

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

## Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym

**STRESZCZENIE.** W pracy przedstawiono koncepcję oraz propozycję budowy przedpaleniska cyklonowego. Projekt przedpaleniska cyklonowego zakłada rozdzielanie procesu spalania części lotnych i produktów zgazowania węgla od spalania pozostałości koksowej. W tym celu konstrukcja przedpaleniska podzielona została na strefy, w których następuje oddzielnie proces odgazowania węgla i spalania pozostałości koksowej.

Badania procesu spalania/zgazowania węgla przeprowadzono dla różnych warunków procesowych. W pracy dokonano analizy wpływu zarówno strumienia powietrza podawanego do przedpaleniska jak i różnych miejsc jego podawania. Analizie poddano także wpływ strumienia paliwa na procesy zachodzące w przedpalenisku cyklonowym.

W trakcie przeprowadzonych badań ustalono, że możliwe jest prowadzenie zarówno procesu spalania jak i zgazowania w przedpalenisku cyklonowym, a wynika to głównie z miejsca wprowadzania i strumienia powietrza. Stwierdzono, że poprzez stopniowanie powietrza możliwa jest kontrola temperatury oraz obniżenie emisji NO. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że jednym z kluczowych czynników mających wpływ na procesy spalania i zgazowania paliwa w przedpalenisku cyklonowym jest minimalna ilość powietrza niezbędna ze względu na proces wirowania paliwa.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przedpalenisko cyklonowe, spalanie, zgazowanie węgla

---

\* Dr inż., \*\* Mgr inż., \*\*\* Prof. dr hab. inż. – Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii, Katedra Inżynierii Energii, ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa; e-mail: zarzycki@is.pcz.czest.pl, mkratofil@is.pcz.czest.pl, d.pawlowski@is.pcz.czest.pl, m.scislowska@is.pcz.czest.pl, rafalk@is.pcz.czest.pl, zbis@is.pcz.czest.pl

## Wprowadzenie

Procesy konwersji energii chemicznej paliw kopalnych w przypadku energetyki zawodowej realizowane są najczęściej w kotłach pyłowych i fluidalnych. W przypadku mniejszych obiektów – jak lokalne ciepłownie – stosowane są także różnego rodzaju kotły rusztowe, charakteryzujące się niższą sprawnością oraz wyższymi poziomami emisji szkodliwych substancji w porównaniu do kotłów pyłowych i fluidalnych. Pomimo tego, że procesy spalania paliw w kotłach realizowane są już od długiego czasu nadal prowadzi się badania nad opracowywaniem nowych, bardziej sprawnych i bardziej przyjaznych środowisku naturalnemu sposobów konwersji energii chemicznej paliw na ciepło i energię elektryczną (Muskala i in. 2008; Nowak i Pronobis 2010; Nowak i Czakiert 2012).

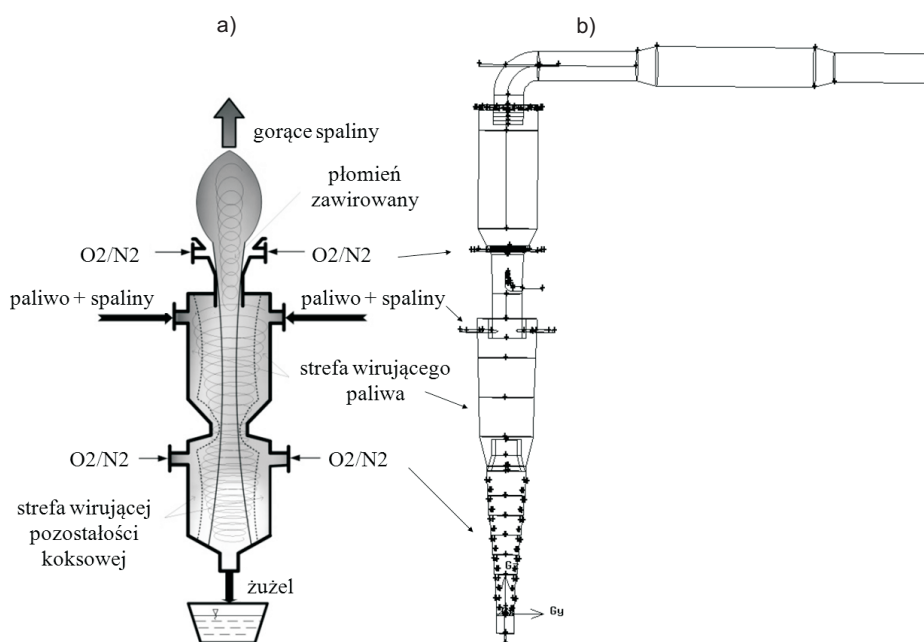
Jedną z metod realizacji w sposób efektywny procesu spalania jest zastosowanie paleniska cyklonowego (Zarzycki i in. 2013a; 2013b, 2013c). Paleniska te rozwijane były w XX wieku, jednak wysoka emisja NO<sub>x</sub> przyczyniła się do zahamowania ich rozwoju. W dobie realizacji procesu spalania tlenowego w kotłach pyłowych i fluidalnych wydaje się ważne, aby paleniska cyklonowe posiadające szereg zalet powróciły także do technicznego wykorzystania.

