

Robert ZARZYCKI\*, Rafał KOBYŁECKI\*\*, Marcin KRATOFIL\*\*, Zbigniew BIS\*\*\*

## Kierunki rozwoju palenisk cyklonowych

**STRESZCZENIE.** W artykule omówiono konstrukcje podstawowych typów palenisk cyklonowych z cyklonami poziomymi, przednimi i pionowymi, obecnie branych pod uwagę jako jedna z dróg dla ograniczenia tempa zużywania paliw kopalnych i przeciwdziałania zmianom klimatycznym, m.in. poprzez implementację technologii oxy-spalania. Analiza zestawionych w pracy informacji pozwala stwierdzić, że paleniska cyklonowe posiadają duży potencjał zastosowania w nowoczesnej energetyce, m.in. dzięki możliwemu do realizacji spalaniu paliw ciekłych, stałych i gazowych, w tym paliw wysokozapopielonych i o niskiej temperaturze topienia popiołu. Dzięki silnemu zawirowaniu w komorze spalania możliwe jest znaczące wydłużenie czasu pobytu ziaren paliwa oraz istotne (nawet dochodzące do 90%) ograniczenie strumienia popiołu lotnego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** palenisko cyklonowe, oxy-spalanie

## Wprowadzenie

Podstawą polskiej energetyki zawodowej są paliwa kopalne. Pomimo znacznych zasobów węgla, jakimi dysponuje Polska, konieczne jest poszukiwanie rozwiązań, które pozwolą w najbliższej przyszłości na ograniczenie jego zużycia, a nawet zastąpią paliwa kopalnie innymi nośnikami energii. Obecnie trwają prace nad wdrożeniem pakietu klimatycznego 3 × 20 polegające głównie na ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych, promowaniu stosowania energii

---

\* Dr inż., \*\* Mgr inż., \*\*\* Prof. dr hab. inż. – Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii, Katedra Inżynierii Energii, Częstochowa; e-mail: zarzycki@is.pcz.czyst.pl, rafalk@is.pcz.czyst.pl, mkratofil@is.pcz.czyst.pl, zbis@is.pcz.czyst.pl

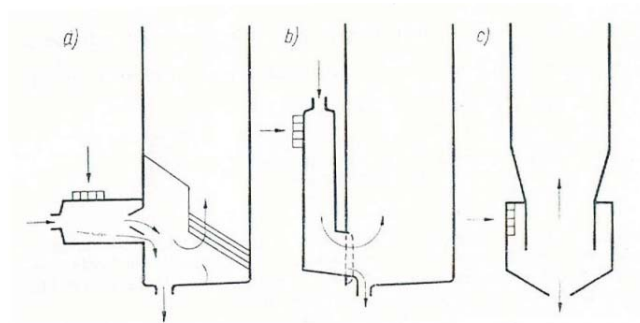
ze źródeł odnawialnych i podnoszeniu sprawności energetycznej. Proces ograniczania emisji gazów cieplarnianych związany jest głównie z rozwojem technologii spalania paliw węglowych wraz z technologiami wychwytu i składowania dwutlenku węgla (CCS) oraz stosowaniu w energetyce paliw, których spalanie nie powoduje wzrostu emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery takich jak biomasa. Promowanie odnawialnych źródeł energii związane jest także z energetycznym wykorzystaniem biomasy, ale również z wykorzystywaniem innych odnawialnych źródeł energii takich jak: energia wodna, słoneczna, wiatru, geotermalna itp. Ostatni sposób związany jest z podnoszeniem sprawności energetycznej procesów konwersji energii. W tym przypadku pracuje się głównie nad podnoszeniem sprawności procesu spalania (nowe konstrukcje kotłów, oxy-spalanie) (Nowak i Pronobis 2010; Nowak i Czakiert 2012), podnoszenie sprawności termodynamicznej bloków energetycznych poprzez wzrost parametrów pary świeżej, opracowywanie bezpośrednich sposobów konwersji energii chemicznej na elektryczną np. w ogniwach paliwowych (Kacprzak i in. 2013, 2014). W przypadku polskiej energetyki, która w dużej mierze oparta jest na węglu, prace związane z dotrzymaniem postanowień pakietu głównie skoncentrowane są nad opracowywaniem technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub>, oraz opracowaniem technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub> ze spalin. Prace te realizowane są między innymi w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”; w ramach jednego z zadań tego programu trwają prace nad badaniami spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym. W niniejszej pracy dokonano charakterystyki oraz przeglądu konstrukcji i rozwiązań technologicznych palenisk cyklonowych, które rozwijane były w XX wieku a także nowych rozwiązań konstrukcyjnych, które są i będą stosowane w energetyce w najbliższej przyszłości.

## 1. Palenisko cyklonowe

Paleniska cyklonowe pozwalają na spalanie paliw ciekłych, stałych i gazowych w silnie zawirowanym strumieniu utleniacza najczęściej wprowadzanym stycznie do komory spalania. W dotychczasowych konstrukcjach różni się m.in. paleniska z cyklonami poziomymi, przednimi i pionowymi (rys. 1).

