



Robert ZARZYCKI*, Michał WICHLIŃSKI*

Możliwości usuwania rtęci w palenisku cyklonowym

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono propozycję wykorzystania paleniska cyklonowego w procesie jego obróbki termicznej na potrzeby procesu uwalniania rtęci. Przedstawiono budowę oraz sposoby pracy paleniska cyklonowego. Omówiono metodykę procesu numerycznego modelowania spalania i zgazowania pyłu węglowego.

Uzyskane wyniki wykazały, że poprzez zmianę strumienia paliwa podawanego do paleniska cyklonowego możliwa jest kontrola temperatury oraz stopnia odgazowania paliwa. Dzięki temu istnieje możliwość nagrzewania paliwa do wymaganej temperatury ze względu na zakładany poziom usuwania rtęci z paliwa.

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły wyniki obliczeń numerycznych dotyczące nagrzewania paliwa i wykazały możliwość usunięcia 90% rtęci z paliwa. Uzyskane wyniki potwierdzono na laboratoryjnym stanowisku pieca obrotowego.

SŁOWA KLUCZOWE: palenisko cyklonowe, pył węglowy, modelowanie numeryczne, usuwanie rtęci, rtęć

Wprowadzenie

Ograniczenie emisji zanieczyszczeń do powietrza już od dawna jest koniecznością dla elektryczności. Do zanieczyszczeń, które do tej pory usuwano ze spalin, takich jak dwutlenek węgla,

* Dr inż. – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Katedra Inżynierii Energii, Częstochowa; e-mail: zarzycki@is.pcz.czyst.pl, michal.wichlinski@gmail.com

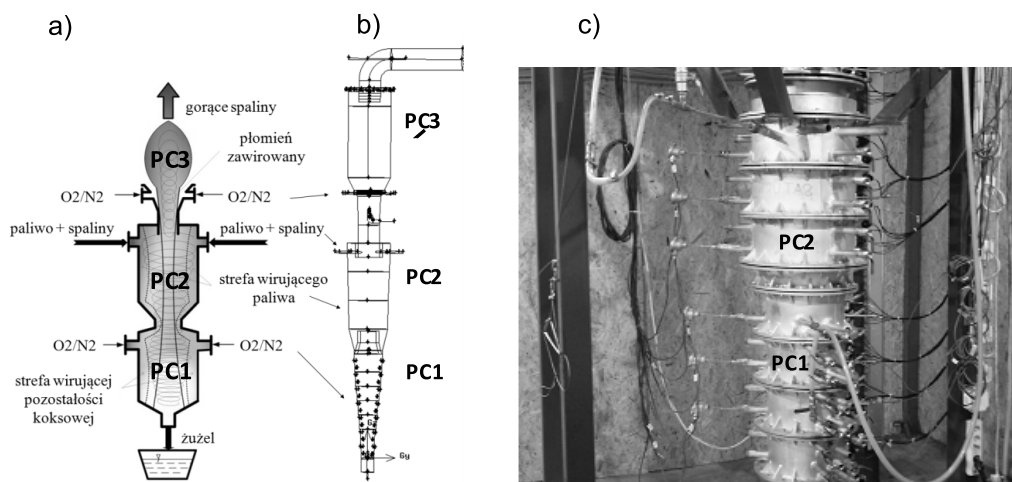
tlenki azotu, pył, wkrótce prawdopodobnie dołączy również rtęć. Rtęć jest pierwiastkiem znacznie trudniej usuwalnym ze spalin aniżeli wymienione wcześniej związki, gdyż jej zawartość w węglu, a co za tym idzie także w spalinach jest niewielka. Średnia zawartość rtęci w polskich węglach energetycznych wynosi około 80 ng/g (Wichliński i in. 2013; Lorenz i Grudziński 2007; Olkusiński 2007). Taka niewielka zawartość rtęci w węglu w połączeniu z ogromną ilością spalane- go węgla skutkuje emisją rtęci na poziomie około 50 kg rtęci na rok z jednej tylko elektrowni (Głodek i Pacyna 2009). Oprócz energetyki emisję rtęci do atmosfery powoduje również spala- nie węgla w innych dziedzinach przemysłu, np. takich jak: produkcja cementu czy metali nieże- laznych. Łączna emisja rtęci ze źródeł antropogenicznych wynosi w Polsce około 10 Mg/rok (Głodek i in. 2010).