W pracy przedstawiono koncepcję budowy oraz wyniki badań technologicznych spalania pyłu węglowego przeprowadzonych na modelowym przedpalenisku cyklonowym w warunkach spalania powietrznego.

### 1. Budowa przedpaleniska cyklonowego

Przedstawione w niniejszej pracy przedpalenisko cyklonowe zostało opracowane i zbudowane w Katedrze Inżynierii Energii Politechniki Częstochowskiej. Schemat oraz widok geometrii modelu przedpaleniska cyklonowego przedstawiono na rysunku 1. Analiza procesu spalania pyłu węglowego poprzedzona została pracami projektowymi i numerycznymi obliczeniami symulacyjnymi z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent, w efekcie których opracowano właściwą geometrię przedpaleniska cyklonowego (Zarzycki i in. 2013a, 2013b, 2013c). Koncepcja pracy przedpaleniska zakłada, że proces spalania będzie realizowany jako spalanie całkowite i niepełne. Dodatkowo założono spalanie dwustopniowe, t.j. odrębnie części lotne i produkty zgazowania oraz pozostałość koksowa. Takie warunki wynikają z konieczności ograniczenia obciążenia cieplnego przekroju i objętości komory przedpaleniska cyklonowego, jak również z dążenia do zapewnienia możliwości wykorzystania gazów palnych jako paliwa np. do palników kotłów pyłowych. W konsekwencji, zaproponowano podział przedpaleniska cyklonowego na dwie strefy (rys. 1):

- ✧ komorę górną PC2, w której przewiduje się realizację procesu suszenia i odgazowania paliwa,
- ✧ komorę dolną PC1, w której realizowany będzie proces zgazowania węgla (ukierunkowanego na maksymalizację produkcji CO i H<sub>2</sub>) oraz spalanie pozostałości koksowej.



Rys. 1. Schemat przedpaleniska cyklonowego

Fig. 1. Schematics of the cyclone furnace

Na etapie projektu założono, że paliwo w postaci pyłu węglowego wprowadzane będzie wraz z recykulowanymi spalinami w górnej części komory PC2 (rys. 1 a). Paliwo wprowadzane jest do komory spalania za pomocą układu podawania i dozowania paliwa (Zarzycki i in. 2013a). Pył węglowy przemieszcza się po spirali w dół, w efekcie czego następuje jego nagrzewanie od ścian komory PC2, a następnie wydzielenie wilgoci oraz – w kolejnej fazie – wydzielenie części lotnych. Atmosferę gazową w komorze PC2 tworzą głównie części lotne oraz para wodna, a także spaliny przepływające z komory PC1, zawierające znikome ilości tlenu. Odgazowany w znacznym stopniu pył węglowy przemieszcza się do komory PC1.

Komory PC2 i PC1 połączone są kanałem z zabudowanym wewnętrznym nurnikiem, ułatwiającym przemieszczanie się pyłu węglowego przy zewnętrznej ścianie paleniska. W komorze PC1 zabudowano zestaw dysz napędowych, którymi stycznie wprowadzane jest powietrze. Przepływ pionowy odgazowanego paliwa w komorze PC1 kontrolowany jest głównie poprzez zmianę prędkości wypływu gazu z dysz napędowych oraz zmianę miejsca wprowadzania gazu odpowiednią dyszą/dyszami.

