ) zaproponowane sposoby zasilania układu gazami wymagają wielu istotnych zmian i modyfikacji bloku CWF. Wynikają one przede wszystkim z konieczności doprowadzenia do komory paleniskowej pewnego ściśle określonego strumienia gazu, w celu utrzymania odpowiedniej prędkości i związanego z tym zapewnienia właściwego stanu sfluidyzowania materiału warstwy.

Realizacja procesu spalania w warunkach CWF w atmosferze wzbogaconej tlenem może być prowadzona w dwojaki sposób:

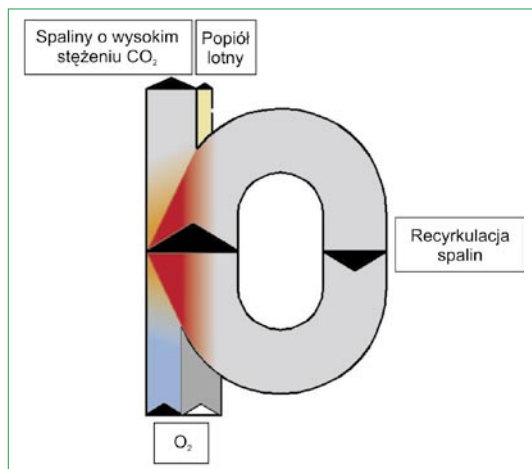
- przy niezmiennych gabarytach komory paleniskowej, co wiąże się z podawaniem zwiększonej ilości paliwa wynikającej z większego strumienia doprowadzanego tlenu, następstwem czego jest uzyskanie podniesionej mocy jednostki i wynikający z tego wymóg przebudowy turbozespołu;
  - przy pomniejszeniu gabarytów komory spalania, przy niezmiennionej ilości podawanego paliwa wynikającej z zachowania wielkości strumienia doprowadzanego tlenu;
- w tym przypadku, moc jednostki pozostaje niezmienna, dzięki czemu nie ma potrzeby przebudowy turbozespołu.

W obu wariantach większe obciążenie masowe paliwem przypadające na jednostkę przekroju poprzecznego komory paleniskowej wymusza zintensyfikowany odbiór ciepła, a tym samym rozbudowę powierzchni wymiany ciepła.

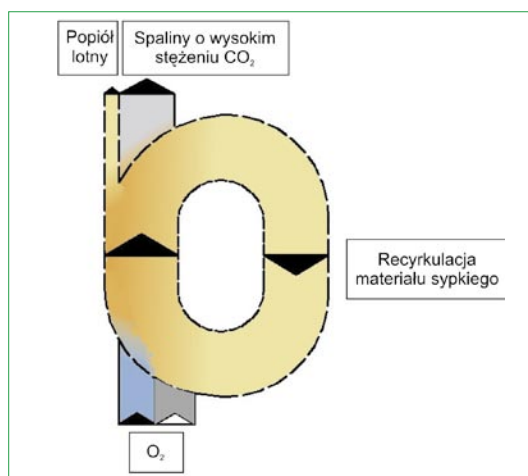
Wzrost temperatury adiabatycznej wewnątrz komory paleniskowej, spowodowany zmianą proporcji pomiędzy obciążeniem masowym komory spalania a ilością tworzących się gazów spalinowych, może być w pewien sposób zniwelowany poprzez zastosowanie paliw gorszej jakości, co staje się jednocześnie jednym z pozytywnych aspektów omawianej technologii. Ponadto wzrost ciśnienia cząstkowego tlenu w obrębie komory paleniskowej wpływa również na podniesienie temperatury, w wyniku zwiększenia prędkości spalania, a tym samym zawężenia strefy utleniania paliwa. W pewnym ograniczonym zakresie można temu zapobiec poprzez dokonanie zmian w systemie zasilania kotła paliwem, poprzez zwiększenie oraz właściwe rozlokowanie punktów dystrybucji węgla w konturze komory spalania. Należy przy tym pamiętać, że w przypadku kotłów CWF wartość temperatury spalania musi być bezwzględnie zlokalizowana poniżej poziomu temperatury mięknięcia popiołu [19]. W przeciwnym razie należy spodziewać się problemów z utrzymaniem własności materiału warstwy oraz odprowadzaniem żużla. Z tego punktu widzenia zastosowanie recyrkulacji części gazu spalinowego (rys. 6) charakteryzującego się wysoką zawartością  $CO_2$  okazuje się bardzo korzystnym rozwiązaniem. Umożliwia bowiem obniżenie temperatury w komorze paleniskowej do poziomu zbliżonego do tradycyjnego procesu spalania w powietrzu, jak również staje się dodatkowym sposobem regulacji temperatury warstwy fluidalnej.

