

Robert ZARZYCKI\*, Marcin KRATOFIL\*\*, Damian PAWŁOWSKI\*\*,  
Mariola ŚCISŁOWSKA\*\*, Rafał KOBYLECKI\*\*, Zbigniew BIS\*\*\*

## Analiza spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono nowatorską koncepcję realizacji procesu spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym. Projekt przedpaleniska cyklonowego oraz przedstawione w pracy obliczenia numeryczne spalania pyłu węglowego zrealizowano w ramach Programu Strategicznego „Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii”. Koncepcja przedpaleniska umożliwia odrębne spalanie części lotnych i produktów zgazowania węgla oraz pozostałości koksowej. Taka realizacja procesu spalania pozwala na zmniejszenie obciążenia cieplnego komory przedpaleniska cyklonowego i umożliwia stosunkowo proste zabudowanie go w istniejącym lub nowo projektowanym kotle pyłowym, pozwalając jednocześnie na uzyskanie w przedpalenisku wysokich temperatur wymaganych ze względu na konieczność topnienia popiołu oraz umożliwiając redukcję emisji  $\text{NO}_x$  w porównaniu do „klasycznego” spalania w atmosferze powietrza. W przypadku oxypalania pyłu węglowego spaliny opuszczające komorę spalania przedpaleniska cyklonowego charakteryzują się wysoką koncentracją  $\text{CO}_2$ , co jest korzystne ze względu na realizację procesów jego wychwytu i separacji. Przedstawione w pracy wyniki obliczeń numerycznych zawirowanego, wielofazowego przepływu ze spalaniem potwierdziły możliwości realizacji zakładanego rozdzielania procesu spalania części lotnych i pozostałości koksowej, wskazując także dodatkowo na możliwość prowadzenia w przedpalenisku procesu zgazowania węgla

**SŁOWA KLUCZOWE:** oxypalanie, palenisko cyklonowe, modelowanie numeryczne spalania

---

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

## Wprowadzenie

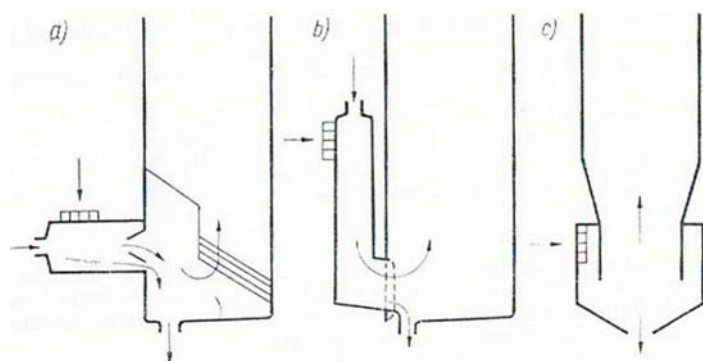
Podstawowym paliwem dla polskiej energetyki zawodowej jest węgiel kamienny i brunatny, z których polska energetyka wytwarza ponad 92% energii elektrycznej. W portfolio tym udział węgla kamiennego stanowi około 59%, natomiast węgla brunatnego około 34% (Grudziński 2010). Ze względu jednak na wysoką jednostkową emisję CO<sub>2</sub>, przypadającą na jednostkę energii elektrycznej generowanej z węgla, i wymogi Unii Europejskiej dotyczące ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> należy się spodziewać, że udział tego paliwa w produkcji energii elektrycznej oraz ciepła będzie sukcesywnie spadał (Chmielniak 2011). Rozwiązaniem problemu nadmiernej emisji CO<sub>2</sub> mogą być jednak prace nad oxyspalaniem węgla, realizowane obecnie m.in. w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych: „Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii”. Wyniki tych prac pozwolą – w założeniu – na opracowanie nowych technologii spalania z uwzględnieniem wychwytu i składowania dwutlenku węgla (CCS), wcześniej pozbawionego szkodliwych substancji, takich jak np. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, pył oraz Hg (Wichliński i in. 2012). Jedną z przyszłościowych technologii w tym zakresie jest spalanie pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym.

Rozwijane w XX wieku paleniska cyklonowe charakteryzowały się niską emisją popiołu lotnego (duża ilość popiołu odprowadzana była w postaci żużla), a generowane w trakcie spalania wysokie temperatury, przyczyniały się do poprawy sprawności, pozwalając także na spalanie gorszych gatunków paliw oraz różnego rodzaju odpadów. Paleniska te jednak w porównaniu do innych typów komór spalania charakteryzowały się wysokim poziomem emisji NO<sub>x</sub>, co było głównym powodem zakończenia ich rozwoju i stosowania w energetyce.

Technologia oxyspalania umożliwia jednak ponowny rozwój i renesans palenisk cyklonowych, gdyż proces spalania tlenowego pozwala na znaczące ograniczenie emisji NO<sub>x</sub> (Lasek 2011), a zastosowanie redukcji wysokotemperaturowej pozwoli – w założeniu – na osiągnięcie nawet 90% redukcji NO<sub>x</sub> (Normann i in. 2009). Zaletą tej metody redukcji jest podwyższenie sprawności spalania, realizowanego w zwartym palenisku o niewielkich gabarytach, wadą zaś jest konieczność utrzymywania niskiego udziału N<sub>2</sub> w utleniaczu, co będzie miało istotny wpływ na wybór sposobu separacji tlenu z powietrza oraz możliwość występowania korozji niskotemperaturowej (Normann i in. 2009).