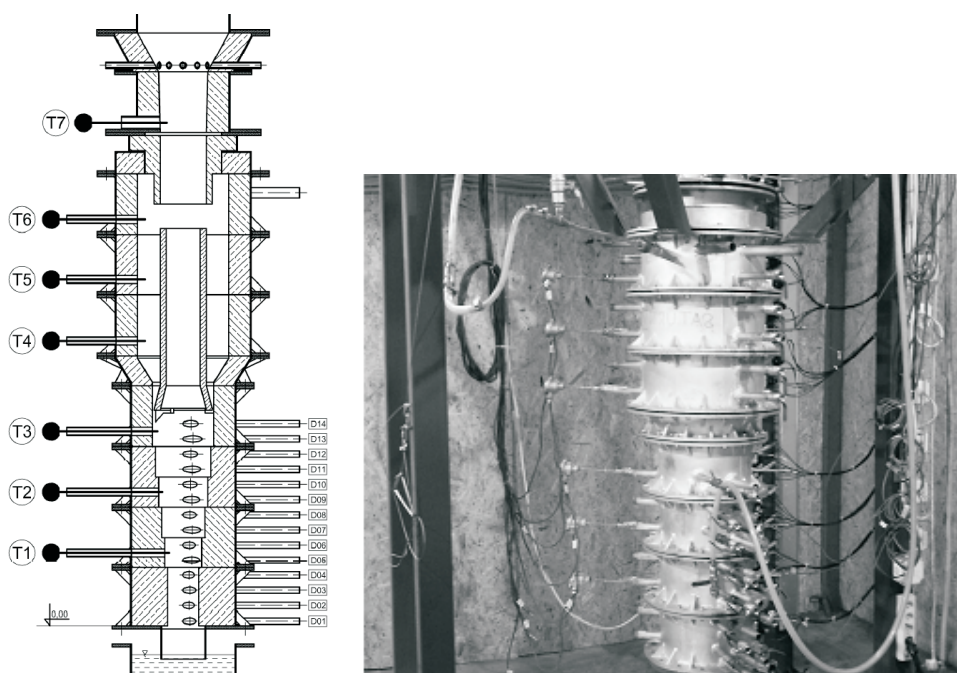
W proponowanej koncepcji przedpaleniska zakłada się, że w górnej części komory PC1 realizowany będzie proces zgazowania paliwa, zaś w części dolnej następować będzie spalanie pozostałości koksowej oraz topienie popiołu. Dla zapewnienia możliwości odprowadzania popiołu w fazie ciekłej wymagane jest osiągnięcie w tej strefie temperatury przekraczającej 1100°C.

Zakłada się, że otrzymywany na wylocie z komory PC2 gaz składać się będzie w dużym stopniu z CO, H<sub>2</sub> oraz części lotnych i pewnych ilości sadzy. Gazy te mogą być niezwłocznie

spalane, np. w palniku kotła pyłowego. Istotne jest, aby gazy te zawierały jak najwięcej składników palnych, co pozwoli na zwiększenie ich wartości opałowej i ułatwi ich wykorzystanie.

Poprzez dążenie do rozdzielenia procesu spalania części lotnych i pozostałości koksowej w przedpalenisku możliwe jest uzyskiwanie wysokiego strumienia produktów (gazów palnych), przy jednoczesnym znaczącym obniżeniu obciążenia cieplnego komory przedpaleniska cyklonowego. Jest to korzystne, gdyż pozwala m.in. na zastosowanie tańszych materiałów do jego budowy i zmniejszenie jego rozmiarów.

Przedpalenisko cyklonowe przedstawione na rysunku 2 posiada budowę modułową i zostało podwieszane na ramie. Każdy z modułów części PC1 i PC2 składa się z warstwy betonu żaroodpornego zabudowanego na korpusie stalowym. W warstwie betonu żaroodpornego umieszczono zestawy grzałek elektrycznych z termoparami w celu nagrzewania wymurówki podczas rozruchu stanowiska. Grzałki elektryczne umożliwiają nagrzanie wymurówki do temperatury około 500°C i kontrolowane są za pomocą automatycznych sterowników temperatury. W każdym module części PC1 znajdują się cztery dysze napędowe, usytuowane stycznie i rozmieszczone po dwie na każdej ze zweżających się części wymurówki. Dysze te zostały wykonane z rury ceramicznej zakończonej dyszą o średnicy 5 mm. Poniżej komory PC1 znajduje się wanna żużlowa wypełniona wodą, stanowiąca zamknięcie wodne uniemożliwiające dopływ powietrza do wnętrza przedpaleniska. Wanna żużlowa pozwala na schładzanie płynnego żużla wyprowadzanego z komory paleniskowej oraz zatrzymanie ewentualnie niespalono-