Objętości komór spalania palenisk cyklonowych są wielokrotnie mniejsze niż kotłów pyłowych czy fluidalnych. Z tego też względu paleniska te charakteryzują się wysokim obciążeniem cieplnym oraz wysoką temperaturą procesu spalania (tab. 1). Temperatury panujące w paleniskach cyklonowych przekraczają temperatury mięknięcia i topienia popiołu.

Silne zawirowanie wewnątrz komory spalania możliwe jest poprzez styczne wprowadzanie gazu (utleniacza) i pozwala na wydłużenie czasu pobytu paliwa w komorze spalania, które może być o kilka rzędów większe niż w przypadku kotłów pyłowych lub fluidalnych. Połączenie jednocześnie wysokiej temperatury (tab. 1) i długiego czasu pobytu paliwa w komorze spalania stwarza bardzo korzystne warunki do prowadzenia procesu i poprawia jego sprawność.



Rys. 1. Typy palenisk cyklonowych: a) cyklon poziomy; b) cyklon przedni; c) cyklon pionowy (dolny) (Orłowski i in. 1979)

Fig. 1. Types of cyclone furnaces with horizontal cyclone (a), cyclone in the front (b), vertical cyclone in the lower section (c) (Orłowski et al., 1979)

TABELA 1. Obciążenie cieplne w komorach paleniskowych z ciekłym odprowadzeniem żużła (węgiel kamienny) (Orłowski i in. 1979)

TABLE 1. The heat load in hard coal fired combustion chambers with liquid slag discharge (Orłowski et al. 1979)

Komory paleniskowe	Obciążenie cieplne		Temperatura w cyklonie lub komorze topienia [°C]
	przestrzeni [kW/m <sup>3</sup> ]	przekroju [kW/m <sup>2</sup> ]	
Komora na ciekły żużel	$0,175 \cdot 10^3$	$3,5-4,6 \cdot 10^3$	1 500
Komora topienia	$0,58 \cdot 10^3$	$3,5-4,6 \cdot 10^3$	1 600
Cyklon poziomy	$4,6-5,8 \cdot 10^3$	$14-16 \cdot 10^3$	1 750
Cyklon przedni	$1,2-3,5 \cdot 10^3$	$14-16 \cdot 10^3$	1 700
Cyklon pionowy	$0,7 \cdot 10^3$	$4,6-7 \cdot 10^3$	1 600

Jednym z problemów technicznych, jakie powoduje spalanie w kotłach pyłowych i fluidalnych, to emisja pyłów. W przypadku tych urządzeń wymagana jest zabudowa instalacji odpylających w postaci najczęściej elektrofiltrów lub filtrów workowych. Rozmiary i koszty budowy tych instalacji wynikają głównie z ilości pyłu zawartego w strumieniu spalin. W przypadku palenisk cyklonowych możliwe jest znaczące ograniczenie emisji pyłów już podczas realizacji procesu spalania w komorze paleniska cyklonowego. Paleniska cyklonowe cechują się tym, że paliwo podawane jest stycznie do wewnętrznych ścian komory, w tym przypadku zarówno na ziarna paliwa jak i cząstki pyłu działa duża siła odśrodkowa, która w znacznym stopniu ogranicza unos popiołu oraz paliwa z komory spalania paleniska cyklonowego. W zależności od konstrukcji paleniska te różnią się współczynnikiem przechwyty popiołu. Dla poszczególnych palenisk jest on następujący – tabela 1. Obciążenie cieplne w komorach paleniskowych z ciekłym odprowadzeniem żużła (węgiel kamienny) (Orłowski i in. 1979):

- ✧ cyklon poziomy (rys. 1a) – 80–90%;
- ✧ cyklon przedni (rys. 1b) – około 80%;
- ✧ cyklon pionowy (rys. 1c) – 70–80%.