Paleniska cyklonowe mogą mieć budowę pionową lub poziomą (rys. 1) i można spalać w nich różne paliwa, m.in. węgiel kamienny, brunatny, odpady komunalne, biomasę, a także gaz oraz paliwa ciekłe (Orłowski i in. 1979).

W porównaniu do tradycyjnych palenisk pyłowych ukierunkowanych na wykorzystanie węgla kamiennego paleniska cyklonowe pozwalają na spalanie paliw o większym uziarnieniu, z większą zawartością wilgoci i zawartością popiołu do 25%. Największą zaletą spalania węgla w paleniskach cyklonowych jest duży procent wychwyconego popiołu, który w zależności od konstrukcji może wynosić nawet 90% – jedynie 10% popiołu opuszcza palenisko wraz ze spalinami. Odprowadzanie wyłapanego popiołu realizowane jest w formie ciekłej, co jest korzystne ze względu na możliwość związania w żużlu niepożądanych substancji oraz możliwość wykorzystania takiego materiału np.: przy budowie domów,



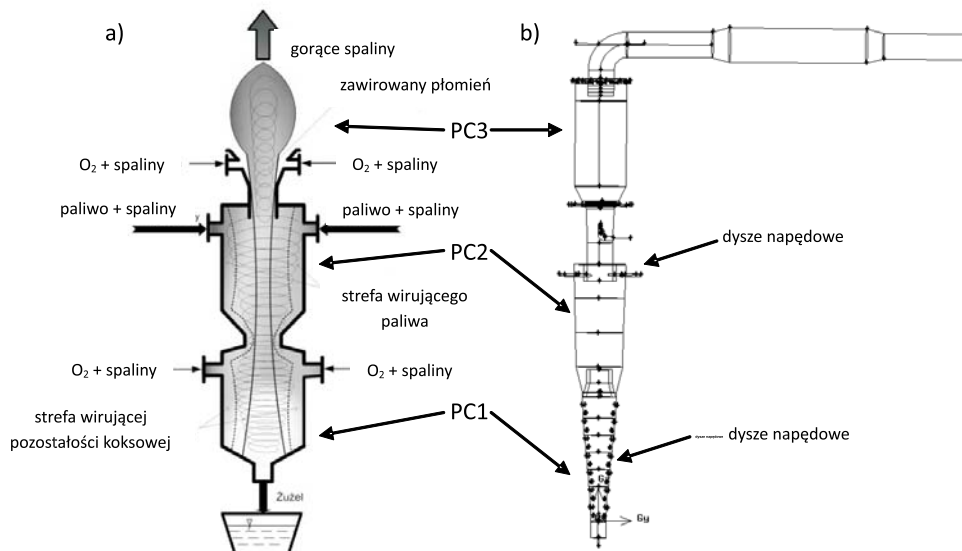
Rys. 1. Typy palenisk cyklonowych  
 a) cyklon poziomy; b) cyklon przedni; c) cyklon pionowy (dolny)  
 Źródło: Orłowski i in. 1979

Fig. 1. Cyclone furnace types  
 a) horizontal cyclone, b) frontal cyclone c) cyclone vertical (bottom)

dróg itp. Aby możliwe było odprowadzanie popiołu w formie ciekłej wymagane są jednak wysokie temperatury spalania, które wpływają na wzrost szybkości przebiegu reakcji. Zastąpienie całości lub pewnej ilości powietrza tlenem (oxyspalanie) zmienia w zasadniczy sposób kinetykę reakcji, a tym samym rozkład temperatury i warunki pracy przedpaleniska cyklonowego. Tym samym dla poprawnej realizacji oxyspalania wymagane jest opracowanie nowej konstrukcji przedpaleniska – osiągnięciu tego celu poświęcona jest niniejsza praca.

## 1. Koncepcja procesu oxyspalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym

Schemat oraz widok geometrii przedpaleniska cyklonowego przedstawiono na rysunku 2. Analiza procesu spalania w nim pyłu węglowego poprzedzona została procesem projektowania i obliczeń symulacyjnych, w efekcie których wprowadzono szereg założeń konstrukcyjnych i procesowych opisanych m.in. w (Bis i in. 2011a, b, c; Pawłowski i in. 2013; Zarzycki i in. 2013b). Założono, że proces spalania w przedpalenisku cyklonowym będzie całkowity oraz niezupełny, a dodatkowo zaproponowano rozdzielenie spalania części lotnych oraz gazowych produktów zgazowania węgla od spalania pozostałości koksowej. Takie warunki wynikają z konieczności ograniczenia obciążenia cieplnego komory przedpaleniska oraz możliwości wykorzystania części lotnych oraz gazowych produktów zgazowania węgla jako paliwa np. w palniku kotła pyłowego. Aby móc zrealizować powyższe założenia zaproponowano podział przedpaleniska cyklonowego na dwie strefy: komorę



Rys. 2. Schemat przedpaleniska cyklonowego dla realizacji procesu zgazowania oraz oxyspalania węgla (a) oraz widok geometrii modelowego przedpaleniska cyklonowego wraz z komorą dopalającą (b)

Fig. 2. Cyclone furnace diagram for the process of coal gasification and oxycombustion (a), and the geometry of the model cyclone furnace with after-burning chamber (b)

górną PC2, w której przewiduje się realizację procesu suszenia i odgazowania paliwa oraz komorę dolną PC1, w której realizowany będzie proces zgazowania węgla (produkcja CO i H<sub>2</sub>) oraz spalania pozostałości koksowej. Obydwie komory zostały połączone kanałem, w którym zabudowano odpowiednio ukształtowany nurnik wewnętrzny (rys. 2b).