Ograniczenie emisji rtęci można osiągnąć poprzez oczyszczanie spalin lub poprzez usunięcie rtęci z węgla przed procesem spalania. Usuwanie par rtęci ze spalin (grupa metod *postcombustion*) jest kłopotliwe, gdyż ilość zużywanych w tych procesach sorbentów jest bardzo duża, zawartość rtęci w strumieniu spalin bardzo mała, ponadto powstający popiół lotny będzie zanie- czyszczony węglem aktywnym, najczęściej wykorzystywanym do wychwytywania par rtęci, ra- zem z zaadsorbowaną na nim rtęcią, a także nieprzereagowanym sorbentem. Obiecującą możli- wością jest usuwanie rtęci z paliwa przed procesem spalania (grupa metod *precombustion*), które umożliwi oczyszczenie węgla, a następnie jego wykorzystanie w różnych innych dziedzinach przemysłu. Jedną z takich metod jest metoda niskotemperaturowej obróbki termicznej, której skuteczność może wynosić nawet ponad 90% w temperaturze około 400°C; potwierdzono to w licznych publikacjach (Iwashita i in. 2004; Wichliński i in. 2011; Dziok i in. 2014; Wichliński i in. 2014). Inna koncepcja usuwania rtęci z paliwa została zaproponowana w artykule (Zarzycki i Wichliński 2014). Jako nośnik ciepła została tam wykorzystana para przegrzana. Koncepcja ta odnosiła się do kotłów fluidalnych i pozwalała na ograniczenie strat spowodowanych obróbką niskotemperaturową.

1. Palenisko cyklonowe

Paleniska cyklonowe to urządzenia energetyczne, gdzie w silnie zawirowanym strumieniu gazów można spalać paliwa stałe ciekłe lub gazowe. Opracowana w Katedrze Inżynierii Energii konstrukcja pionowego paleniska cyklonowego (Bis i in. 2015; Zarzycki i in. 2016a; Kobyłecki i in. 2016) oprócz podstawowej funkcji spalania pyłu węglowego pozwala na prowadzenie proces- u jego zgazowania w atmosferze powietrza, tlenu, dwutlenku węgla lub pary wodnej (Zarzycki i in. 2015; Zarzycki i Bis 2016a, 2016b, 2016c). Realizacja procesu zgazowania paliwa po- zwala na kontrolę temperatury wewnątrz paleniska cyklonowego oraz wykorzystanie paleniska w procesie obróbki paliwa na potrzeby usuwania rtęci z pyłu węglowego. Palenisko cyklonowe (rys. 1) składa się z dwóch komór. Do komory górnej PC2 podawane jest rozdrobnione paliwo w postaci pyłu węglowego za pomocą stycznie zabudowanych dysz. W komorze tej następu-

je proces nagrzewania, suszenia oraz odgazowania paliwa. Poniżej znajduje się komora PC1, w której realizowany jest dalszy proces odgazowania paliwa, jego spalanie lub zgazowanie. Aby ułatwić przepływ paliwa z komory PC2 do komory PC1 pomiędzy nimi zabudowany został odpowiednio ukształtowany element w postaci nurnika rozdzielający przepływ pyłu węglowego z komory PC2 do komory PC1 od przepływu gazów z komory PC1 do komory PC2. Komora PC1 zbudowana jest z kilku walców o zmniejszających się średnicach dzięki czemu zostały uzyskane tzw. progi w miejscach zmiany średnicy komory PC1. Stycznie do tworzącej walca komory PC1 zabudowano zestaw dysz pozwalających na wprowadzanie z dużą prędkością gazu „napędowego”. Zadaniem wprowadzanego stycznie gazu napędowego jest w pierwszej kolejności uzyskanie silnego zawirowania znajdującego się tam pyłu węglowego, oraz zapewnienie odpowiedniego jego składu (powietrze, tlen, dwutlenek węgla, para wodna) ze względu na realizację procesu spalania lub zgazowania pyłu węglowego. Dzięki zmniejszającym się wraz z przepływem pionowym pyłu węglowego średnicom komory PC1 następuje wzrost siły odśrodkowej pozwalającej na utrzymanie w silnym zawirowaniu znacznej masy pyłu węglowego. Dzięki występowaniu dodatkowo progów w komorze PC1 istnieje możliwość zwiększenia wirującej masy pyłu węglowego oraz znaczące wydłużenie czasu jego pobytu w komorze PC1.