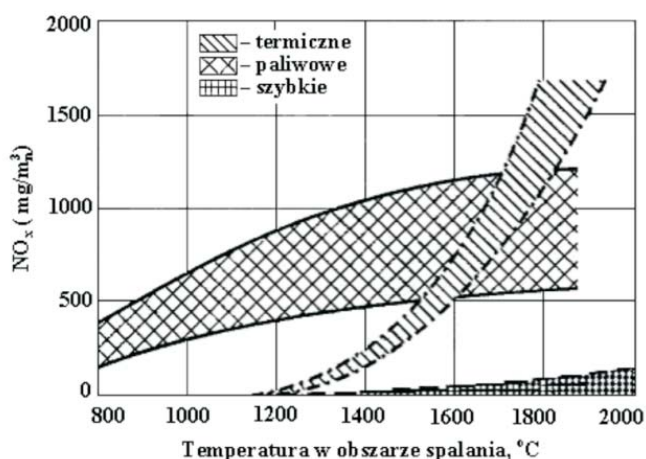
Największe wytrącenie popiołu można uzyskać stosując cyklony poziome. W takim przypadku palenisko składa się z palnika cyklonowego poziomego, komory topienia i komory dopalania. Jak wspomniano, temperatury panujące podczas spalania w paleniskach cyklonowych przekraczają temperatury topienia popiołu. Z tego też względu wytrącony podczas spalania w silnie zawirowanym strumieniu popiół ulega topieniu i odprowadzany jest w postaci płynnej do wanny żuźlowej. Płynny żużel pełni także funkcję ochronną wnętrza komory paleniska cyklonowego. Co więcej – zastygając na powierzchniach materiałów ogniotrwałych, chroni je przed działaniem wysokiej temperatury (tab. 1) jako pewna forma izolacji termicznej, co dodatkowo zwiększa temperaturę spalania i poprawia warunki prowadzenia procesu spalania. W przypadku zbyt grubej warstwy żużla osadzonego na powierzchniach wewnętrznych komory spalania następuje wyraźny wzrost temperatury powodujący częściowe stopienie osadzonego żużla. Ta forma ochrony i samoregulacji termicznej komory ma istotne znaczenie podczas pracy paleniska cyklonowego. Dodatkowo warstwa stopionego żużla na ściankach komory chroni jej materiały ogniotrwałe przed szkodliwymi oddziaływaniami substancji gazowych powstałych podczas procesu spalania oraz silnej erozji. Ze względu na wysokie temperatury spalania i dobre mieszanie podczas tego procesu, a także długie czasy pobytu paliwa w komorze palenisk cyklonowych ilość substancji palnych w popiele nie przekracza 1–1,5%. Uzyskiwane w postaci stopionej popioły mogą być zagospodarowane np. do celów produkcji materiałów budowlanych czy budowy dróg i nie stanowią już odpadu trudnego do składowania, jakim są popioły lotne zawierające pewną ilość pierwiastka C oraz metale ciężkie takie jak rtęć (Wichliński i in. 2013). Dodatkową cechą topienia popiołu w paleniskach cyklonowych, jest możliwość spalania w nich różnego rodzaju materiałów niebezpiecznych, zawierających np. metale ciężkie. W tym przypadku w stopionych popiołach zostają deponowane niebezpieczne substancje, które nie stanowią już zagrożenia dla człowieka i środowiska naturalnego. Jednym z celów, który przyświecał powstaniu oraz rozwojowi palenisk cyklonowych, była możliwość spalania węgla charakteryzujących się niską temperaturą topnienia popiołu. Paliwa te nie mogły być stosowane w kotłach pyłowych ze względu na zagrożenie zanieczyszczeniem powierzchni ogrzewalnych stopionymi cząstkami popiołu. Paliwa te jednak wyśmienicie nadają się do zastosowania w paleniskach cyklonowych z płynnym odprowadzaniem żużla. Dodatkowo paleniska cyklonowe pozwalają na spalanie paliw charakteryzujących się wysoką zawartością popiołu. Stosowanie takich paliw w kotłach pyłowych stwarza poważne trudności z utrzymaniem czystości powierzchni ogrzewalnych kotła oraz ich erozją.

Kolejną z zalet palenisk cyklonowych jest to, że nie wymagają one tak drobnego mielenia jak to ma miejsce w przypadku kotłów pyłowych. Wystarcza jedynie zastosowanie kruszarek węgla, które pozwalają na uzyskanie uziarnienia poniżej 4–5 mm. Nie ma potrzeby stosowania różnego rodzaju młynów węglowych, co przekłada się także na ograniczenie potrzeb energetycznych przygotowania paliwa.

Dodatkowo paleniska cyklonowe pozwalają na spalanie paliw o niskich wartościach opałowych. W tym przypadku w celu uzyskania stabilnych warunków pracy oraz wymaganego poziomu temperatury ze względu na proces topienia popiołu możliwe jest współspalanie takiego

paliwa z paliwami o wyższych wartościach opałowych. jednakże wysoka temperatura procesu ułatwia spalanie paliw o niższych wartościach opałowych.

Przedstawione korzyści przemawiają za budową i stosowaniem palenisk cyklonowych, jednak paleniska te posiadają także pewne wady. Jedną z nich jest wysoki poziom emisji NO<sub>x</sub>. Związany jest on głównie z wysokimi temperaturami prowadzenia procesu spalania. Na rysunku 2 przedstawiono wpływ warunków temperaturowych na mechanizm tworzenia NO<sub>x</sub>. Widoczne jest, że w zakresie pracy palenisk cyklonowych następuje gwałtowny wzrost emisji termicznych tlenków azotu. Z tego też powodu rozwój palenisk cyklonowych został zahamowany. Poprzez stworzenie odpowiednich warunków prowadzenia procesu możliwe jest za pomocą metod pierwotnych pewne ograniczenie emisji NO<sub>x</sub> przy spalaniu węgla w paleniskach cyklonowych. Ograniczenie emisji NO<sub>x</sub> można uzyskać poprzez optymalizację procesu spalania przez dopasowanie wartości współczynnika nadmiaru powietrza i jego odpowiednie wymieszanie z paliwem. Innymi sposobami ograniczenia emisji NO<sub>x</sub> są: stopniowe doprowadzanie powietrza do spalania (rozciągnięcie procesu spalania), recyrkulacja spalin lub stopniowe doprowadzanie powietrza i paliwa (*reburning*) (Pronobis 2002).