Rys. 2. Schemat oraz widok przedpaleniska cyklonowego

Fig. 2. Schematics and view of the cyclone furnace

nych ziaren paliwa. Każdy z modułów PC1 i PC2 wyposażony został w wizjery pozwalające na obserwacje procesu spalania wewnątrz stanowiska oraz pobór próbek odgazowanego paliwa, a także próbek gazu. Komory PC1 i PC2 połączone zostały za pomocą modułu przejściowego z zabudowanym wewnątrz nurnikiem. W górnej części PC2 umieszczono stycznie naprzeciwko siebie dwa wloty paliwa. Wylot z PC2 zakończono nurnikiem wylotowym połączonym szczelnie z pokrywą wykonaną z wymurówki żaroodpornej zabudowanej na korpusie stalowym. W górnej części stanowiska znajduje się komora dopalania PC3, pozwalająca na dopalanie powstałych gazów. Stanowisko badawcze wyposażono dodatkowo w układ kontroli dozowania gazu do procesu spalania oraz układ pomiaru temperatury w wybranych miejscach komory PC1 i PC2. Pomiar temperatury podczas procesu spalania pyłu węglowego realizowany jest w siedmiu punktach pomiarowych oznaczonych od T1 do T7, a analiza gazu opuszczającego komory PC1 i PC2 realizowana jest jednocześnie z pomiarem temperatury w punkcie T7. Informacje dotyczące rozmieszczenia termopar w stanowisku zestawiono w tabeli 1. Schemat i widok modelu stanowiska przedstawiono na rysunku 2.

TABELA 1. Położenie termopar pomiarowych

TABLE 1. Placement data of thermocouples

Nr termopary	Wysokość od poziomu 0,0 [mm]
T7	1 658
T6	1 340
T5	1 140
T4	940
T3	640
T2	440
T1	240

## 2. Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym

Przedstawione w niniejszej pracy badania technologiczne spalania pyłu węglowego realizowane były w atmosferze powietrza. Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym poprzedzone zostały procesem nagrzewania elementów wymurówki ceramicznej przedpaleniska za pomocą grzałek elektrycznych do temperatury około 400–500°C, następnie uruchomiono palnik gazowy, pozwalający na osiągnięcie wewnątrz komory PC1 temperatury około 600–700°C. Po osiągnięciu tego poziomu temperatury wymurówki rozpoczynano podawanie paliwa przy jednoczesnej kontroli temperatury i zmniejszaniu ilości podawanego gazu. Po uzyskaniu stabilnego procesu spalania pyłu węglowego możliwe było całkowite zamknięcie

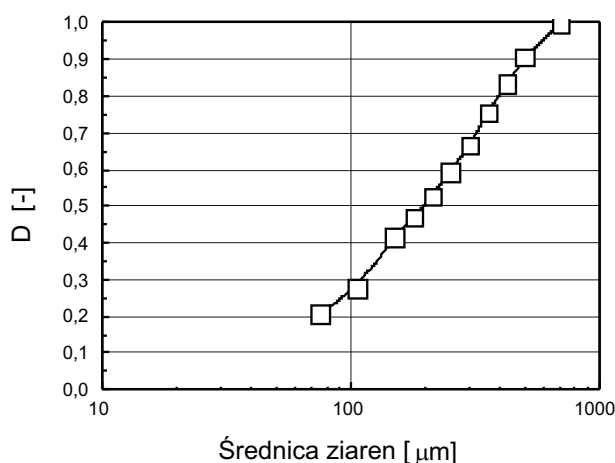
dopływu gazu i realizacja procesu spalania oparta jedynie na podawanym pyłe węglowym oraz powietrzu przez wybrany zestaw dysz napędowych zlokalizowanych w komorze PC1. Od tego momentu prowadzono proces spalania pyłu w celu uzyskania równowagi termicznej stanowiska. Po stwierdzeniu braku zmian temperatury wymurówki w czasie można było rozpocząć właściwy cykl badań.

W badaniach wykorzystany został węgiel kamienny o parametrach fizykochemicznych zawartych w tabeli 2. Palenisko cyklonowe zasilane było mieszanką pyłowo-powietrzną, rozkład ziarnowy pyłu przedstawiono na rysunku 3.

TABELA 2. Parametry fizykochemiczne paliwa

TABLE 2. Proximate analysis of the fuel and its HHV

W <sup>a</sup> [%]	A <sup>d</sup> [%]	VM <sup>d</sup> [%]	C <sup>d</sup> [%]	H <sup>d</sup> [%]	N <sup>d</sup> [%]	S <sup>d</sup> [%]	Q <sub>s</sub> <sup>d</sup> [kJ/kg]
8,58	4,62	32,40	78,03	6,22	1,72	1,09	27280