Należy wiedzieć bowiem, że wyższe ciepło właściwe dwutlenku węgla w porównaniu z azotem prowadzi do niższych temperatur spalania w mieszkankach  $O_2+CO_2$  niż w mieszkankach  $O_2+N_2$ , przy identycznym stężeniu tlenu. Autor [18] stwierdza, że w celu uzyskania jednakowej temperatury, a tym samym zapewnienia zbliżonych warunków wymiany ciepła, co w przypadku spalania w powietrzu, stężenie tlenu w mieszance  $O_2/CO_2$  powinno wynosić 42%. Należy zauważyć również, że z uwagi na różne własności gazów, głównie gęstości i lepkości, wymagany do utrzymania stanu fluidyzacji cyrkulacyjnej strumień mieszanki  $O_2+CO_2$  jest mniejszy w porównaniu z mieszkanką  $O_2+N_2$  o tym samym stężeniu tlenu. W związku z tym, chcąc zachować tę samą moc kotła, a co za tym idzie podając identyczną ilość paliwa, strumień doprowadzanego do procesu spalania tlenu powinien pozostać niezmienny. Stężenie tlenu będzie automatycznie wyższe w mieszance gazowej na bazie dwutlenku węgla niż na bazie azotu.

Wprawdzie rozwiązanie z recyrkulacją spalin może być wykorzystywane zarówno w kotłach pyłowych jak i fluidalnych i spełnia swoje zadanie związane z obniżeniem temperatury w komorze paleniskowej, to jego realizacja na obiekcie dużej mocy może okazać się wyjątkowo kłopotliwa. Wskazane jest bowiem usunięcie z recyrkulowanych spalin zarówno zanieczyszczeń gazowych, pyłu jak i pary wodnej, co przysparza dodatkowych kosztów i obniża sprawność procesu. Poza tym kanały układu nawrotu, wentylatory spalin i pozostały osprzęt narażony jest tu wyjątkowo na korozję, szczególnie gdy spaliny są chłodzone poniżej temperatury punktu rosy. W porównaniu z innymi technologiami konwersji energii chemicznej zawartej w paliwie, charakter techniki spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, którą tworzą ziarna piasku kwarcowego, popiołu i sorbentu, ułatwia istotnie rozwiązanie tego problemu. Możliwe jest tu bowiem wykorzystanie materiału warstwy do intensyfikacji procesów wymiany ciepła (rys. 7), poprzez zastosowanie dodatkowych zewnętrznych wymienników.



Rys. 6. Układ CWF z recykulacją spalin



Rys. 7. Układ CWF z recykulacją materiału sypkiego

Celowe wydaje się również zastosowanie w takim układzie materiału inertnego o znacznie drobniejszych frakcjach oraz zwiększenie krotności recykulacji materiału warstwy przy jednoczesnym uzyskaniu bardzo wysokich skuteczności separacji cyklonów bądź innego typu separatorów materiału sypkiego.

## Podsumowanie

W porównaniu z konwencjonalnym procesem spalania w powietrzu należy uznać technikę spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem za atrakcyjne, godne uwagi rozwiązanie. Do najważniejszych problemów towarzyszących realizacji tej technologii należy niewątpliwie zaliczyć tanią i wydajną produkcję tlenu, korozję elementów układu w przypadku prowadzenia recykulacji spalin oraz wzmogłą potrzebę wymiany ciepła. Proponuje się dwa rozwiązania prowadzenia procesu spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, mianowicie bez lub z recykulacją spalin. Jednocześnie dla układów CWF wskazuje się na koncepcję ze zintensyfikowaną cyrkulacją materiału warstwy. Stopień wzbogacania tlenem stosowanych mieszanek gazowych będzie zależał głównie od możliwości odbioru ciepła w komorze paleniskowej i tym samym od zdolności utrzymania temperatury warstwy poniżej temperatury mięknięcia popiołu.