Rys. 2. Wpływ warunków temperaturowych na mechanizm tworzenia NO<sub>x</sub> (Pronobis 2002)

Fig. 2. Effect of temperature on the mechanism of NO<sub>x</sub> formation (Pronobis 2002)

W przypadku palenisk cyklonowych możliwe jest także stosowanie wtórnych metod zmniejszania tlenków azotu. Metody te wymagają zabudowy bardziej złożonych układów kontroli emisji NO<sub>x</sub>, jednak nie kolidują z procesem spalania i dają zwykle lepsze wyniki w zakresie redukcji NO<sub>x</sub> niż metody pierwotne. Dwie najczęściej stosowane metody wtórne to selektywna redukcja katalityczna (SCR) i selektywna redukcja niekatalityczna (SNCR). Realizacja tych metod wymaga odpowiedniego okna temperaturowego. W przypadku SCR redukcja występuje w obecności katalizatora, zwykle w 300–400°C, ale zakres temperatury może być rozszerzony w zależności od użytego katalizatora. W przypadku natomiast SNCR, temperatura musi wynosić powyżej 800°C. Przy zbyt wysokiej temperaturze, powyżej 1100°C, dochodzi do utleniania amoniaku do postaci tlenków azotu. Na skuteczność tej metody wpływa

także czas kontaktu amoniaku lub mocznika z gazami zawierającymi NO. W przypadku silnie zawirowanych przepływów jakie mają miejsce w paleniskach cyklonowych należy się spodziewać wysokiej skuteczności tej metody redukcji NOx.

Jednym z czynników, który przemawia na niekorzyść budowy i eksploatacji palenisk cyklonowych jest wymaganie materiałowe, dotyczące zarówno materiałów ogniotrwałych jak również stali na powierzchni ogrzewalnej, ze względu na wysokie temperatury panujące wewnątrz komór spalania oraz erozję, powodującą wycieranie powierzchni wewnętrznej po wprowadzeniu do komór spalania palenisk cyklonowych paliwa z dużą prędkością. Zjawiska erozyjne są przyczyną głównych uszkodzeń i awarii palenisk cyklonowych. W pewnym stopniu wymurówka chroniona jest poprzez topiony i zastygający na powierzchni wymurówki żużel.

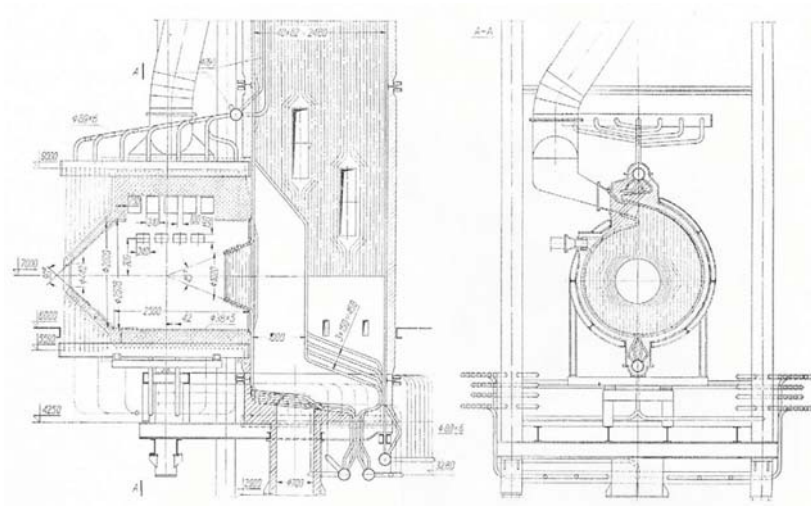
W paleniskach cyklonowych istnieje konieczność wprowadzenia paliwa do ich wnętrza w silnie zawirowany ruch pozwalający na uzyskanie znakomitych warunków mieszania paliwa z utleniaczem oraz wydłużenie czasu pobytu paliwa w komorze spalania. Te względy wymagają jednak dostarczenia znacznych ilości energii w strumieniu gazu wprowadzanego do komory spalania. Konieczne jest więc uzyskanie większych spręży na wentylatorach lub sprężarkach w porównaniu do kotłów pyłowych i fluidalnych. Potrzeby własne palenisk cyklonowych są jednak porównywalne z kotłami pyłowymi ze względu na to, że pomimo wyższego zapotrzebowania na energię do napędu wentylatora nie wymaga się stosowania energochłonnych młynów węglowych (Stultz i Kitto 2005).

## 2. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych palenisk cyklonowych

Rozwój palenisk cyklonowych rozpoczął się w pierwszej połowie XX wieku, a główny cel ich powstania to umożliwienie spalania węgla mającego niską temperaturę topnienia, który nie mógł być stosowany w kotłach pyłowych i fluidalnych. Paleniska te rozwijane były zarówno na świecie, jak i w Polsce. Przykłady kilku rozwiązań konstrukcyjnych palenisk cyklonowych zostaną przedstawione poniżej.