Rys. 3. Rozkład ziarnowy pyłu węglowego

Fig. 3. Particle size distribution of coal dust

Projekt przedpaleniska cyklonowego zakłada, że w nominalnych warunkach pracy podawane będzie 1 g/s pyłu węglowego, co pozwoli na uzyskanie mocy cieplnej na poziomie 20–25 kW. Dla użytego w badaniach paliwa minimalne zapotrzebowanie tlenu wynosiło 1,6 um<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/kg paliwa, co przy nominalnym strumieniu paliwa 3,6 kg/h określa minimalne zapotrzebowanie powietrza do spalania na poziomie 27,5 um<sup>3</sup> powietrza/h. Koncepcja prowadzenia procesu spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym zakłada spalanie w komorze PC1 jedynie koksiku powstałego z ziaren pyłu węglowego. Spalanie natomiast części lotnych i produktów zgazowania węgla odbywać się ma poza obrębem przedpaleniska cyklonowego w komorze PC3. Taki sposób realizacji procesu w znaczny sposób pozwala na ograniczenie obciążenia cieplnego przedpaleniska, a tym samym ograniczenie występujących

podczas procesu temperatur. Z tego też względu założono, że przy nominalnym strumieniu paliwa do komory PC1 doprowadzana zostanie jedynie pewna część powietrza niezbędna dla realizacji procesu wirowania i spalania pozostałości koksowej. Ze względu na trudność w określeniu jak i w jakim stopniu będzie przebiegać proces odgazowania pyłu węglowego w komorze PC2 oraz na podstawie obserwacji ilości pyłu węglowego, który może opadać do wanny żuźlowej stwierdzono, że minimalna ilość podawanego powietrza do komory PC1 nie może być mniejsza niż  $5 \text{ m}^3 / \text{h}$  dla przyjętej granulacji pyłu węglowego i jego nominalnego strumienia. Przyjęcie tego strumienia pozwala także na uzyskanie gazów palnych opuszczających komorę PC2 o możliwie wysokiej wartości opałowej. Stosując jednak ten niski strumień powietrza konieczne było wykorzystanie mniejszej liczby dysz napędowych w celu uzyskania odpowiednio dużego pędu strumienia do wprowadzenia pyłu węglowego w proces wirowania w celu minimalizacji straty niecałkowitego spalania. Badania spalania pyłu węglowego przeprowadzono także przy  $10 \text{ m}^3$  powietrza/h. W przypadku tej ilości powietrza możliwe było użycie znacznej większej liczby dysz napędowych.

W tabeli 3 zestawiono parametry prowadzenia poszczególnych testów z uwzględnieniem strumienia objętości powietrza podawanego do komory PC1, strumienia podawanego paliwa oraz wskazano, który zestaw dysz był aktualnie używany. W tabeli zestawiono także wartości średnie temperatury w poszczególnych miejscach oraz skład gazu opuszczający przedpalenisko cyklonowe w punkcie T7.

Analizując dane zestawione w tabeli 3 dla testów 1, 2 i 3 zaobserwować można wyraźny wpływ miejsca podawania powietrza na profil temperatury w komorze PC1 (termopary T1, T2 i T3) oraz na skład gazów w punkcie, gdzie zlokalizowana jest termopara T7. Widoczne jest, że zwiększając liczbę dysz napędowych w komorze PC1 możliwa jest zmiana lokalizacji frontu spalania. W przypadku zasilania komory PC1 za pomocą 6 dysz (test 3) obserwuje się wyraźny wzrost temperatury w górnej części komory PC1. Związane jest to z jednej strony ze zmianą aerodynamiki przepływu pyłu węglowego w komorze PC1 poprzez zmniejszenie tempa przepływu pyłu węglowego w kierunku wanny żuźlowej, z drugiej strony dostarczając powietrze na różnych poziomach można rozciągnąć proces spalania. Należy się spodziewać, że zmiana ilości dysz napędowych przy niezmiennym strumieniu gazu wpływa na zmiany prędkości gazu wypływającego z dysz napędowych. W tym przypadku wyraźnie zmieniają się także warunki dotyczące mieszania utleniacza z pyłem węglowym. W przypadku testu 1 zanotowano w gazie opuszczającym komorę PC2 około 13%  $\text{O}_2$  i jedynie około 4,5%  $\text{CO}_2$  przy bardzo wysokim stężeniu CO, przekraczającym zakres pomiarowy użytego analizatora (zakres CO analizatora wynosi 32500 ppm). W tym przypadku należy się spodziewać, że zastosowanie jedynie dwóch dysz napędowych znacząco pogarsza warunki mieszania powietrza z pyłem węglowym, o czym świadczy wysokie stężenie  $\text{O}_2$  i CO. Zwiększając natomiast liczbę dysz napędowych (test 2 i 3) obserwuje się znacząco odmienne poziomy stężenie analizowanych gazów. W tym przypadku na skutek lepszego wymieszania oraz rozciągnięcia procesu spalania wzdłuż wysokości zawartość tlenu w gazie opuszczającym komorę PC2 mieści się w granicach od 0,9 do 2,2% przy wyraźnym wzroście stężenia  $\text{CO}_2$  do poziomu 17,5 i 18,5%. W tych przypadkach emisja CO jest na poziomie 24 500 i 28 500 ppm. Na podstawie analizy wartości temperatury oraz składu gazów można stwierdzić, że poprzez zmianę ilości dysz napędowych możliwa jest zmiana sposobu realizacji procesu spalania pyłu węglowego. W przypadku testu 1 wskutek pogorszo-