Rys. 1. Schemat a), geometria b), widok paleniska cyklonowego c)

Fig. 1. Scheme a), geometry b), view of cyclone furnace c)

Opisana powyższej koncepcja pracy paleniska cyklonowego pozwala także na realizację kontrolowanego procesu nagrzewania i odgazowania wirującego wewnątrz paliwa. Niezbędne ciepło do procesu nagrzewania i odgazowania uzyskiwane jest ze spalania pewnej części gazów powstałych podczas odgazowania paliwa.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki obliczeń numerycznych procesu spalania i zgazowania oraz częściowego odgazowania pyłu węglowego pozwalają ustalić warunki panujące w palenisku cyklonowym wraz ze wzrostem strumienia podawanego pyłu węglowego. Geome-

tria oraz siatka obliczeniowa paleniska cyklonowego zostały opracowane w programie Gambit (rys. 1b). Obliczenia przepływu pyłu węglowego oraz procesu zgazowania przeprowadzone zostały w programie ANSYS FLUENT 14. Opracowany model numeryczny procesu pozwala na realizację obliczeń zgazowania pyłu w atmosferze powietrza, O₂, CO₂ oraz pary wodnej.

W dolnej części paleniska cyklonowego – komorze PC1 (rys. 1b) rozmieszczono dysze pozwalające na wprowadzanie czynnika „napędowego” wraz z utleniaczem (powietrze), w górnej części komory PC2 zabudowano wloty dla pyłu węglowego, którymi pneumatycznie podawany jest on do paleniska cyklonowego za pomocą recyrkulowanych spalin.

Obliczenia przepływu gazu i paliwa zrealizowano przy wykorzystaniu modelu turbulencji Reynolds Stress. 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 i Cau 2009; Chen i in. 2010; Warzecha i Bogusławski 2012; ANSYS 2011). W obliczeniach zastosowano model promieniowania Discrete Ordinate (DO). Szczegóły dotyczące realizacji procesu spalania i zgazowania można znaleźć w pracach (Zarzycki i in. 2015; Zarzycki, Bis 2016a, 2016b, 2016c; Zarzycki i in. 2013).

Obliczenia procesu nagrzewania, odgazowania, zgazowania i spalania pyłu węglowego o średnicy zastępczej 500 μm przeprowadzono dla paliwa o parametrach fizykochemicznych zestawionych w tabeli 1, dla uproszczenia przyjęto, że paliwo nie zawiera siarki. Stałe szybkości reakcji zaczerpnięto z pracy (Toporov i in. 2008; Vascellari i Cau 2009).

TABELA 1. Wyniki analizy technicznej i elementarnej paliwa użytego w symulacji (stan suchy)

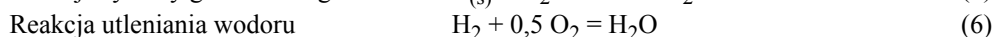
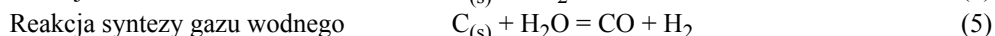
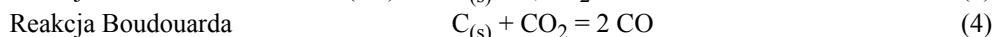
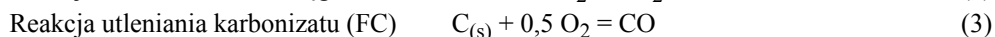
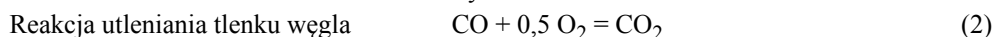
Table 1. The results of the technical analysis and elemental fuel used in the simulation (dry state)

Analiza techniczna	[-]	Analiza elementarna	[-]
VM (części lotne)	0,45	C	0,85
FC (karbonizat)	0,45	H	0,1
A (popiół)	0,05	O	0,04
M (wilgoć)	0,05	N	0,01
Hg [ng/g]		110	

Proces obliczeń spalania i zgazowania pyłu węglowego został opisany sześcioma następującymi reakcjami:



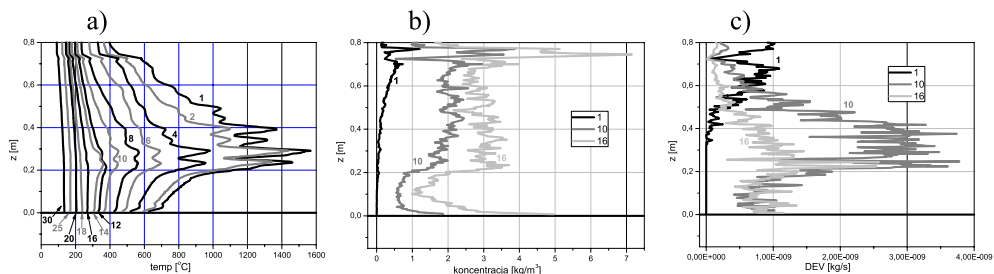
x_1, x_2, y_1, y_2, y_3 – współczynniki stechiometryczne



