

**Norbert MODLIŃSKI**

Politechnika Wroclawska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
e-mail: norbert.modlinski@pwr.wroc.pl

## **Modelowanie współspalania pyłu węglowego z gazem w kotle energetycznym**

Praca przedstawia modelowanie 3-D procesu współspalania pyłu węglowego z gazem z odmetanowania kopalni w kotle energetycznym. Celem pracy było określenie takiego rozmieszczenia palników gazowych, aby zapewnić optymalną współpracę palników pyłowych i gazowych oraz rozciągnięcie obciążenia pasa palnikowego. Zakres badań modelowych objął analizę numeryczną procesu przepływu ze spalaniem za palnikiem gazowym dużej mocy i wymiany ciepła w kotle. Dla różnych konfiguracji ustawienia palników gazowych określono aerodynamikę spalania oraz stopień zagrożenia korozją.

W pracy położono nacisk na opis kinetyki chemicznej fazy gazowej w przepływie turbulentnym ze spalaniem. Do opisu wzajemnego wpływu turbulencji i reagowania fazy gazowej wykorzystano model EDC. Przeanalizowano stopień dokładności dwu mechanizmów globalnych poprzez porównanie ich z mechanizmem szczegółowym. Produkty i szybkości odgazowania węgla wyznaczono za pomocą procedury FG-DVC.

**Słowa kluczowe:** spalanie, kocioł pyłowy, modelowanie numeryczne

### **Wstęp**

Rosnące ceny paliw coraz częściej skłaniają do spalania paliw będących produktem ubocznym różnych procesów. Za przykład może posłużyć gaz z odmetanowania kopalni, będący mieszaniną metanu z powietrzem. Kopalnie zmuszone są do ciągłej wentylacji szybów w celu usunięcia metanu. W efekcie ogromne ilości tego gazu są emitowane do atmosfery. Należy tutaj wspomnieć, że metan jest drugim po CO<sub>2</sub> najsilniejszym gazem cieplarnianym. Utylizacja tego paliwa przynosi zatem zarówno korzyści ekonomiczne, jak i ekologiczne. Najtańszym i najprostszym sposobem wydaje się być współspalanie z pyłem węglowym w zmodernizowanym, istniejącym już kotle. Modernizacja polega na zaadaptowaniu palników gazowych w taki sposób, aby nie naruszyć poprawnej pracy kotła. Poniższa praca przedstawia wyniki modelowania 3-D takiego rozwiązania.

Celem pracy jest określenie takiego rozmieszczenia palników gazowych, aby zapewnić najbardziej optymalną współpracę palników pyłowych i gazowych. Zakres pracy obejmuje symulacje numeryczne przepływu ze współspalaniem pyłu węglowego z gazem kopalnianym w zmodernizowanym kotle zasilanym narożnikowo dla dwóch możliwych wariantów ustawienia palników gazowych zaproponowanych przez projektanta.

Nowe sposoby zasilania komór paleniskowych (technologia spalania ograniczająca emisję  $\text{NO}_x$ ) spowodowały dezaktualizację dotychczasowych metod obliczania komór paleniskowych. Tę lukę wypełniają częściowo metody trójwymiarowe, dostarczając projektantowi dodatkowych, wcześniej nieosiągalnych informacji.

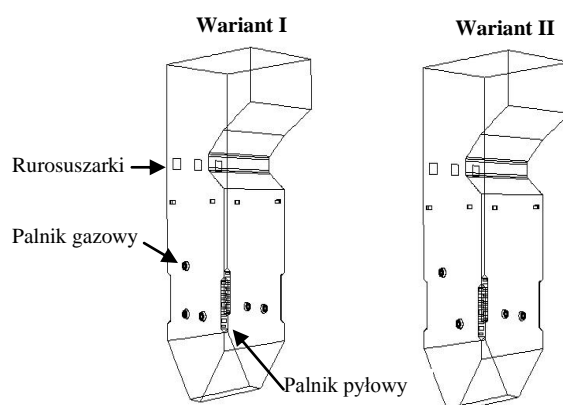
Nieco inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku pozostałych powierzchni ogrzewalnych kotła. Obecnie najbardziej wiarygodnymi metodami obliczeń powierzchni grodziowych i pęczków konwekcyjnych są nadal metody zerowymiarowe oparte na doświadczalnych, rozwijanych od lat, formułach na globalne współczynniki przenikania ciepła. Rezultaty obliczeń trójwymiarowych skomplikowanych pęczków zależą silnie od znajomości lokalnych współczynników wymiany i lokalnego stopnia zabrudzenia (zaszlakowania) - wielkości nieznanymi na etapie projektowania.