TABELA 3. Zestawienie parametrów prowadzenia poszczególnych testów pomiarowych oraz średnie wartości temperatury i skład gazu w punkcie T7 przedpaleniska cyklonowego

TABLE 3. Test parameters, temperature, and composition of selected gas components at the T7 measurement port of the cyclone furnace

Nr testu	Pow [m <sup>3</sup> /h]	C [g/s]	Numery dysz	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO <sub>2</sub> [ppm]	SO <sub>2</sub> [ppm]
1	10	1	D01 D03	1112	1094	957	495	449	399	520	13,1	4,45	max	232	9	221
2	10	1	D01, D03 D05, D07	1107	1142	965	569	485	425	562	2,2	17,5	28500	180	8	365
3	10	1	D01, D03, D05 D07, D09, D11	1055	1120	990	670	553	468	572	0,9	18,5	24500	152	6	324
4	5	1	D01, D03 D05, D07	968	962	855	717	604	509	575	0,7	17,2	max	234	10	306
5	5	1	D01 D03	999	955	857	716	633	529	580	0,95	15,7	max	221	6	202
6	5	1.2	D01 D03	925	905	828	696	611	512	556	2,45	13,3	max	409	14	235
7	5	1.55	D01 D03	981	947	942	668	584	487	559	2,07	13,3	max	581	23	318
8	5	1.72	D01 D03	901	879	809	677	570	480	542	2,5	12,6	max	752	39	412
9	10	0.88	D01 D03	1046	1021	953	736	630	533	688	0,7	21,7	4500	135	4	354
10	10	1.05	D01 D03	1095	1067	964	733	660	566	634	0,48	15,6	max	232	6	265
11	10	1.4	D01 D03	1157	1050	943	729	640	532	630	0.41	14,8	max	377	10	284
12	10	1.72	D01 D03	1175	1160	939	715	617	514	608	0,56	14,2	max	539	25	362

max – oznacza przekroczenie zakresu pomiarowego analizatora dla CO który wynosi 32500 ppm.

nego procesu mieszania można stwierdzić, że proces realizowany jest w dużym stopniu jako zgazowanie (niskie stężenie CO<sub>2</sub>, wysokie CO), natomiast w przypadku testów 2 i 3 proces w większej części przebiega jako spalanie, o czym świadczy niskie stężenie O<sub>2</sub> oraz wysokie stężenie CO<sub>2</sub>. Analizując natomiast wartości stężeń NO i NO<sub>2</sub> dla poszczególnych testów



zaobserwować można, że poprzez odpowiednie stopniowanie powietrza możliwa jest wyraźna redukcja NO z poziomu około 230 ppm (test 1) do około 150 ppm (test 3). Podsumowując można stwierdzić, że poprzez zmianę aerodynamiki przepływu pyłu węglowego oraz zmianę liczby miejsc podawania powietrza możliwe jest sterowanie charakterem procesu: zgazowanie lub spalanie pyłu węglowego.

Analizując wyniki testów 4 i 5 dla strumienia powietrza 5 m<sup>3</sup>/h zaobserwować można podobną tendencję jak dla przypadków opisanych powyżej. W przypadku zwiększenia liczby dysz napędowych zasilających komorę PC1 obserwuje się spadek temperatury w najniższej sekcji komory PC1 (T1) i jej nieznaczny wzrost w części centralnej (T2). W przypadku obu testów stężenie O<sub>2</sub> jest poniżej 1%, natomiast zwiększenie liczby dysz powoduje poprawę mieszania powietrza i pyłu węglowego oraz rozciągnięcie frontu spalania, co widoczne jest jako wzrost stężenia CO<sub>2</sub> o około 1,5% do 17,2%. Jednakże ze względu na dostarczanie do przedpaleniska podstechiometrycznego strumienia tlenu w obu przypadkach przekroczony został zakres pomiarowy analizatora CO, który świadczy o intensywnym procesie zgazowania węgla.