Warunki realizacji procesu spalania i zgazowania oraz odgazowania pyłu węglowego, będącego przedmiotem modelowania numerycznego były następujące: strumień masy pyłu węglowego o średnim rozmiarze 500 μm w ilości od 1 do 30 g/s wprowadzano stycznie dwoma wlotami rozmieszczonymi po przeciwległych stronach w górnej części komory PC2 (rys. 1b). Paliwo, przemieszczając się po linii śrubowej w dół w komorze PC2, ulega nagrzewaniu, suszeniu i odgazowaniu na skutek oddziaływania przepływających w osi paleniska gorących spalin oraz kontaktu z gorącymi ścianami komory PC2. Po odgazowaniu paliwa następuje proces częściowego spalania karbonizatu (FC) w komorze PC1 (Zarzycki i in. 2013, 2014; Kobyłecki i in. 2014). Przez zestaw dysz napędowych do komory PC1 doprowadzany był stycznie do tworzącej gaz napędowy (powietrze) z prędkością 3 m/s o temperaturze 327°C. Wprowadzanie gazu, tzw. napędowego, wypływającego z dysz stycznie rozmieszczonych w komorze PC1, jest konieczne do utrzymania odpowiednich warunków ruchu wirowego pyłu węglowego.

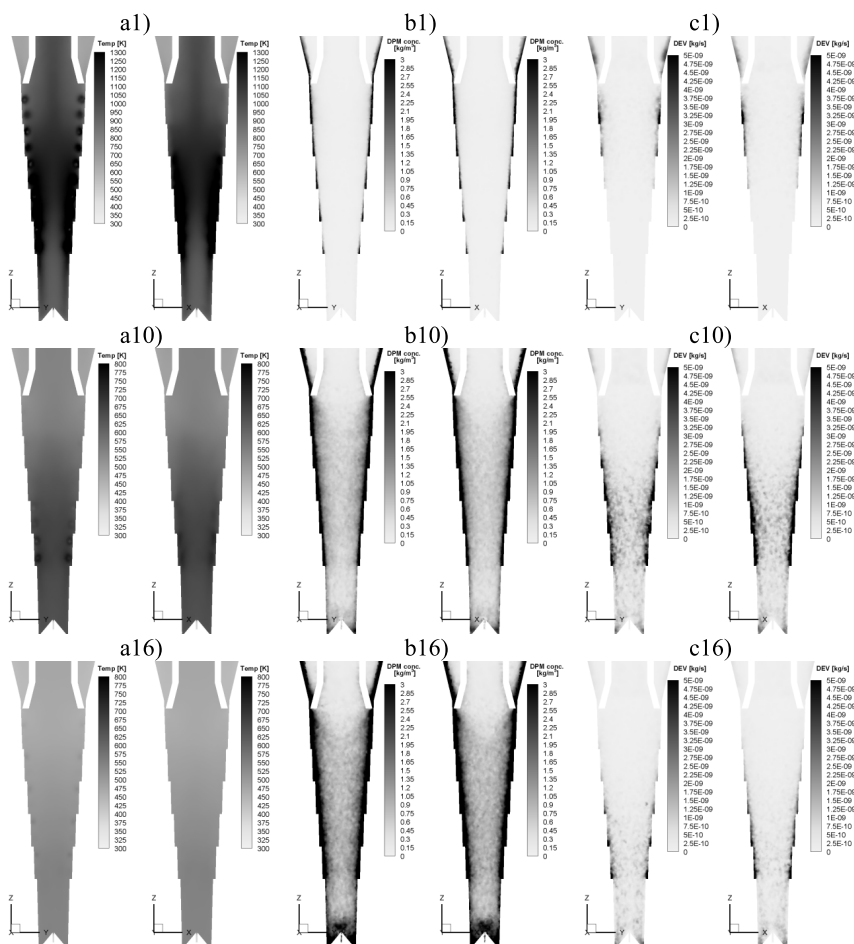
W modelu numerycznym uwzględniony został również przepływ ciepła przez ściany paleniska do otoczenia. Przy obliczaniu strat ciepła uwzględniono rzeczywiste grubości poszczególnych elementów paleniska laboratoryjnego (rys. 1c) (Zarzycki i in. 2013, 2014; Kobyłecki i in. 2014) wraz z współczynnikami wnikania i przewodzenia ciepła dla zastosowanych materiałów. Założono, że temperatura powietrza otaczającego palenisko wynosi 27°C.