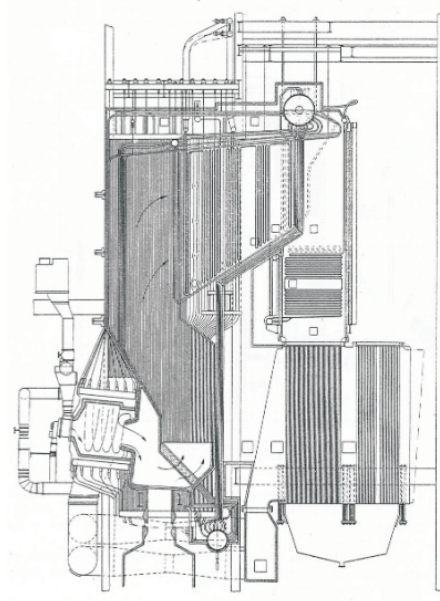
Na rysunku 3 ukazano widok pierwszego w Polsce kotła energetycznego typu OCG-64 z paleniskiem cyklonowym. Największe wytrącenie popiołu, dochodzące do 90%, można uzyskać stosując cyklon poziomy (rys. 3). Palenisko to składa się z palnika cyklonowego poziomego, komory topienia i komory dopalania. Rury przegrodowe między komorą topienia a komorą dopalania są okółkowane i pokryte materiałem ogniotrwałym. Rury cyklonów i komór topienia są włączone w obieg wodny kotła z naturalnym obiegiem wody, albo w układ przepływowy kotłów przepływowych. Układ rur cyklonu poziomego pokazany został na rysunku 3.

Na rysunku 4 przedstawiono kocioł z poziomym cyklonem. W celu ułatwienia odprowadzania płynnego żużla z komory paleniska cyklonowego stosuje się jej pochYLENIE od 5 do 30°. Wyprowadzany z komory spalania płynny żużel kierowany jest do wanny żużlowej, a następnie jest z niej wyprowadzany i rozdrabniany. Spaliny opuszczające komorę paleniska cyklonowego przepływają przez zestaw typowych powierzchni ogrzewalnych.



Rys. 3. Palnik cyklonowy poziomy kotła o wydajności 64 t/h (Orłowski i in. 1979)

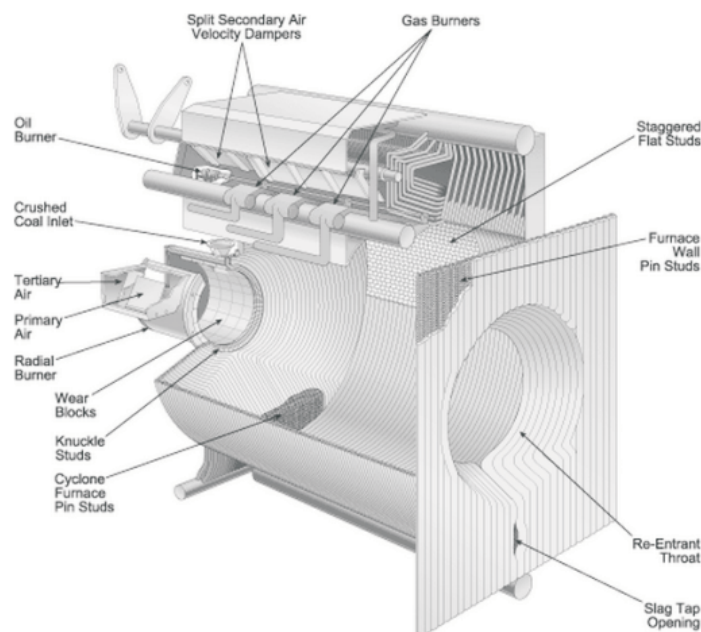
Fig. 3. Horizontal cyclone burner at a 64 t/h boiler (Orłowski et al. 1979)



Rys. 4. Kocioł dla odprowadzania żużla w stanie ciekłym z palnikiem cyklonowym (Wróblewski i in. 1954)

Rys. 4. Liquid slag discharge boiler with cyclone furnace (Wróblewski et al. 1954)

Na rysunku 5 przedstawiono palenisko cyklonowe konstrukcji firmy Babcock & Wilcox. Palenisko może współpracować z różnymi typami kotłów. Można w nim spalać węgiel bitumiczny, subbitumiczny, kamienny i brunatny, olej opałowy, gaz ziemny. Możliwe jest również eksperymentalne współspalanie paliwa pochodzącego z opon (TDF – *Tire Derived Fuel*),



Rys. 5. Schemat paleniska cyklonowego firmy Babcock & Wilcox (Stultz i Kitto 2005)

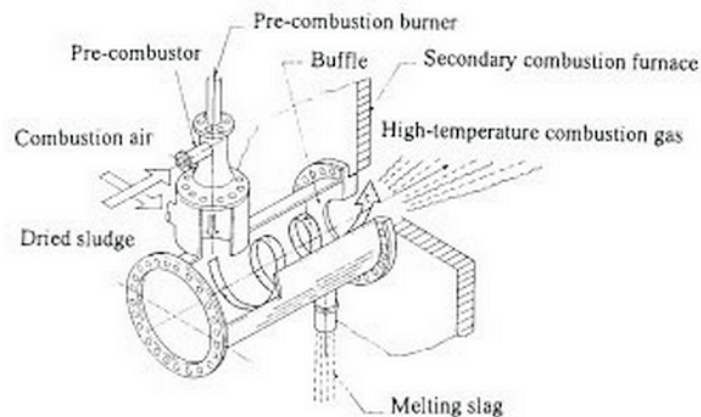
Rys. 5. Schematics of a cyclone furnace of Babcock & Wilcox (Stultz i Kitto 2005)

paliwa odpadowego (RDF – *Refuse Derived Fuel*), odpady papierniczo-celulozowe, drewno, koks naftowy i gaz koksowniczy.