Zakłada się, że paliwo w postaci pyłu węglowego wprowadzane jest w górnej części komory PC2 (rys. 2a) stycznie do tworzącej wraz z recyrkulowanymi spalinami za pomocą układu podawania paliwa (Zarzycki i in. 2013a, b). Pył węglowy po spirali przemieszczając się w dół nagrzewa się od ścian komory PC2, uwalnia wilgoć zawartą w paliwie, a w dalszej kolejności następuje wydzielanie części lotnych. W komorze PC2 atmosfera gazowa składa się głównie z powstałych części lotnych i wilgoci usuniętej z paliwa oraz spalin powstałych w komorze PC1 zawierających znikome ilości tlenu. Odgazowany w dużym stopniu pył węglowy przemieszcza się do komory PC1. Komora PC2 i PC1 połączone są kanałem z zabudowanym wewnętrznym nurnikiem ułatwiającym przemieszczanie się pyłu węglowego. W komorze PC1 zabudowano zestaw dysz napędowych, którymi wprowadzana jest stycznie do tworzącej mieszanka O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>; możliwe jest także wprowadzanie pary wodnej na potrzeby procesu zgazowania węgla oraz kontroli temperatury. Przepływ odgazowanego paliwa w komorze PC1 kontrolowany jest poprzez zmianę prędkości wypływu gazu z dysz napędowych oraz zmiany stężenia O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. Zakłada się, że w komorze PC1 realizowany będzie proces zgazowania paliwa (w górnej części komory PC1) oraz spalania pozostałości koksowej (w dolnej części komory PC1) z jednoczesnym procesem topienia popiołu. Aby uzyskać możliwość odprowadzania popiołu w formie ciekłej wymagane są wysokie wartości

temperatury, przekraczające w zależności od rodzaju paliwa 1500–1700 K, natomiast ze względu na wytrzymałość termiczną ceramiki pokrywającej ścianki stanowiska nie można przekroczyć 2000–2100 K.

## 2. Analiza numeryczna procesu oxyspalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym

Obliczenia numeryczne przepływu gazu, paliwa oraz procesu zgazowania i spalania pyłu węglowego poprzedzone zostały szeregiem analiz numerycznych, pozwalających na opracowanie geometrii przedpaleniska oraz ustalenie optymalnych warunków przepływowych (Bis i in. 2012b; Pawłowski 2013 i in.; Zarzycki i in. 2013b). Model przedpaleniska cyklonowego został opracowany w programie Gambit i rozszerzony o układ komory dopalającej PC3 oraz wylot spalin do komina (rys. 2b). Obliczenia przepływu pyłu węglowego oraz procesu spalania przeprowadzone zostały w programie ANSYS FLUENT 14, dla atmosfery zawierającej  $O_2/CO_2$ . Udział tlenu w gazie doprowadzanym do stanowiska (dysze napędowe komory PC1) na potrzeby utrzymania warunków przepływowych paliwa i spalania pozostałości koksowej przyjęty został na poziomie 34% (objętościowo). W dyszach napędowych zabudowanych w górnej części PC2, służących do podawania do stanowiska pyłu węglowego o średnicy około 500  $\mu m$ , podawany był jedynie dwutlenek węgla symulujący recyrkulowane spaliny.

Obliczenia przepływu gazu i paliwa zrealizowano przy wykorzystaniu modelu turbulencji *Reynolds Stress*, który zastosowano także w obliczeniach związanych z projektowaniem geometrii przedpaleniska (Bis 2012b, c; Pawłowski 2013; Zarzycki i in. 2013b); model ten dobrze sprawdza się w przepływach silnie zawirowanych. Modelowanie przepływu ziaren węgla przeprowadzono przy użyciu *Discrete Phase Model*, zaś spalanie pyłu węglowego zostało zrealizowane za pomocą *Species Transport*, który pozwala na modelowanie reakcji chemicznych zarówno w fazie stałej jak i gazowej (Toporov i in. 2008; Vascellari, Cau 2009; Chen i in. 2010; ANSYS Fluent Theory Guide 2011).

Obliczenia spalania pyłu węglowego wymagają wprowadzenia parametrów fizykochemicznych paliwa oraz stałych szybkości reakcji (Vascellari, Cau 2009). W tabeli 1 zestawiono parametry użytego w symulacji paliwa, dla uproszczenia przyjęto, że paliwo nie zawiera siarki. W opracowanym modelu procesu spalania uwzględniono możliwość podawania pary wodnej w celu realizacji procesu zgazowania węgla (Szuba, Michalik 1983; Jurkiewicz, Rosiński 1968).