Z tych powodów symulacje 3-D kotła ogranicza się najczęściej do obszaru komory paleniskowej. Obliczenia te dostarczają wartości ciepła przejętego w komorze (mocy cieplnej parownika), którą wykorzystuje się w zerowymiarowym, kompleksowym algorytmie obliczeń całego kotła.

## 1. Zakres obliczeń i parametry pracy kotła

Przedmiotem badań jest kocioł tangencjalny opalany pyłem węglowym kamiennym. Wysokość kotła wynosi 21 m, zaś szerokość i głębokość 6,2 m. Jest to kocioł dwuciągowy, walczkowy o naturalnej cyrkulacji i wydajności 140 t/h pary o temperaturze  $500^\circ\text{C}$ . Kocioł wyposażony jest w 16 palników pyłowych zainstalowanych w czterech rzędach oraz dodatkowe palniki gazowe (rys. 1). W kotle współspalano gaz z odmetanowania kopalni, którego udział w ciepłe doprowadzonym do paleniska wynosił do 40%.

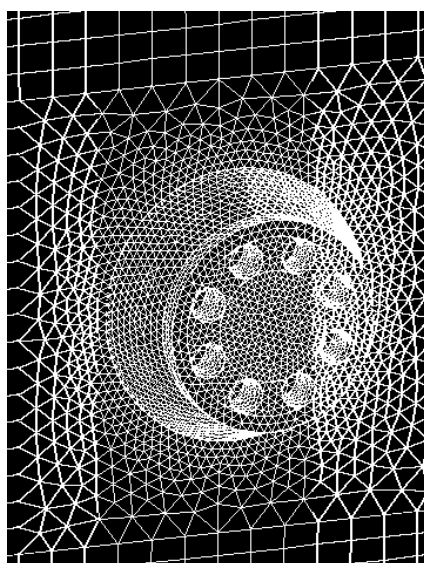
Wersje I i II (rys. 1) rozmieszczenia palników gazowych mają na celu ustalenie wariantu dla najbardziej optymalnej współpracy palników pyłowych i gazowych oraz rozciągnięcie obciążenia pasa palnikowego.



Rys. 1. Geometria obszaru obliczeń kotła OP140 wraz z dwoma wariantami rozmieszczenia palników gazowych

Obszar obliczeń uwzględnia rejon leja żuźlowego, pas palnikowy oraz obszar przegrzewaczy grodziowych. Geometria przegrzewaczy grodziowych została uwzględniona w celu lepszego ukształtowania wypływu. Grodzie zamodelowano jako powierzchnie o zerowej grubości. W obliczeniach przedstawiono wyniki badań dla pracy trzech dolnych rzędów palników pyłowych przy nominalnym obciążeniu kotła.

Trójwymiarowa siatka numeryczna została wygenerowana w aplikacji Gambit, preprocesor kodu Fluent [1]. Całkowita liczba objętości kontrolnych wynosi około 150 000. W całej objętości obszaru obliczeniowego wygenerowano siatkę strukturalną z wyjątkiem obszaru palników gazowych ze względu na konieczność odwzorowania szczegółów konstrukcyjnych (rys. 2). Parametry pracy opisanego kotła dla obciążenia nominalnego określono w tabeli 1.