Na rysunku 2 zestawiono profile temperatury, koncentracji paliwa oraz szybkości odgazowania w sąsiedztwie ścianki wzdłuż wysokości komory PC1 dla wybranych strumieni zasilanego paliwa w zakresie od 1 do 30 g/s. Komora PC1 zasilana jest gazem napędowym w zakresie współrzędnej z od 0,2 do 0,8 m, poniżej wartości z równej 0,2 nie wprowadzany jest gaz napędowy, co umożliwia swobodny przepływ paliwa do wanny znajdującej się w dolnej części komory PC1. Analizując zestawione na rysunku 2a profile temperatury obserwuje się dla niskich obciążeń masowych paliwem (1 i 2 g/s) paleniska wysokie wartości temperatury w sąsiedztwie ścianki w zakresie od z 0,2 do 0,4 przekraczające poziom 1200°C, co świadczy o zachodzącym tam spalaniu pyłu węglowego. Potwierdzeniem tego jest profil koncentracji paliwa (rys. 2b – linia 1 g/s, rys. 3 b1) przedstawiający spadek koncentracji w dolnej części komory PC1 oraz profil szybkości odgazowania (rys. 2c – linia 1 g/s, rys. 3 c1) informujący, że całkowite odgazowanie paliwa realizowane jest w górnej części komory PC1. Zwiększając strumień podawanego do paleniska cyklonowego paliwa, obserwuje się spadek temperatury związany z podstechiometrycznymi warunkami oraz koniecznością dostarczenia ciepła do nagrzania strumienia przepływającego paliwa. Widoczne jest to wyraźnie na rysunku 2a, gdzie dla strumieni paliwa równego 10 g/s możliwe jest nagrzanie paliwa do temperatury około 400°C, natomiast dla strumienia paliwa 16 g/s temperatura paliwa spada do około 300°C. Dalszy wzrost strumienia podawanego do paleniska powoduje spadek temperatury paliwa (rys. 2a). Można zauważyć, że zmiana strumienia podawanego paliwa do paleniska cyklonowego przy założonym stałym strumieniu gazu napędowego (powietrza) pozwala na realizację procesu jego spalania, jak również kontrolowanego nagrzewania do założonego poziomu temperatury (rys. 2a). Zwiększenie strumienia paliwa podawanego do paleniska cyklonowego skutkuje wzrostem jego koncentracji w sąsiedztwie ścianek (rys. 2b, rys. 3 b10 i b16). W takim przypadku strumień gazu napędowego nie pozwala na zupełne i całkowite utlenienie paliwa oraz nie jest w stanie utrzymać zawiesze-



Rys. 2. Profile temperatury a), koncentracji b), szybkości odgazowania c) w sąsiedztwie ścianki wzdłuż wysokości komory PC1

Fig. 2. The temperature profiles a), the concentration b), devolatilization rate c) close to the wall along the height of the PC1



Rys. 3. Rozkłady temperatury a), koncentracji b), szybkości odgazowania c) w przekroju poprzecznym komory PC1

Fig. 3. Temperature distribution a) the concentration b), devolatilization rate c) in the vertical cross-section of the furnace

nia) zwiększonej masy paliwa. W tym przypadku obserwuje się przepływ paliwa w sąsiedztwie ścianek do wanny zlokalizowanej w dolnej części paleniska (rys. 2b, rys. 3 b10 i b16). Wzrost strumienia paliwa podawanego do paleniska cyklonowego wpływa także na przebieg szybkości odgazowania paliwa wzdłuż wysokości komory PC1 (rys. 2c, rys. 3 c10 i c16).

Temperatura oraz szybkość odgazowania są ze sobą bezpośrednio powiązane, ponieważ wzrost temperatury powoduje wzrost szybkości odgazowania, a tym samym pozwala na wygenerowanie odpowiedniej ilości części lotnych niezbędnych do utrzymania wewnątrz komory PC1 stałej temperatury. W analizowanym przypadku wzrost ilości części lotnych, wynikający ze zwiększonej szybkości odgazowania oraz większego strumienia części lotnych, nie przekłada się na wzrost temperatury ze względu na zachowanie stałego strumienia gazu napędowego (utleniacza). Natomiast wzrost strumienia paliwa wymaga zwiększonego strumienia ciepła na potrzeby podgrzania zwiększonej masy paliwa.

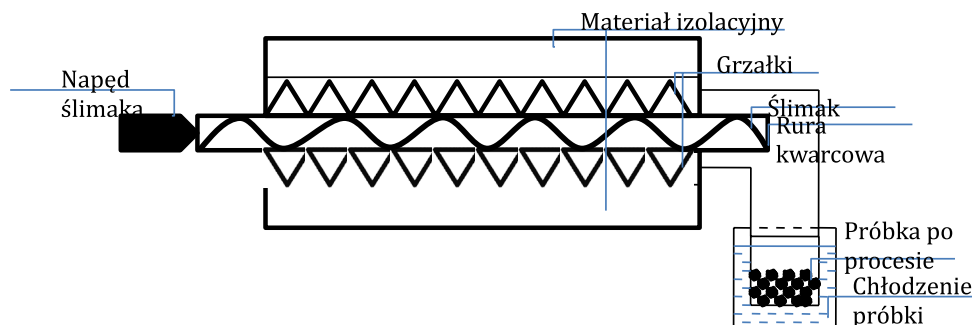
Podsumowując przedstawione wyniki obliczeń numerycznych można stwierdzić, że przy zachowaniu stałego strumienia gazu napędowego (utleniacza) oraz zmiennym strumieniu paliwa można uzyskać warunki pozwalające na kontrolowany proces nagrzewania i odgazowania paliwa przepływającego do wanny zlokalizowanej w dolnej części komory PC1.