Spalanie pyłu węglowego rozpoczyna się w momencie wprowadzenia paliwa do górnej części komory PC2. Paliwo zaczyna przemieszczać się po linii śrubowej w dół, jednocześnie rozpoczyna się proces jego suszenia i odgazowania wskutek poboru ciepła od gorących ścian komory PC2. Ze względu na ograniczenia programu FLUENT, który dopuszcza odgazowanie paliwa wyłącznie do jednego składnika – „zastępczy” rozdział substancji paliwa

TABELA 1. Wyniki analizy technicznej i elementarnej paliwa użytego w symulacji

TABLE 1. The results of ultimate and proximate analysis of the fuel used for simulation

Analiza techniczna	[-]	Analiza elementarna	[-]
Części lotne	0,45	C	0,85
Pozostałość koksowa	0,45	H	0,1
Popiół	0,05	O	0,04
Wilgoć	0,05	N	0,01

Proces obliczeń zgazowania i spalania części lotnych oraz pozostałości koksowej został opisany sześcioma reakcjami:

1. Reakcja spalania części lotnych  $x_1 \text{ VOL} + x_2 \text{ O}_2 = y_1 \text{ CO} + y_2 \text{ H}_2\text{O} + y_3 \text{ N}_2$   
gdzie  $x_1, x_2, y_1, y_2, y_3$  – współczynniki stechiometryczne
2. Reakcja utleniania tlenku węgla  $\text{CO} + 0,5 \text{ O}_2 = \text{CO}_2$
3. Reakcja utleniania karbonizatu (FC)  $\text{C}_{(s)} + 0,5 \text{ O}_2 = \text{CO}$
4. Reakcja Boudouarda  $\text{C}_{(s)} + \text{CO}_2 = 2 \text{ CO}$
5. Reakcja syntezy gazu wodnego  $\text{C}_{(s)} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$
6. Reakcja utleniania wodoru  $\text{H}_2 + 0,5 \text{ O}_2 = \text{H}_2\text{O}$

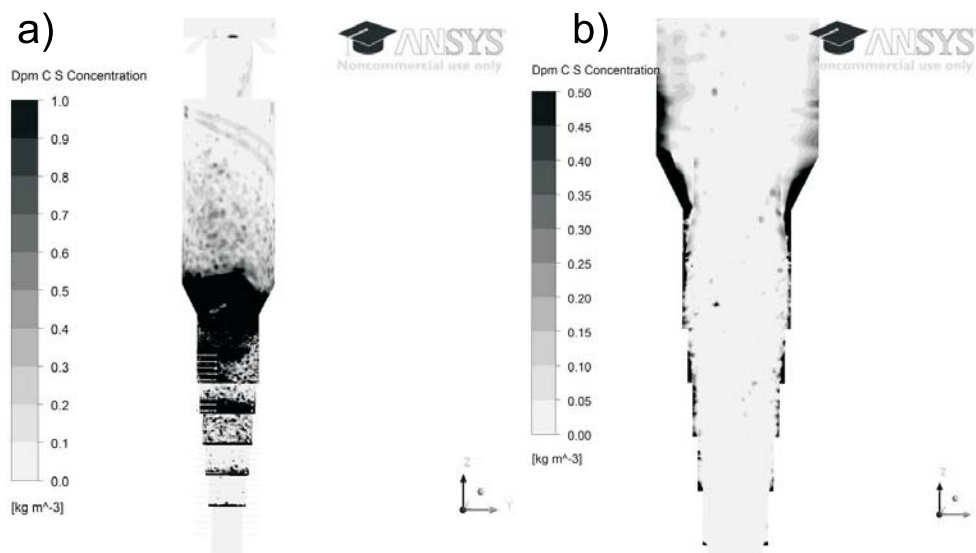
w procesie odgazowania realizowany jest na *Volatile* (części lotne – VOL) i *Fixed Carbon* (pozostałość koksowa – FC). Po odgazowaniu rozpoczyna się spalanie karbonizatu (*Fixed Carbon*) w komorze PC1. Obliczenia przeprowadzone zostały dla przypadku spalania paliwa w atmosferze wzbogaconej tlenem do 34%, pozostałą ilość gazu podawanego przez dysze napędowe komory PC1 stanowi  $\text{CO}_2$ . Paliwo w ilości  $1 \cdot 10^{-3}$  kg/s podawane było do komory PC2 stycznie, dwoma wlotami rozmieszczonymi po przeciwległych stronach komory. Paliwo podawane było wraz z  $\text{CO}_2$ , obie fazy wypływają z dysz zasilających (napędowych) z prędkością 2,5 m/s. Ponad komorą PC2 znajduje się komora PC3 (dopalająca), w której w dolnej części zabudowanych zostało 12 dysz doprowadzających mieszankę  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  w proporcjach 34/66%. Ponad komorą dopalającą zabudowano kolano, do którego poziomo doprowadzane było strumienią powietrze w celu wywołania w przedpalenisku podciśnienia oraz ochłodzenia spalin wylotowych poprzez ich rozcieńczenie w strumieniu wprowadzanego powietrza.