Rys. 2. Szczegóły siatki różnicowej w rejonie palnika gazowego

Tabela 1

Parametry pracy kotła OP-140

Zużycie paliwa, kg/h	10720
Strumień węgla do jednego palnika, kg/s	0,372
Strumień gazu, Nm <sup>3</sup> /h	10000
Nadmiar powietrza w komorze paleniskowej $\lambda_{kp}$	1,2
Strumień powietrza za młynem wentylatorowym, kg/s	3,454
Strumień spalin pobierany przez jedną rurosuszarke, kg/s	0,584
Całkowity strumień mieszaniny w pyłoprzewodach, kg/s	8,425
Strumień powietrza wtórnego, kg/s	11,745
Strumień powietrza do dysz OFA, kg/s	8,437
Temperatura powietrza wtórnego, °C	228

## 2. Model matematyczny spalania

Model matematyczny oparty jest o komercyjny kod Fluent [1]. Spalanie pyłu węglowego można podzielić na dwie części: odgazowanie oraz spalanie pozostałości koksowej. W symulacji wykorzystano model z pojedynczą szybkością odgazowania [2], który zakłada, że szybkość odgazowania zależy od ilości części lotnych pozostałych w cząstce według reakcji pierwszego rzędu. Model ten rozszerzono poprzez użycie procedury FG-DVC [3] w trybie preprocesorowym. Procedura FG-DVC opisuje termiczny rozkładu węgla na etapie pirolizy z uwzględnieniem takich procesów, jak: polimeryzacja/depolimeryzacja, sieciowanie oraz formowanie się produktów gazowych [4]. Danymi wyjściowymi są: szybkość powstawania oraz udziały pozostałości koksowej, smoły, części lotnych oraz skład najważniejszych produktów podczas odgazowania węgla. Dla potrzeb mechanizmu globalnego spalania w fazie gazowej dane wyjściowe procedury są normalizowane oraz przeliczane na dwa składniki: węglowodory lekkie ( $C_mH_n$ ) oraz smołę ( $C_xH_yO_z$ ). Wyniki oraz analizę techniczną i elementarną węgla zamieszczono w tabeli 2.

Przyjęty skład gazu z odmetanowania kopalni przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2

**Analiza węgla oraz wyniki procedury FG-DVC**

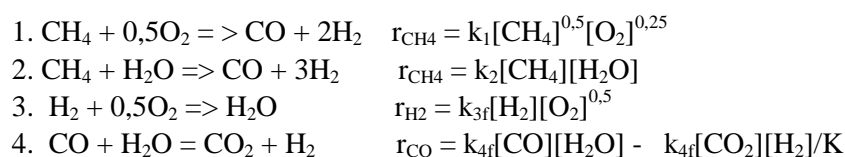
Analiza techniczna węgla (stan roboczy)				
Popiół	Części lotne		Wilgoć	Pozostałość koksowa
21,2	25,2		9,7	43,9
Analiza elementarna węgla (stan suchy bezpopiołowy) % wag.				
C	H	N	S	O
84,66	5,54	0,98	1,59	7,23
FG-DVC Produkty odgazowania węgla (stan suchy bezpopiołowy), % wag.				
Części lotne			Pozostałość koksowa	
47,8			52,2	
Skład części lotnych węgla (stan suchy bezpopiołowy) z FG-DVC, % wag.				
H <sub>2</sub> O	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>
3,43	2,69	0,75	8,62	32,3
Empiryczne formuły lekkich węglowodorów (C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> ) oraz smoły (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub> )				
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>			C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>	
m = 1, n = 5,76			x = 7, y = 7,31, z = 0,41	

Tabela 3

**Przyjęty skład gazu z odmetanowania kopalni (gaz suchy, % obj.)**

CH <sub>4</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
43	1,2	0,5	2,3	41,9	11,1

Model wzajemnego wpływu turbulencji i reagowania fazy gazowej zaproponowali Magnussen i Hjertager [5]. Model EDC opiera się na założeniu, że proces spalania zachodzi jedynie w małych strukturach wirowych w objętościach kontrolnych. Każda z tych przestrzeni traktowana jest jako reaktor idealnego wymieszania, który wymienia masę i energię jedynie z otaczającym płynem. Jednym z kierunków rozwoju modeli turbulentnego spalania jest adaptacja modeli kinetyki chemicznej mechanizmów reagowania. Obok mechanizmów elementarnych zawierających kilkadziesiąt reakcji i kilkadziesiąt składników od lat rozwijane są mechanizmy zredukowane i globalne. Do obliczeń wykorzystano czterokrokowy globalny mechanizm reagowania fazy gazowej Ruckerta [6]:



W przewidywanej przyszłości nie będzie możliwa implementacja mechanizmów elementarnych do kodów 3-D. Symulacje CFD w zagadnieniach inżynierskich wykorzystują przede wszystkim mechanizmy globalne. Najistotniejsze informacje mogą być uzyskane przy mniej szczegółowym opisie kinetyki, który odzwierciedlać będzie najistotniejsze cechy kinetyki.

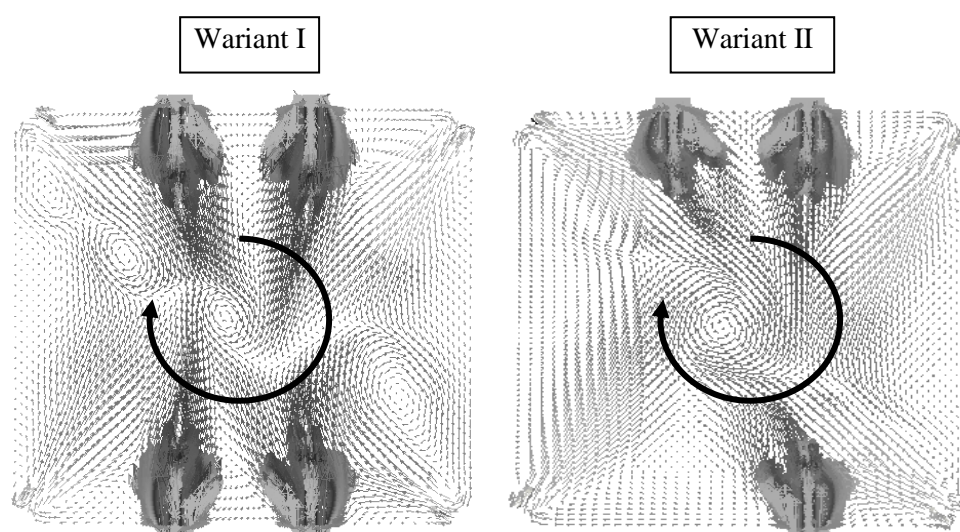
Stopień dokładności powyższego mechanizmu globalnego zbadano w pracy [7] poprzez porównanie go z mechanizmem szczegółowym GRIMECH 2.11 w reaktorze idealnego wymieszania.

Pozostałość koksowa ulega utlenianiu do CO. Szybkość reakcji obliczona jest przy założeniu, że proces ten jest kontrolowany przez dyfuzję tlenu do powierzchni cząstki oraz reakcję na powierzchni cząstki. Stałe kinetyczne oraz dokładny opis modelu podano w pracy [8].

### 3. Wyniki

Usytuowanie czterech palników gazowych na jednym poziomie w obrębie pasa palnikowego przy spalaniu 10 000 Nm<sup>3</sup>/h gazu powodowałoby przekroczenie emisji NO<sub>x</sub> i CO. Testy numeryczne nie wykazały, aby strugi palników pyłowych zaburzały w niebezpieczny sposób aerodynamikę przepływu za palnikami gazowymi.

Rysunek 3 przedstawia wektory prędkości w kolejnych przekrojach kotła. Niesymetryczne zasilanie komory w wariacie II na wysokości dolnych palników gazowych skutkuje gorzej ukształtowanym wirem. Niesie to ryzyko tworzenia się „kominów”, w których przemieszcza się wychłodzona mieszanka pyłowo-powietrzna. Przy braku dostatecznego mieszania się z gorącymi spalinami w omawianych obszarach powstaje duży niedopał. Korzystniejszy pod tym względem wydaje się wariant I.