Dla potwierdzenia możliwości zastosowania paleniska cyklonowego w procesie uwalniania rtęci przeprowadzono badania eksperymentalne przepływu paliwa w celu jego kontrolowanego nagrzewania i odgazowania. W tym celu użyto paliwa w postaci pyłu węglowego o składzie zbliżonym do przedstawionego w tabeli 1 i zawartości rtęci 100 ng/g.

Przeprowadzone próby podawania strumienia paliwa do paleniska cyklonowego w ilości 10 i 16 g/s wykazały, że paliwo po przejściu przez palenisko cyklonowe nagrzane zostało odpowiednio do 395°C i 293°C, co pozwoliło na usunięcie odpowiednio 90% i 30% rtęci zawartej w paliwie. Czas pobytu ziaren paliwa w strefie jego nagrzewania i odgazowania dla założonych warunków procesowych oszacowano od 28 do 32 sekund. Wyniki te potwierdzają słuszność postawionej tezy o możliwości wykorzystania paleniska cyklonowego w procesie obróbki paliwa w celu uwolnienia z niego rtęci.

2. Badania laboratoryjne procesu uwalniania rtęci

Badania laboratoryjne procesu uwalniania rtęci z paleniska cyklonowego przeprowadzono na stanowisku poziomego pieca obrotowego (rys. 4), który symulował proces nagrzewania paliwa w palenisku cyklonowym. Piec składał się z rury kwarcowej, grzanej na całej długości oraz ślimaka zamontowanego wewnątrz tej rury. Obroty ślimaka powodowały przesuwanie się materiału wzdłuż rury kwarcowej, symulując zachowanie się materiału w palenisku cyklonowym. Czas pobytu materiału w stanowisku pieca poziomego był regulowany poprzez zmianę obrotów napędu ślimaka. Do stanowiska było podawane powietrze, które było gazem nośnym dla par rtęci. Badania stopnia uwalniania rtęci prowadzono dla czasu pobytu wynoszącego około 30 sekund.



Rys. 4. Schemat pieca obrotowego

Fig. 4. Scheme of rotary furnace

Wyniki uzyskane na stanowisku pieca obrotowego były zbliżone do uzyskanych w palenisku cyklonowym. Badania na stanowisku pieca obrotowego przeprowadzono dla pięciu temperatur: 200, 250, 300, 350 i 400°C i czasu pobytu wynoszącego około 30 sekund. W badaniach wykorzystano dwa polskie węgle kamienne, pozyskane z górnośląskich kopalń, były to miały wzbogacone, przeznaczone do sprzedaży dla elektrowni. Analiza techniczna i elementarna węgla została zamieszczona w tabeli 2.

TABELA 2. Analiza techniczna i elementarna węgla A i B

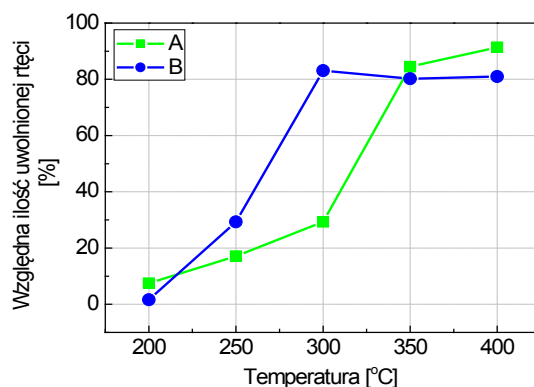
TABLE 2. Technical and elemental analysis of coals A and B

Nazwa	Wilgoć przemijająca	Wilgoć higroskopijna	Popiół	Części lotne	Fixed carbon (pozostałość koksowa)	Ciepło spalania	C	H	N	Średnia zawartość rtęci
	Wp	Wh	A ^a	VM ^a	FC ^a	HHV ^d	C ^d	H ^d	N ^d	Hg ^d
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[%]	[%]	[%]	[ng/g]
Węgiel A	10,8	9,9	15,2	40,3	31,2	25 100	66,8	5,1	1,1	101
Węgiel B	7,2	7,3	17,2	42,6	29,9	24 600	60,8	5,1	0,9	120

a – stan analityczny,

d – stan suchy.