Wyniki obliczeń numerycznych przepływu ziaren paliwa w przedpalenisku cyklonowym oraz procesu spalania przedstawiono na rysunkach 3–7. Na rysunku 3a przedstawiono rozkład chwilowej koncentracji paliwa na ścianach paleniska cyklonowego. W górnej części komory PC2 widoczny jest „warkocz” paliwa, spływającego po gorących ścianach komory; koncentracja ziaren paliwa znacząco wzrasta w sąsiedztwie leja i nurnika wewnętrznego. Na rysunku 3b przedstawiono rozkład chwilowej koncentracji paliwa w przekroju pionowym dolnej części paleniska cyklonowego. Zauważyć można, że paliwo znajdujące się w dolnej części komory PC2 przemieszcza się szczeliną pomiędzy ścianami przedpaleniska a nurnikiem wewnętrznym.

W komorze PC1 (rys. 3b) paliwo przemieszcza się głównie po ścianach przedpaleniska. W tej części następuje proces spalania pozostałości koksowej, a gorące gazy spalinowe

przeptywajac poprzez nurnik wewnetrzny do komory PC2 powoduja tam nagrzewanie scian oraz przeplywajacego tam paliwa. Rozklad chwilowej szybkości odgazowania na scianach przedpaleniska cyklonowego przedstawiono na rysunku 4a. Widoczne jest, że w wyniku przeplywu goracych spalin (rys. 5a) w sasiedztwie nurnika wewnetrznego nastepuje intensywny proces suszenia oraz odgazowania przeplywajacego tam paliwa. Odgazowane w duzym stopniu paliwo przeplywa do komory PC1, w ktorej w atmosferze wzbogaconej tlenem (34% O<sub>2</sub>) nastepuje proces spalania pozostalosci koksowej. Rozklad chwilowej szybkości wypalania paliwa przedstawiony zostal na rys. 4b. Widoczne jest, że najwieksza szybkość wypalania paliwa znajduje się w polowie wysokosci komory PC1, natomiast na najnizszym stopniu tej komory nie obserwuje się juz spalania (rys. 4b) ze wzgledu na brak paliwa w tej czesci (rys. 3a i b). Taka realizacja procesu wynika z odpowiednio dobranych warunkow przeplywu gazu napędowego (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) oraz paliwa, a podyktowana jest redukcja straty niecałkowitego spalania. Rozklad sredniej temperatury w przekroju pionowym paleniska przedstawiony zostal na rysunku 5a. Widoczne jest, że w obrębie analizowanego przekroju wystepuja dwa obszary wysokich temperatur. Pierwszy obszar pokrywa się z miejscem najwiekszych chwilowych szybkości wypalania paliwa (rys. 4b), drugi obszar zlokalizowany jest w komorze dopalajacej PC3, gdzie nastepuje dopalanie czesci lotnych (rys. 6a), tlenu węgla (rys. 6b), oraz wodoru (rys. 7b) powstalego w wyniku gazowania para wodna.

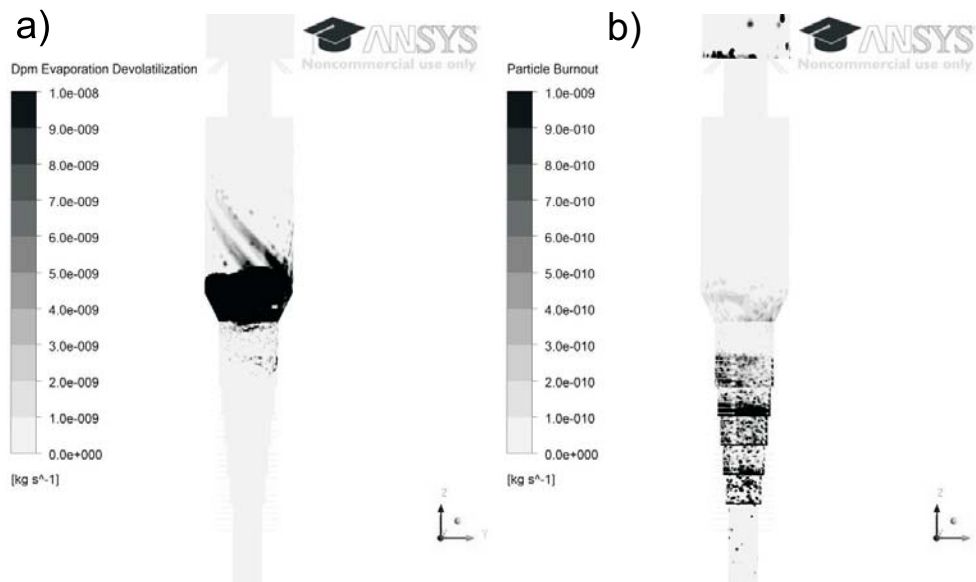
Rozklad sredniego udzialu objętościowego CO<sub>2</sub> w przekroju pionowym przedpaleniska cyklonowego przedstawiono na rysunku 5b. Obszary najwiekszych stężeń CO<sub>2</sub> pokrywaja



Rys. 3. Rozklad koncentracji na scianach paleniska cyklonowego (a), rozklad koncentracji paliwa w przekroju pionowym dolnej czesci paleniska cyklonowego (b)