Na rysunku 6 przedstawiono poziome palenisko cyklonowe do spalania wysuszonych osadów ściekowych. Palenisko to przeznaczone jest do spalania i stapiania wysuszonych osadów ściekowych (osadu ściekowe w sproszkowanej postaci z zawartością wilgoci na poziomie zaledwie kilku procent) oraz niedopalonego popiołu z procesów spalania. Temperatura spalania wynosi około 1500°C. Sproszkowane osady lub niedopalony popiół dostarczane są stycznie, do górnej części strumienia paleniska z dużą prędkością, wraz powietrzem do spalania i paliwem pomocniczym, gdzie zostają zawirowane i spalone. Wprowadzony z paliwem popiół topi się dzięki wysokiej temperaturze i sływa przez otwór wylotowy w dolnej części komory spalania cyklonowego. W celu ograniczenia emisji tlenków azotu w palenisku cyklonowym spalanie odbywa się przy udziale utleniacza mniejszym niż teoretyczny, natomiast pozostała część utleniacza doprowadzana jest do komory dopalania, gdzie następuje całkowite spalanie paliwa.

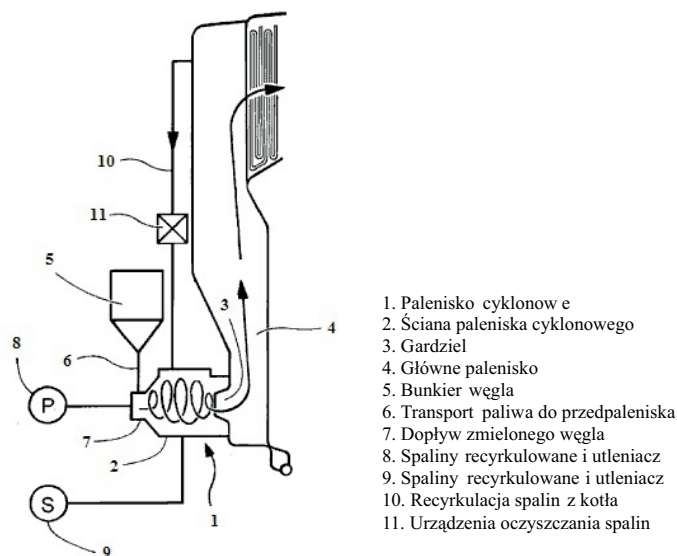
Na rysunku 7 przedstawiono palenisko cyklonowe, pozwalające na realizację oxy-spalania wraz z recyrkulacją spalin. Palenisko to składa się z poziomej komory spalania, do której doprowadzane jest paliwo wraz z recyrkulowanymi spalinami. Do paleniska doprowadzane są recyrkulowane spaliny wraz z tlenem, a poprzez odpowiedni rozdział strumieni spalin recyrkulowanych oraz spalin zawierających utleniacz możliwa jest kontrola procesu spalania. W przypadku proponowanego rozwiązania spaliny pobierane z kotła na potrzeby recyrkulacji podlegają oczyszczeniu, co zapewnia obniżenie emisji szkodliwych substancji. Poprzez zastoso-





Rys. 6. Schemat paleniska cyklonowego do spalania wysuszonych odpadów ściekowych (www.khi.co.jp)

Rys. 6. Schematics of a cyclone furnace for the combustion of dry sewage sludge (www.khi.co.jp)



Rys. 7. Schemat paleniska cyklonowego pozwalającego na realizację oxy-spalania wraz z recykulacją spalin (Publikacja patentowa 2006)