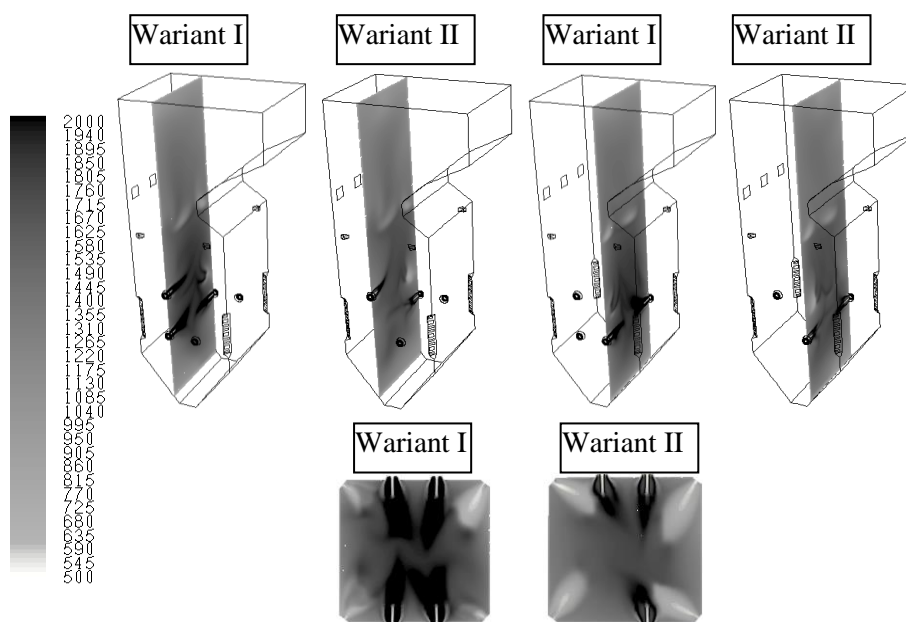


Rys. 3. Pola wektorowe prędkości w przekroju dolnych palników gazowych oraz środkowych palników pyłowych

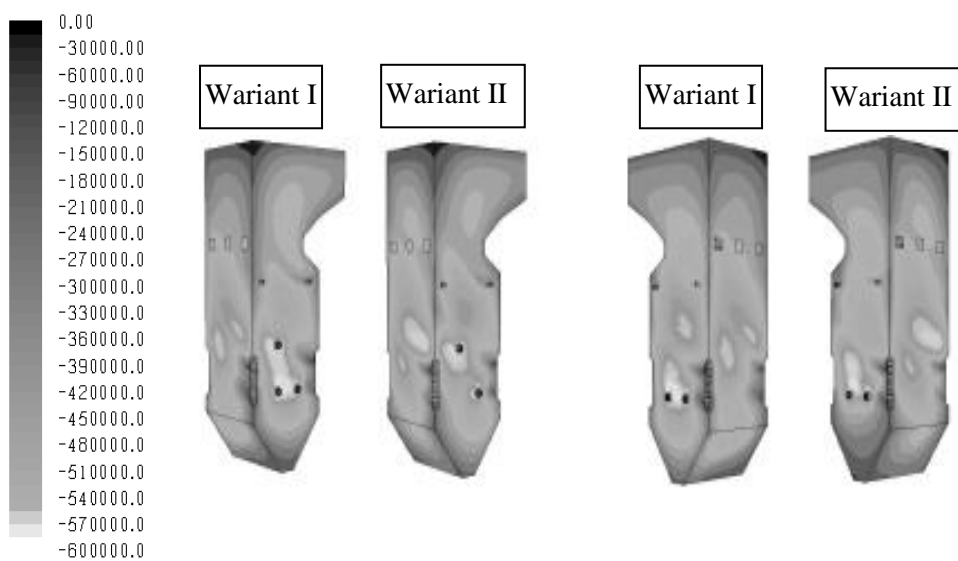
Pola temperatur w wybranych przekrojach przedstawia rysunek 4. Z obserwacji nie wynika, aby strugi palników pyłowych i gazowych niebezpiecznie się zaburzały. Nie zaobserwowano także przylegania płomienia do ścian komory. Na kolejnych przekrojach widoczne jest prawidłowo usytuowane jądro płomienia w osi komory. Wyniki podobne są dla obydwu wersji. Rysunek 4 pokazuje nieznacznie wyższe obciążenie cieplne górnej części komory paleniskowej dla wersji II (większa wydajność górnego palnika gazowego). Potwierdza to także rozkład strumienia radiacji do ścian komory (rys. 5). Niższe strumienie radiacji do ścian świadczą o niższym obciążeniu cieplnym pasa palnikowego (rys. 5). Takie warunki spalania sprzyjają redukcji CO i NO.