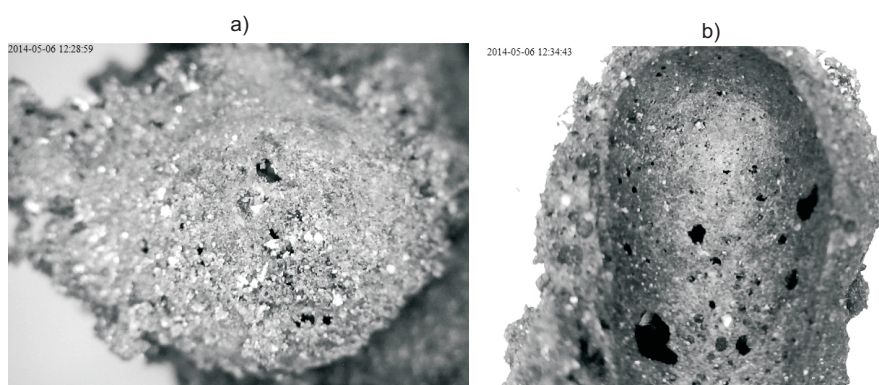
W ramach badań przeprowadzono testy polegające na zwiększaniu strumienia paliwa przy zachowaniu stałego strumienia powietrza do przedpaleniska cyklonowego. Testy te ze względu na minimalizację straty niecałkowitego spalania ograniczono do wprowadzania gazu jedynie poprzez dwie dysze napędowe.

W przypadku testów 5, 6, 7 i 8, realizowanych przy strumieniu powietrza 5 m<sup>3</sup>/h, dokonywano zmiany strumienia podawanego paliwa w zakresie od 1 do 1,72 g/s. W przypadku zwiększania strumienia paliwa podawanego do komory PC1 zaobserwowano wyraźną tendencję dotyczącą spadku temperatury na poszczególnych poziomach (T1, T2, T3). Dla wszystkich analizowanych przypadków zanotowano wysokie stężenie CO, przekraczające zakres pomiarowy analizatora gazów. Wzrost strumienia paliwa spowodował nieznaczny spadek stężenia CO<sub>2</sub> oraz wzrost stężenia O<sub>2</sub> w gazach opuszczających komorę PC2. Spowodowane jest to prawdopodobnie pogorszeniem mieszania pomiędzy strumieniem powietrza a wzrastającym strumieniem pyłu węglowego. Jedną z istotnych rzeczy na jaką należy zwrócić uwagę podsumowując wyniki tego testu, to że możliwe jest znaczące zwiększenie ilości podawanego paliwa przy zachowaniu jeszcze warunków pozwalających na prowadzenie procesu spalania i zgazowania węgla. Analizując wartości stężeń NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> na wylocie komory PC2 wyraźnie widać, że następuje ich gwałtowny wzrost, wynikający ze wzrostu strumienia podawanego paliwa, najprawdopodobniej wzrost emisji NOx związany jest z azotem paliwowym.

Badania wpływu strumienia paliwa w zakresie od 0,88 g/s do 1,72 g/s przeprowadzono także przy stałym strumieniu podawanego gazu do komory PC1 równym 10 m<sup>3</sup>/h. Analizując wyniki testów 9, 10, 11 i 12 stwierdzić można, że w tym przypadku wzrost strumienia podawanego paliwa przekłada się na wzrost temperatury w dolnej części komory PC1. Dla analizowanych przypadków stężenie O<sub>2</sub> w gazie opuszczającym komorę PC2 było poniżej 1%, natomiast wzrost strumienia paliwa powoduje wyraźny spadek CO<sub>2</sub>. Oprócz testu 9, w którym stężenie CO<sub>2</sub> wynosiło 21,7%, a stężenie CO 4500 ppm, w każdym kolejnym dla większego strumienia paliwa obserwowano przekroczenie zakresu pomiarowego CO analizatora gazów. Wyniki te wskazują więc na możliwość realizacji procesu zgazowania węgla. Podobnie jak w przypadku testów dla 5, 6, 7 i 8 tak i teraz obserwuje się wyraźny wzrost stężenia NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> na wylocie komory PC2 proporcjonalny do wzrostu strumienia podawanego paliwa.