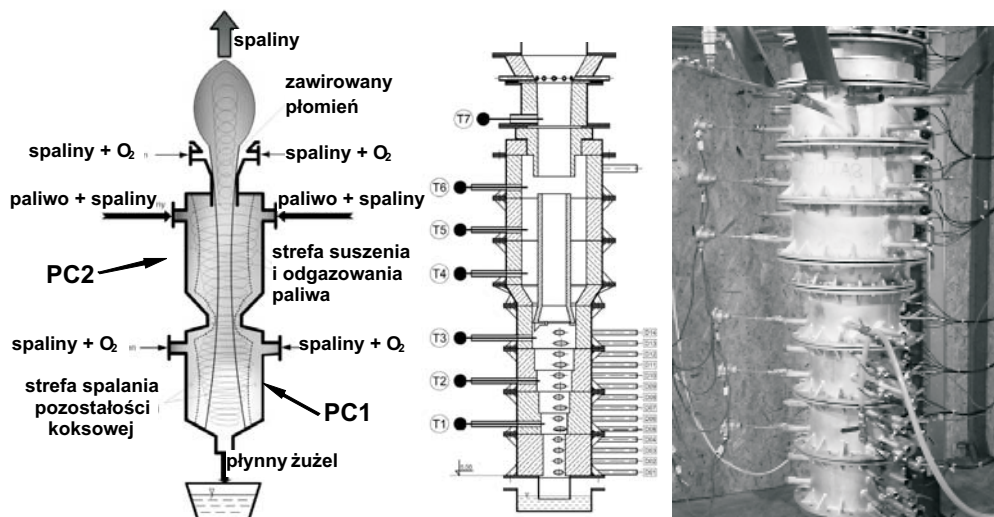
Rys. 7. Schematics of cyclone furnace with flue gas recirculation intended for oxycombustion (patent publication 2006)

wanie procesu oxy-spalania możliwe jest ograniczenie emisji NO<sub>x</sub> oraz uzyskanie spalin zawierających wysokie stężenie CO<sub>2</sub>.

Oprócz przedstawionych przykładów rozwiązań konstrukcyjnych i zastosowania palenisk cyklonowych powstał szereg rozwiązań palenisk cyklonowych, których szczegóły można znaleźć w polskich opisach patentowych. Największy wkład w rozwój palenisk cyklonowych

w naszym kraju wniósł Rudolf Żamojdo. Przykładem rozwiązań konstrukcyjnych palenisk cyklonowych opracowanych w naszym kraju są opisy patentowe dotyczące: paleniska cyklonowego (nr 55023), paleniska cyklonowego na paliwo stałe (nr 55034), sposobu i paleniska do spalania niskokalorycznych gazów (nr 133939), paleniska cyklonowego do spalania osadów tłuszczowych (nr 137038), paleniska cyklonowego do spalania odpadów paliw stałych, półstałych i ciekłych (137039), pieca cyklonowego do intensywnej przeróbki lub spalania zdyspergowanych surowców mineralnych (nr 107058).

W ostatnim okresie czasu w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych pt. „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” Zadanie Badawcze nr 2 „Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub>”, w Katedrze Inżynierii Energii Politechniki Częstochowskiej pod kierownictwem prof. Bisa trwają prace nad pionowym paleniskiem cyklonowym do realizacji procesu oxy-spalania pyłu węglowego (Zarzycki i in. 2013a, b, c). Koncepcja budowy tego paleniska zakłada, że w ramach paleniska cyklonowego realizowany będzie jedynie proces odgazowania paliwa, jego zgazowania oraz spalania pozostałości koksowej. Produkty odgazowania i zgazowania węgla mogą zostać np. spalone w komorze kotła pyłowego. W celu realizacji założonego celu komora paleniska cyklonowego podzielona została na dwie części: górną (PC2), w której następuje proces suszenia i odgazowania paliwa, oraz dolnej (PC1) w której następuje proces jego częściowego zgazowania i spalania pozostałości koksowej. W przypadku realizacji procesu oxy-spalania i stosowania recykulacji spalin, a także stopniowaniu ilości tlenu w komorze PC1, możliwe jest znaczące ograniczenie emisji tlenków azotu. Dzięki możliwości wyprowadzania płynnego żużla z paleniska ilość unoszonego popiołu z paleniska jest znacząco ograniczona, co korzystnie wpłynie na stan powierzchni ogrzewalnych np. kotła pyłowego. Na rysunku 8 przedstawiono schemat oraz widok paleniska cyklonowego.



Rys. 8. Schemat oraz widok paleniska cyklonowego

Fig. 8. Schematics and view of the cyclone furnace

## Podsumowanie

Zawarte w pracy informacje dotyczące palenisk cyklonowych pozwalają stwierdzić, że urządzenia te posiadają duży potencjał dotyczący ich stosowania w energetyce zawodowej. Umożliwiają one spalanie paliw ciekłych stałych i gazowych, a także paliw o niskich wartościach opałowych, zawierających znaczne ilości popiołu i niskiej temperaturze topnienia. Dzięki silnemu zawirowaniu możliwe jest znaczące wydłużenie czasu pobytu paliwa w komorze spalania, co nie jest możliwe w przypadku kotłów pyłowych. Dzięki zawirowaniu możliwe jest także znaczące – dochodzące do 90% – ograniczenie ilości popiołu lotnego, popiół jest odprowadzany głównie w postaci płynnej, pozwalając na związanie zanieczyszczeń.

Oprócz wspomnianych zalet paleniska te charakteryzowały się także wysoką emisją NO<sub>x</sub>. Jednak poprzez zastosowanie metod pierwotnych i wtórnych możliwe jest uzyskanie emisji NO<sub>x</sub> na dopuszczalnym poziomie. Zastosowanie jednak technologii oxy-spalania w dużym stopniu eliminuje problem NO<sub>x</sub>.

Paleniska te umożliwiają zarówno na prowadzenie procesu spalania, jak i zgazowania paliwa, co pozwala na zastosowanie zarówno w energetyce zawodowej, jak i w różnych procesach technologicznych.