Do dzisiaj brak jest wiarygodnego modelu obliczeniowego do oceny zagrożenia korozji niskotlenowej ścian komory paleniskowej. Pewnej oceny można jednak dokonać, analizując w pobliżu ścian rozkłady takich wielkości, jak: temperatura, CO, strumienie ciepła. Na niebezpieczeństwo korozji będą wskazywać wysokie wartości tych wielkości.

Rysunek 4 pokazuje występowanie wysokich temperatur przyściennych z prawej strony palników. Jest to dość charakterystyczne miejsce dla kotłów z palnikami szczelinowymi, często też występuje tu przyspieszona korozja. Najbardziej zagrożone korozją są prawdopodobnie rejony z dużą zawartością CO przy jednoczesnym braku tlenu. Według tego kryterium najbardziej narażoną częścią kotła jest lej (rys. 6). Nieznacznie wyższe ryzyko korozji leja zaobserwować można dla wersji II ustawienia palników, w szczególności na lewej ścianie. Poziom CO sięga tam 1,5% przy śladowej ilości tlenu (rys. 6). Należy tu jednak podkreślić, że obliczenia stężeń CO obarczone są niepewnością i należy traktować je jakościowo, nie ilościowo.



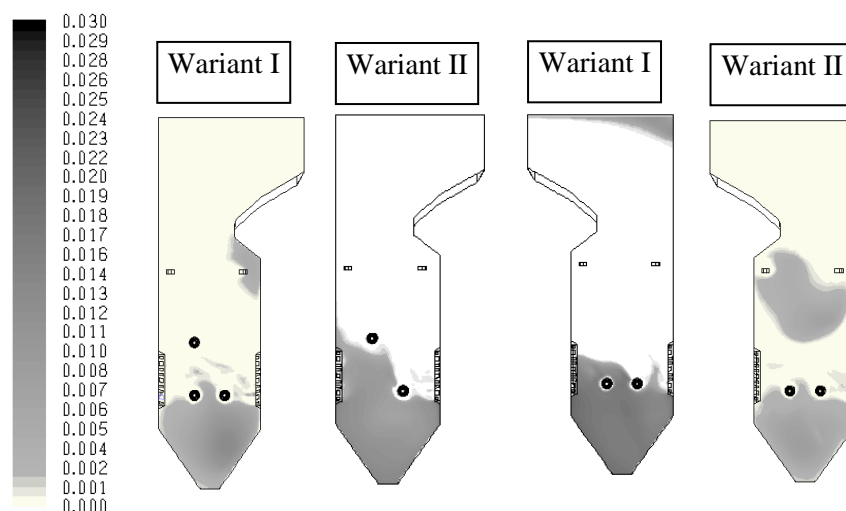
Rys. 4. Rozkłady temperatur w przekrojach pionowych palników gazowych oraz w przekrojach poziomych na wysokości dolnych palników gazowych (K)



Rys. 5. Rozkład strumienia radiacji do ścian komory (W/m<sup>2</sup>)

Korozja niskotlenowa występuje często w rejonach narażonych na szlakowanie. Obie wersje rozmieszczenia palników skutkują zmniejszeniem obciążenia cieplnego komory. W komorze paleniskowej szlakowanie dobrze koreluje z dużymi strumieniami promieniowania do ścian komory. Wartości strumienia pro-

mieniowania do ścian przewyższające  $600 \text{ kW/m}^2$  sugerują możliwość szlakowania w tych miejscach komory. Maksymalne wartości strumienia do ścian nie przewyższają  $600 \text{ kW/m}^2$ , co zmniejsza ryzyko szlakowania. Wyższe obciążenie cieplne w rejonie palników gazowych występuje w wersji I. Ryzyko szlakowania w tym miejscu jest nieznacznie wyższe.