Przedstawione powyżej wyniki wskazują, że możliwe jest prowadzenie procesu spalania i zgazowania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym. Jednym z parametrów istotnych w trakcie realizacji tego procesu jest minimalna ilość powietrza podawanego do komory PC1, wynikająca z aerodynamiki procesu wirowania pyłu węglowego. Poprzez zmianę strumienia doprowadzanego powietrza oraz liczby pracujących dysz napędowych możliwa jest kontrola procesu: możliwe jest uzyskanie warunków spalania lub zgazowania pyłu węglowego. Dzięki zastosowaniu podstechiometrycznej ilości tlenu możliwa jest w dużym stopniu kontrola temperatury procesu.

Prowadząc proces spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym, stosując odpowiedni strumień powietrza oraz paliwa możliwe jest osiągnięcie warunków, w których nastąpi topienie popiołu i odprowadzanie go w postaci ciekłej do wanny żuźlowej. Na rysunku 4 przedstawiono widok powierzchni oraz przełom bryły żuźlu odprowadzanego do wanny żuźlowej. Widoczne jest, że w wyniku wysokiej temperatury nastąpiło stopienie popiołu do postaci żuźła, powodując występowanie w jego wnętrzu pęcherzy gazowych. Przeprowadzona analiza elementarna żuźła wykazała następujący jego skład: C – 0,27%, H – 0,52%, N – 0,45%, S – 0,46%. Widać wyraźnie, że zawartość pierwiastka C w żuźlu jest znikoma, a przekładając tę wartość na stratę niecałkowitego spalania można stwierdzić, że jedynie około 0,1% węgla tracona jest z odprowadzaniem żuźlem. Wynik ten wskazuje na wysoką sprawność procesu spalania oraz zgazowania węgla, a także na możliwość zagospodarowania żuźła ze względu na zawartość pierwiastka C.



Rys. 4. Widok powierzchni oraz przełom bryły żuźlu odprowadzanego do wanny żuźlowej

Fig. 4. View of the surface and fracture of an example slag particle

## Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki wykazały, że w przedpalenisku cyklonowym możliwy jest przebieg procesu spalania/zgazowania pyłu węglowego o średnicy zastępczej 200  $\mu\text{m}$ . Możliwe jest realizowanie tego procesu w warunkach podstechiometrycznych, dzięki czemu możliwa jest realizacja procesu zgazowania węgla i kontroli temperatury w przed-

palenisku cyklonowym. Poprzez zmiany miejsc podawania powietrza do komory PC1 możliwa jest kontrola procesu spalania/zgazowania. W pracy ustalono także minimalną wartość strumienia gazu, która pozwala na prowadzenie stabilnego procesu zgazowania węgla przy minimalizacji straty niecałkowitego spalania.

Przeprowadzone badania pozwoliły na osiągnięcie temperatury pozwalającej na wyprowadzanie popiołu w postaci płynnej z przedpaleniska cyklonowego.

Ustalono, że poprzez stopniowanie powietrza do komory PC1 możliwa jest wyraźna redukcja emisji tlenków azotu.

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 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] MUSKAŁA i in. 2008 – MUSKAŁA, W., KRZYWAŃSKI, J., CZAKIERT, T., SEKRET, R. i NOWAK, W. 2008. Spalanie w atmosferach modyfikowanych O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>. *Energetyka* nr 10, s. 713–718.
- [2] NOWAK i PRONOBIS 2010 – NOWAK, W. i PRONOBIS, M. 2010. *Nowe technologie spalania i oczyszczania spalin*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [3] NOWAK i CZAKIERT 2012 – NOWAK, W. i CZAKIERT, T. 2012. *Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytywaniem CO<sub>2</sub>*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, Marcin KRATOFIL, Damian PAWŁOWSKI, Mariola ŚCISŁOWSKA,  
Rafał KOBYLECKI, Zbigniew BIS

## Combustion of coal in a furnace cyclone

### Abstract

This paper presents the results of a study of the combustion of pulverized coal in a cyclone furnace where the combustion of coal volatiles and char are run separately, due to the division of the furnace into separate sections.

The study of fuel combustion was carried out under various process conditions and various gas flow and gas distribution levels in the furnace. The examination found that it was possible to achieve both the combustion and gasification in the cyclone furnace. The mode of fuel oxidation (either combustion or gasification) depended mainly on the location of the air nozzles at the outer surface of the cyclone furnace.

As result of the experiments it was also determined that by the gradation of the air flow it was possible to control the temperature in the furnace and reduce the emission of NO<sub>x</sub>. Additionally, one of the key factors affecting fuel combustion and/or gasification in the cyclone furnace was the minimum amount of air that was necessary to maintain the eddy and swirl of fuel.

KEY WORDS: cyclone furnace, combustion, coal gasification