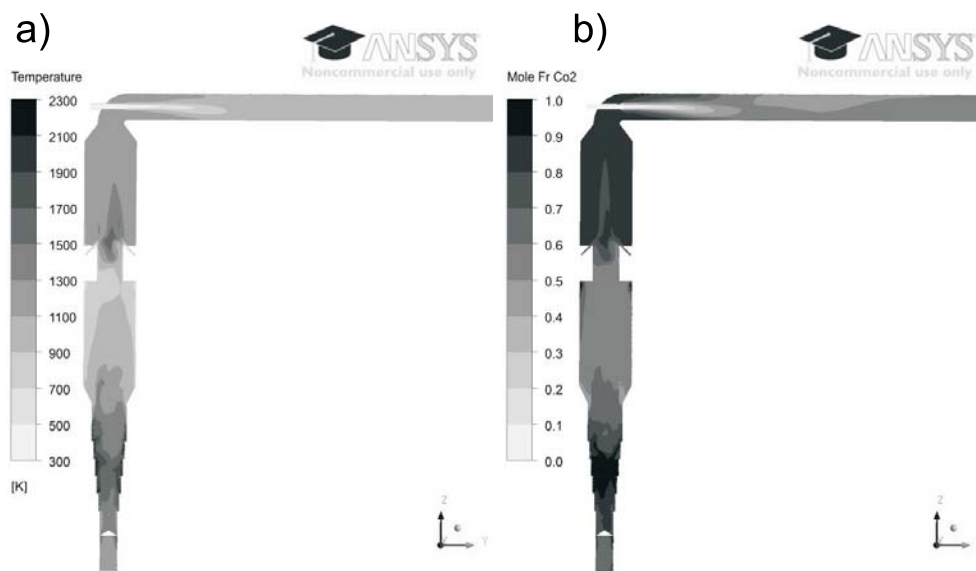
Fig. 3. Distribution of the concentration at cyclone furnace walls (a), and the distribution of fuel concentration in the bottom of the vertical section of the cyclone furnace (b)





Rys. 4. Szybkość odgazowania (a) oraz szybkości wypalania paliwa na ścianach paleniska cyklonowego (b)

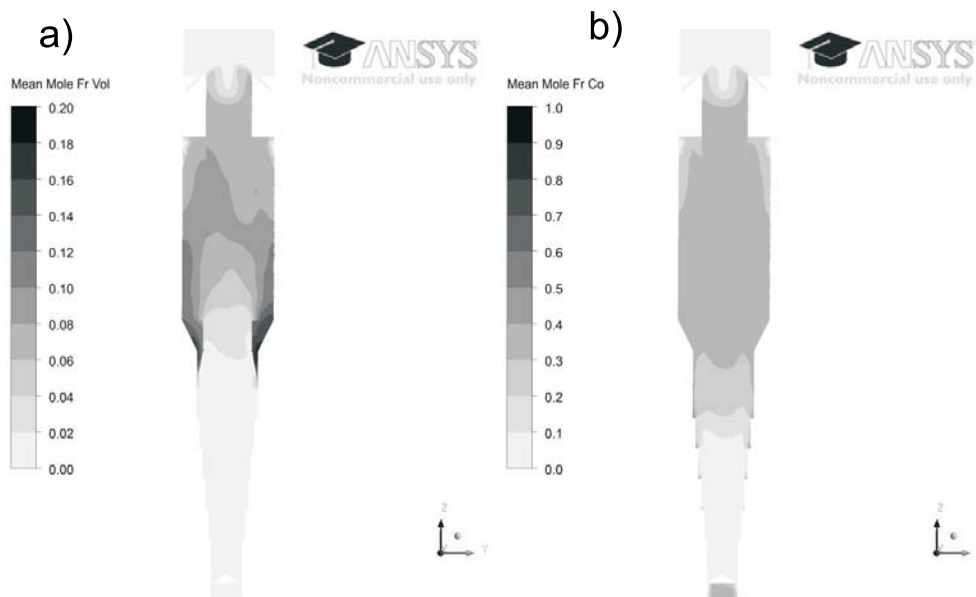
Fig. 4. Devolatilization rate (a) and fuel burnout rate at the walls of the cyclone furnace (b)



Rys. 5. Rozkład temperatury w przekroju pionowym paleniska cyklonowego (a), udział objętościowy CO<sub>2</sub> w przekroju pionowym paleniska cyklonowego (b)

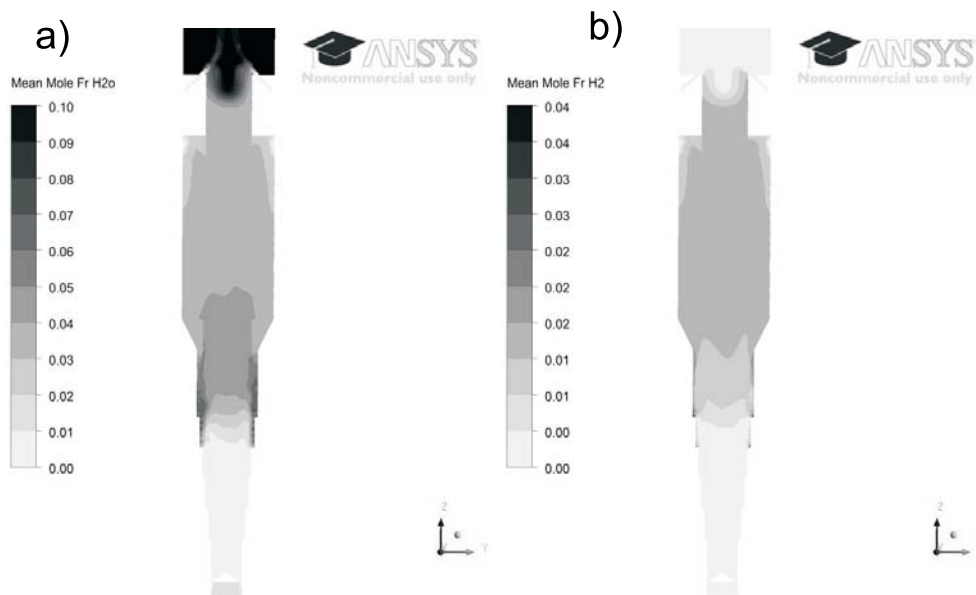
Fig. 5. The temperature distribution in vertical section of the cyclone furnace (a), the volume of CO<sub>2</sub> fraction in the vertical section of the cyclone furnace (b)