Należy się spodziewać, że w przeciągu najbliższych lat paleniska cyklonowe – pozwalające na oxy-spalanie i zgazowanie paliwa – będą się silnie rozwijać oraz dzięki swoim zaletom będą stosowane w energetyce zawodowej.

Praca naukowa dofinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych pt. „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” Zadanie Badawcze nr 2 „Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub>”, umowa nr SP/E/2/66420/10.

This scientific work was supported by the National Centre for Research and Development, within the confines of the Research and Development Strategic Program “Advanced Technologies for Energy Generation” project no. 2 “Oxy-combustion technology for PC and FBC boilers with CO<sub>2</sub> capture”. Agreement no. SP/E/2/66420/10. The support is gratefully acknowledged.

## Literatura

- [1] NOWAK, W. i PRONOBIS, M. 2010. *Nowe technologie spalania i oczyszczania spalin*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [2] NOWAK, W. i CZAKIERT, T. 2012. *Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytywaniem CO<sub>2</sub>*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [3] KACPRZAK i in. 2014 – KACPRZAK, A., KOBYLECKI, R., WŁODARCZYK, R. i BIS, Z. 2014. The effect of fuel type on the performance of a direct carbon fuel cell with molten alkaline electrolyte. *Journal of Power Sources* 255, s. 179–186.
- [4] KACPRZAK i in. 2013 – KACPRZAK, A., WŁODARCZYK, R., KOBYLECKI, R., ŚCISŁOWSKA, M. i BIS, Z. 2013. Fuel cell as part of clean technologies. [W:] Pawłowski A., Dudzińska M.R.,

- Pawłowski L. (eds.), *Environmental Engineering IV*, CRC Press, London: Taylor & Francis Group, s. 443–450, ISBN 978-0-415-64338-2.
- [5] ORŁOWSKI i in. 1979 – ORŁOWSKI, P., DOBRZAŃSKI, W. i SZWARC, E. 1979. *Kotły parowe*. WNT Warszawa.
- [6] WRÓBLEWSKI, T. 1954. *Kotły parowe*. PWN, Warszawa.
- [7] WICHLIŃSKI i in. 2013 – WICHLIŃSKI, M., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2013. Wybrane metody oznaczania zawartości rtęci w węglach i popiołach lotnych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków, s. 287–299, PL ISSN 1429-6675.
- [8] PRONOBIS, M. 2002. Modernizacja kotłów energetycznych. WNT, Warszawa.
- [9] STULTZ, S.C. i KITTO, J.B. 2005. Steam/its generation and use. 41st edition, *The Babcock & Wilcox Company*, ISSN 1556-5173.
- [10] www.khi.co.jp – <http://www.khi.co.jp> Introduction of Japanese Advanced Environmental Equipment. Japan Society of Industrial Machinery Manufacturers 2001.
- [11] Publikacja patentowa 2006 – Publikacja patentowa Stanów Zjednoczonych (2006) nr US 2006/0201405 A1. Cyclone furnaces for oxygen boilers with flue gas recirculation.
- [12] ZARZYCKI i in. 2013a – ZARZYCKI, R., KRATOFIL, M., PAWŁOWSKI, D., ŚCISŁOWSKA, M., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2013a. Układ podawania paliwa do przedpaleniska cyklonowego. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 313–324.
- [13] ZARZYCKI i in. 2013b – ZARZYCKI, R., KRATOFIL, M., PAWŁOWSKI, D., ŚCISŁOWSKA, M., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2013b. Analiza spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 325–337.
- [14] ZARZYCKI i in. 2013c – ZARZYCKI, R., KRATOFIL, M., PAWŁOWSKI, D., ŚCISŁOWSKA, M., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2013c. Analiza wyników obliczeń numerycznych przepływu pyłu węglowego oraz gazu w palenisku cyklonowym. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 301–312.

Robert ZARZYCKI, Rafał KOBYLECKI, Marcin KRATOFIL, Zbigniew BIS

## Development trends in cyclone furnace technology

### Abstract

This paper describes the construction of basic types of cyclone furnaces, including horizontal, front, and vertical cyclones, and proposes a possible route for implementation of oxycombustion technology in order to reduce the consumption of fossil fuels and provide a countermeasure against climate change. Cyclone furnaces have great potential for use in the modern power industry, providing suitable conditions for the combustion of gaseous, liquid, and/or solid fuels including those of high ash content and low ash melting temperature. Due to the strong vortex in the combustion chamber, the residence time of fuel particles can be significantly longer, achieving a substantial (up to 90%) reduction in fly ash.

The paper also presents the concept and prototype of an innovative vertical cyclone furnace. The furnace was designed by the authors of this text, and intended for the efficient oxycombustion of coal dust.

In the presented design it was assumed that the oxidation of fuel volatiles and char residue would be run separately in order to extend the range of fuels for possible oxycombustion and achieve the conditions for substantial reduction of NO<sub>x</sub> in the flue gas.

KEY WORDS: cyclone furnace, oxycombustion