W temperaturze 200°C ilość uwolnionej rtęci niezależnie od węgla była niska i wynosiła poniżej 10%, przy wyższej temperaturze 250°C ilość rtęci uwolnionej z węgla B wynosiła około 30% i była wyższa niż w przypadku węgla A o około 12%. W temperaturze 300°C nastąpiła wyraźna rozbieżność między badanymi próbkami węgla. Dla węgla B ilość uwolnionej rtęci wynosiła ponad 80%, a dla węgla A tylko około 30%. Dla 350°C ilość uwolnionej rtęci z obu węgli była praktycznie taka sama i wynosiła około 80%. W najwyższej badanej temperaturze 400°C ilość rtęci uwolnionej z węgla B nie zmieniła się i pozostała na poziomie około 80%, natomiast dla węgla A wzrosła do około 90% (rys. 5).



Rys. 5. Ilość uwolnionej rtęci z węgla A i B w poszczególnych temperaturach

Fig. 5. The amount of released mercury from coals A and B in selected temperatures

Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki wskazują, że palenisko cyklonowe, oprócz swojej podstawowej funkcji spalania lub zgazowania paliwa, może zostać wykorzystane w procesie kontrolowanej obróbki termicznej paliwa. Poprzez zwiększanie strumienia paliwa podawanego do paleniska cyklonowego istnieje możliwość kontroli temperatury wewnątrz paleniska, kontroli temperatury nagrzewanego paliwa oraz stopnia jego odgazowania. Dzięki takim warunkom możliwa jest obróbka termiczna paliwa pozwalająca na uwalnianie z niego rtęci w założonym stopniu, a tym samym obniżaniu emisji rtęci ze spalania paliwa. Uwolniony strumień rtęci oraz strumień części lotnych po odpowiednim przygotowaniu (oczyszczeniu z pyłów i ochłodzeniu) skierowany powinien być do absorbera zawierającego złożę sorbentu pozwalającego na związanie rtęci. Części lotne pozbawione rtęci skierowane zostaną do strumienia pyłu węglowego poddanego uprzednio obróbce termicznej. W ten sposób odgazowane w trakcie obróbki termicznej paliwo nie utraci części lotnych niezbędnych do właściwego jego spalania. Należy się spodziewać, że tak przygotowane paliwo (podgrzane) w obecności strumienia części lotnych będzie spalać się stabilnie w palniku kotła pyłowego.

Artykuł powstał w ramach programu badań statutowych Politechniki Częstochowskiej BS/PB-404-301/11.

Literatura

- ANSYS 2011 – ANSYS Fluent Theory Guide, 2011.
- BIS i in. 2015 – BIS, Z., KOBYLECKI, R. i ZARZYCKI, R. 2015. *Urządzenie do spalania i zgazowania paliw stałych*. Zgłoszenie wynalazku P.411668.
- CHEN i in. 2010 – CHEN, L., GAZZINO, M. i 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.
- DZIOK i in. 2014 – DZIOK, T., STRUGAŁA, A., ROZWADOWSKI, A. i OKOŃSKA, A. 2014. Effect of selected parameters of thermal pretreatment of bituminous coal on the mercury removal efficiency. *Przemysł Chemiczny* 93, 12.
- GŁODEK i in. 2010 – GŁODEK, A., PANASIUK, D. i PACYNA, J.M. 2010. Mercury Emission from Anthropogenic Sources in Poland and Their Scenarios to the Year 2020. *Water Air Soil Pollut* 213, s. 227–236.
- GŁODEK, A. i PACYNA, J.M. 2009. Mercury emission from coal-fired power plants in Poland. *Atmospheric Environment* 43.
- IWASHITA i in. 2004 – IWASHITA, A., TANAMACHI, S., NAKAJIMA, T., TAKANASHI, H. i OHKI, A. 2004. Removal of mercury from coal by mild pyrolysis and leaching behavior of mercury. *Fuel* 83.
- KOBYLECKI i in. 2014 – KOBYLECKI, R., ZARZYCKI, R., KRATOFIL, M., PAWŁOWSKI, D. i BIS, Z. 2014. Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym. *Aktualne Zagadnienia Energetyki* tom I, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- KOBYLECKI i in. 2016 – KOBYLECKI, R., ZARZYCKI, R. i BIS, Z. 2016. Przedpalenisko cyklonowe dla spalania i zgazowania pyłu węglowego. Wydawnictwo ITC, *Energetyka Gazowa* tom 2, s. 277–285.
- LORENZ, U. i GRUDZIŃSKI, Z. 2007. Zawartość rtęci jako potencjalny czynnik ograniczający wartość użytkową węgla kamiennego i brunatnego. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Kwartalnik AGH, Rok 31, zeszyt 3/1, s. 335–349.
- OLKUSKI, T. 2007. Porównanie zawartości rtęci w węglach polskich i amerykańskich. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 10, z. spec. 2, Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, s. 603–612.
- TOPOROV i in. 2008 – TOPOROV, D., BOCIAN, P., HEIL, P., KELLERMANN, A., STADLER, H., TSCHUNKO, S., FÖRSTER, M. i KNEER, R. 2008. Detailed investigation of a pulverized fuel swirl flame in CO₂/O₂ atmosphere. *Combustion and Flame* Vol. 155, s. 605–618.
- VASCELLARI, M. i 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 (2009).
- WARZECHA, P. i BOGUSŁAWSKI, A. 2012. Symulacje numeryczne spalania pyłu węglowego w atmosferze O₂-CO₂. *Archiwum Spalania* Vol. 12, nr 3, s. 145–151.
- WICHLIŃSKI i in. 2013 – WICHLIŃSKI, M., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2013. The investigation of mercury contents in polish coal samples. *Archives of Environmental Protection* vol. 39, no. 2, s. 141–150.
- WICHLIŃSKI i in. 2011 – WICHLIŃSKI, M., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2011. Emisja rtęci podczas termicznej obróbki paliw. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z. 2.
- WICHLIŃSKI i in. 2014 – WICHLIŃSKI, M., KOBYLECKI, R. i Bis, Z. 2014. The release of mercury from polish coals during thermal treatment of fuels in a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology* 119.
- ZARZYCKI i in. 2013 – ZARZYCKI, R., KRATOFIL, M., PAWŁOWSKI, D., ŚCISŁOWSKA, M., KOBYLECKI, R. i Bis Z. 2013. Analiza wyników obliczeń numerycznych przepływu pyłu węglowego oraz gazu w palenisku cyklonowym. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 301–312.