Rys. 6. Rozkład udziału molowego części lotnych (a) oraz rozkład udziału molowego CO w przekroju pionowym paleniska cyklonowego (b)

Fig. 6. Distribution of the mole fraction of volatiles (a) and the distribution of the CO mole fraction in the vertical section of the cyclone furnace (b)



Rys. 7. Rozkład udziału molowego H<sub>2</sub>O w przekroju pionowym paleniska cyklonowego (a), rozkład udziału molowego H<sub>2</sub> w przekroju pionowym paleniska cyklonowego (b)

Fig. 7. Distribution the mole fraction of H<sub>2</sub>O in the vertical section of a cyclone furnace (a), the distribution of the mole fraction of H<sub>2</sub> in the vertical section of the cyclone furnace (b)

się ze strefami najwyższych temperatur i szybkości wypalania pozostałości koksowej. W komorze PC1 stężenie CO<sub>2</sub> dochodzi do blisko 100% w połowie jej wysokości. Ze względu na podstechiometryczny proces spalania w górnej części komory PC1 następuje tam obniżenie stężenia CO<sub>2</sub> w wyniku zajścia reakcji Boudouard'a i powstania tam tlenku węgla (rys. 6b).

Reakcja Boudouarda jest reakcją endotermiczną, co wyraźnie wpływa na spadek temperatury w górnej części komory PC1 (rys. 5a). Analizując dalej rozkład udziału objętościowego CO<sub>2</sub> zaobserwować można dalsze obniżanie stężenia CO<sub>2</sub> w wyniku przebiegu procesu suszenia i odgazowania, na rysunku 6a przedstawiono rozkład średniego udziału objętościowego części lotnych. Największe stężenie części lotnych występuje w dolnej części komory PC2 i pokrywa się z obszarem największych szybkości odgazowania (rys. 4a). W celu kontroli temperatury w komorze PC1 oraz możliwości realizacji procesu zgazowania paliwa w górnej części komory PC1, wraz z dwutlenkiem węgla oraz tlenem, dyszami napędowymi podawana jest para wodna. Rozkład średniego udziału objętościowego pary wodnej w przekroju pionowym przedpaleniska przedstawiono na rysunku 7a. Zgodnie z reakcją syntezy gazu wodnego (reakcja nr 5) w górnej części komory PC1 obserwuje się wzrost udziału objętościowego H<sub>2</sub> (rys. 7 b).

Realizowane w komorze PC1 procesy zgazowania paliwa pozwalają na ograniczenie ilości wydzielanego w tym obszarze ciepła, a tym samym wpływają na kontrolę temperatury. Powstałe produkty zgazowania oraz części lotne wynoszone wraz ze spalinami poza obręb przedpaleniska cyklonowego (komora PC1 i PC2) ulegają spalaniu w komorze dopalania PC3, którą może stanowić np. komora spalania kotła pyłowego.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń oxyspalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym o nowej konstrukcji. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność sformułowanych założeń konstrukcyjnych oraz przebiegu procesu spalania w przedpalenisku cyklonowym. Odpowiednie przyjęcie proporcji geometrycznych przedpaleniska oraz ustalenie właściwych parametrów przepływowych umożliwiło rozdzielenie procesu spalania części lotnych i produktów zgazowania węgla od spalania pozostałości koksowej. Stwierdzono także, że wprowadzenie do przedpaleniska pary wodnej pozwala na kontrolę temperatury oraz procesu zgazowania węgla.

Opracowana konstrukcja przedpaleniska może być zastosowana w istniejących lub nowo budowanych kotłach pyłowych, np. jako zamiennik palnika pyłowego, a realizacja spalania pyłu węglowego w atmosferze wzbogaconej w tlen pozwala na uzyskanie spalin o wysokiej koncentracji CO<sub>2</sub> (ułatwiającej wychwyty i składowanie dwutlenku węgla) oraz niskiej zawartości NO<sub>x</sub>, który w przypadku spalania w czystym tlenie tworzony będzie jedynie z azotu zawartego w paliwie.