## LITERATURA

- [1] Bisio G., Bosio A., Rubatto G., Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air, *Energy Conversion and Management* 2002, Vol. 43, pp. 2589-2600
- [2] Matsumoto S., Yanagisawa Y., Inaba A., System Analysis of CO<sub>2</sub> Removal from Thermal Electric Power Plants and Storage in Deep Sea, *Energy Conversion and Management* 1995, Vol. 36, No. 6-9, pp. 559-562
- [3] Czakiert T., Kobylecki R., Bis Z., Muskata W., Nowak W., Oxy-Combustion in CFB Conditions, Proc. of the 8th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Hangzhou, China, May 10-13, 2005, pp. 447-454
- [4] Czakiert T., Bis Z., Muskata W., Nowak W., Badania doświadczalne fluidalnego spalania węgla brunatnego w atmosferze wzbogaconej tlenem, *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 2005, tom 26, nr 4, s. 831-845
- [5] Baukal Ch. E., Oxygen-Enhanced Combustion, CRC Press LLC, USA, 1998
- [6] Majchrzak-Kucęba I., Nowak W., Thermal analysis of fly ash – based zeolites, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2004, Vol. 77, No. 1, pp. 125
- [7] Report of the IEA: Carbon Dioxide Capture and Storage, London, UK, 2000
- [8] Kaya Y., The Role of CO<sub>2</sub> Removal and Disposal, *Energy Conversion and Management* 1995, Vol. 36, No. 6-9, pp. 375-380
- [9] Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 1995 – The science of climate change, Cambridge, UK, 1996
- [10] Davison J., Freund P., Smith A., Report of the IEA Greenhouse Gas R&D Programme: Putting Carbon Back into the Ground, Cheltenham, UK, 2001
- [11] Holloway S., Summary Report of The British Geological Survey: The Underground Disposal of Carbon Dioxide, Nottingham, UK, 1996
- [12] Report of the International Energy Agency Greenhouse Gas Programme (IEAGGP), Carbon Dioxide Utilisation, Cheltenham, 1995
- [13] Croiset E., Thambimuthu K.V., A Novel Strategy for Greenhouse Gas Abatement in Coal-Fired Power Plants: Enriched Oxygen Combustion, Proc. of the Combustion Canada' 99, Calgary, Alberta, Canada, May 26-28, 1999.
- [14] 22nd Report of The Royal Commission on Environmental Pollution, Energy – The Changing Climate, London, June 16, 2000
- [15] Hu Y., Naito S., Kobayashi N., Hasatani M., CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases, *Fuel* 2000, Vol. 79, pp. 1925-1932
- [16] Kimura N., Omata K., Kiga T., Takano S., Shikisima S., The characteristics of pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures for CO<sub>2</sub> recovery, *Energy Conversion and Management* 1995, Vol. 36, No. 6-9, pp. 805-808
- [17] Okazaki K., Ando T., NO<sub>x</sub> Reduction Mechanism in Coal Combustion with Recycled CO<sub>2</sub>, *Energy* 1997, Vol. 22, No. 2/3, pp. 207-215
- [18] Kimura K., Takano S., Kiga T., Miyamae S., Experimental Studies on Pulverized Coal Combustion with Oxygen/Flue Gas Recycle for CO<sub>2</sub> Recovery, Proc. of the JSME-ASME International Conference on Power Engineering-93, Tokyo, Japan, September 12-16, 1993, pp. 487-492
- [19] Nowak W., Perspektywy fluidalnej utylizacji węgla w energetyce, *Gospodarka Paliwami i Energią* 2000, nr 5, s. 2-10
- [20] Bisio G., Bosio A., Oxygen enrichment of combustion air, Proc. of the ECOS 2000 Conference – From Thermo-Economics to Sustainability, Enschede, Holland, 2000, pp. 379-390
- [21] Czakiert T., Bis Z., Muskata W., Nowak W., Fluidalne spalanie paliw w atmosferach wzbogaconych tlenem, Mat. Konferencji – Fluidalne spalanie paliw w energetyce, Złotniki Lubańskie, 29 czerwiec-2 lipca, 2005, s. 153-162
- [22] Thambimuthu K.V., Croiset E., Enriched Oxygen Coal-Fired Combustion, Proc. of the Advanced Coal-Based Power and Environmental Systems, Morgantown, USA, July 21-23, 1998
- [23] Hu Y.Q., Nikzat H., Nawata M., Kobayashi N., Hasatani M., The characteristics of coal-char oxidation under high partial pressure of oxygen, *Fuel* 2001, Vol. 80, pp. 2111-2116