- ZARZYCKI i in. 2014 – ZARZYCKI, R., KOBYLECKI, R., KRATOFIL, M., ŚCISŁOWSKA, M., PAWŁOWSKI, D. i BIS, Z. 2014. Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 17, z. 3. Kraków: Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 381–392.
- ZARZYCKI i in. 2015 – ZARZYCKI, R., WARZECHA, P., KOBYLECKI, R. i BIS, Z. 2015. Modelowanie matematyczne i symulacje numeryczne tlenowego spalania węgla oraz zgazowania w przedpalenisku cyklonowym. Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂, *seria Monografie* nr 301, Częstochowa, s. 310–334.
- ZARZYCKI i in. 2016a – ZARZYCKI, R., BIS, Z. i KOBYLECKI, R. 2016a. The concept of coal burning in a cyclone furnace. IX ICCHME, 23–26 May 2016, Cracow, Poland, No. 492.
- ZARZYCKI, R. i BIS, Z. 2016a. Modelling of the process of coal dust combustion in a cyclone furnace. IX ICCHME, 23–26 May 2016, Cracow, Poland, No. 493.
- ZARZYCKI, R. i BIS, Z. 2016b. Modelling of coal dust gasification in a cyclone furnace under oxy-fuel combustion conditions. IX ICCHME, 23–26 May 2016, Cracow, Poland, No. 494.
- ZARZYCKI, R. i BIS, Z. 2016c. Modelowanie procesu spalania i zgazowania pyłu węglowego w palenisku cyklonowym. Wydawnictwo ITC, *Energetyka Gazowa* tom 2, s. 361–376.
- ZARZYCKI, R. i WICHLIŃSKI, M. 2014. Koncepcja procesu ograniczania emisji rtęci ze spalania węgla w kotłach fluidalnych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 17, z. 4, s. 303–316.

Robert ZARZYCKI, Michał WICHLIŃSKI

Possibilities of removing mercury in the cyclone furnace

Abstract

The paper presents the proposal to use the cyclone furnace in the process of heat treatment for the process of the release of mercury. We present the structure and working methods cyclone furnace. Discusses the methodology of the process of numerical modeling of combustion and gasification of coal dust.

The results showed that, by changing a fuel stream fed to the cyclone furnace is possible to control the temperature and the degree of degassing of the fuel. This permits heating of the fuel to the desired temperature due to the expected level of mercury removal from the fuel.

The conducted experimental studies confirmed the results of numerical calculations on heating fuel and showed the possibility of 90% removal of mercury from the fuel. The results confirmed the laboratory workplace rotary kiln.

KEYWORDS: cyclone furnace, coal dust, numerical modeling, removal of mercury, mercury