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

## Literatura

- ANSYS Fluent Theory Guide, 2011.
- BIS i in. 2011a – BIS Z., KOBYLECKI R., ZARZYCKI R., 2011 – Analiza cieplno-przepływowa przedpaleniska cyklonowego w warunkach oxyspalania węgla. Raport wewnętrzny PStrateg 2/17/2011/Dz (etap 37) z dnia 01.05.2011, Częstochowa.
- BIS i in. 2012b – BIS Z., KOBYLECKI R., ZARZYCKI R., 2012 – Opracowanie założeń konstrukcyjnych modelowego paleniska cyklonowego. Raport wewnętrzny PStrateg 2/13/2012/Dz (etap 37) z dnia 02.01.2012. Częstochowa.
- BIS i in. 2012c – BIS Z., KOBYLECKI R., ZARZYCKI R., 2012 – Wstępne wyniki badania paliw. Raport wewnętrzny PStrateg 2/17/2011/Dz (etap 37) z dnia 01.05.2011, Częstochowa.
- CHEN i in. 2010 – CHEN L., GAZZINO M., GHONIEM A.F., 2010 – Characteristics of pressurized oxy-coal combustion under increasing swirl number. 35th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems. Clearwater, Florida.
- CHMIELNIAK T., 2011 – Szanse i bariery rozwoju technologii energetycznych paliw kopalnych. *Polityka Energetyczna* t. 14, z. 2, 23–34.
- GRUDZIŃSKI Z., 2010 – Konkurencyjność wytwarzania energii elektrycznej z węgla brunatnego i kamiennego. *Polityka Energetyczna* t. 13, z. 2, 157–170.
- JURKIEWICZ J., ROSIŃSKI S., 1968 – *Karbochemia*. PWN, Warszawa.
- LASEK J., 2011 – Spalanie w tlenie a emisja tlenków azotu. Stan wiedzy i perspektywy badawcze. *Energetyka* nr 7(685), r. 64.
- Młodzi naukowcy dla Polskiej Nauki 10, Nauki inżyneryjne.
- NORMANN F., et al., 2009 – Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process. *Progress in Energy and Combustion Science*. 35(5), p. 385–397
- ORŁOWSKI i in. 1979 – ORŁOWSKI P., DOBRZAŃSKI W., SZWARC E., 1979 – *Kotły Parowe – Konstrukcje i Obliczenia*. Wydanie 3 Rozszerzone, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- PAWŁOWSKI i in., 2013 – PAWŁOWSKI D., ZARZYCKI R., BIS Z., KOBYLECKI R., KRATOFIL M., 2013 – Analiza przepływu gazu i paliwa w przedpalenisku cyklonowym. *Mat. konferencyjne*.
- SZUBA J., MICHALIK L., 1983 – *Karbochemia*. Wydawnictwo „Śląsk”.
- TOPOROV i in. 2008 – TOPOROV D., BOCIAN P., HEIL P., KELLERMANN A., STADLER H., TSCHUNKO S., FÖRSTER M., KNEER R., 2008 – Detailed investigation of a pulverized fuel swirl flame in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmosphere. *Combustion and Flame* vol. 155, pp. 605–618.
- WICHLIŃSKI i in. 2012 – WICHLIŃSKI M., KOBYLECKI R., BIS Z., 2012 – Przegląd metod ograniczenia emisji rtęci w elektrowniach podczas spalania paliw stałych. *Polityka Energetyczna* t 15, z. 4, 151–160.
- VASCELLARI M., CAU G., 2009 – Numerical simulation of pulverized coal oxycombustion with exhaust gas recirculation. *Proceeding of CCT2009 Fourth International Conference on Clean Coal Technologies*. Dresden, Germany.

ZARZYCKI i in. 2013a – ZARZYCKI R., KRATOFIL M., PAWŁOWSKI D., ŚCISŁOWSKA M., KOBYLEC-  
KI R., BIS Z., 2013a – Układ podawania paliwa do przedpaleniska cyklonowego. Złożono do  
druku.

ZARZYCKI i in. 2013b – ZARZYCKI R., KRATOFIL M., PAWŁOWSKI D., ŚCISŁOWSKA M., KOBYLEC-  
KI R., BIS Z., 2013b – Analiza wyników obliczeń numerycznych przepływu pyłu węglowego  
oraz gazu w palenisku cyklonowym. Złożono do druku.

Robert ZARZYCKI, Marcin KRATOFIL, Damian PAWŁOWSKI, Mariola ŚCISŁOWSKA,  
Rafał KOBYLECKI, Zbigniew BIS

## Analysis of pulverized coal combustion in the furnace cyclone

### Abstract

This paper presents a novel concept for the process of combustion of pulverized coal in a cyclone furnace. It offers the possibility of separate combustion of fuel volatiles and fixed carbon. This implementation allows for a reduction in the specific heat load in the furnace chamber and also for a coupling of the cyclone furnace both to the existing as well as to newly erected pulverized combustors. Compared to 'standard' air combustion, the oxycombustion process realized in the designed furnace provides sufficient conditions for melting of the fuel ash and for a reduction in emissions of  $\text{NO}_x$ . Since the flue gases at the outlet of the cyclone furnace contain a significant amount of  $\text{CO}_2$ , the carbon dioxide may quite easily be separated and transported to  $\text{CO}_2$  storage facilities. The numerical calculations of the multiphase swirl flow combustion confirmed the advantages of the proposed furnace design and indicated favourable conditions for the coal gasification process.

KEY WORDS: oxycombustion, cyclone furnace, numerical modeling of combustion