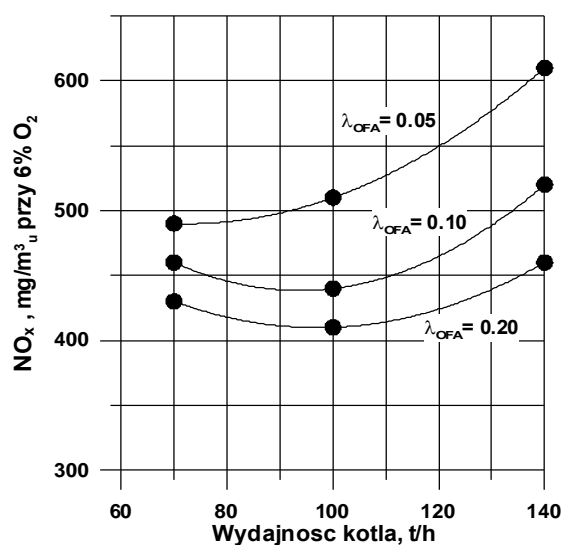
Rys. 6. Udziały objętościowe CO na prawej i lewej ścianie komory paleniskowej

Lepiej ukształtowany wir w wariantcie I oraz niewielkie ryzyko korozji ścian membranowych sugerują nieznaczną przewagę rozwiązania zawartego w wersji I. Ze względu na dużą zawartość azotu w paliwie gazowym istotna wydaje się analiza emisji  $\text{NO}_x$ . Rysunek 7 pokazuje średnie wartości  $\text{NO}$  za komorą paleniskową wybranego wariantu I obliczone procedurą 3-D dla różnych wydajności kotła i różnych nadmiarów powietrza w dyszach OFA. Przyjęto, że za emisję  $\text{NO}$  odpowiedzialny jest mechanizm paliwowy i termiczny. Pomija się tzw. mechanizm „szybki” [9]. Obliczenia sugerują konieczność utrzymania nadmiaru powietrza w dyszach OFA powyżej wartości 0,1 dla uzyskania stężeń  $\text{NO}_x$  w spalinach poniżej  $500 \text{ mg/m}_v^3$  przy 6%  $\text{O}_2$ .

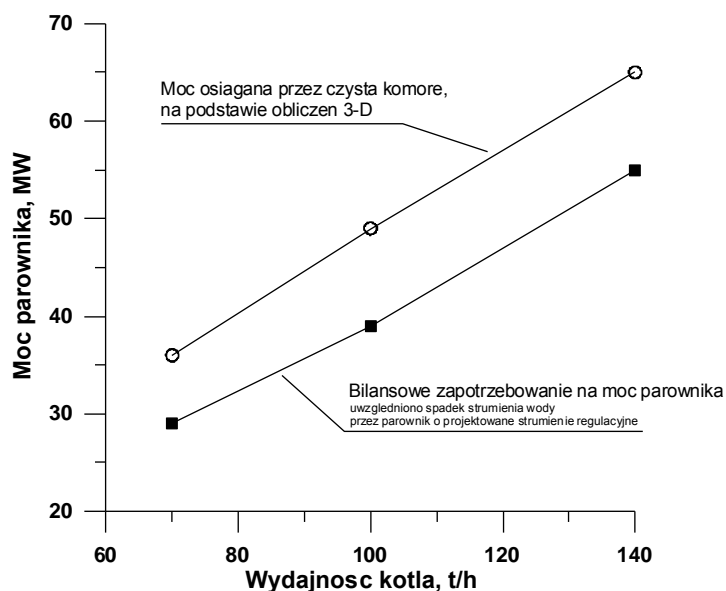
Ze względu na duży udział paliwa gazowego przeanalizowano moc cieplną parownika. Odpowiednia moc cieplna parownika przy zadanym strumieniu paliwa jest warunkiem uzyskania zadanej mocy ciepła kotła i pożądanego strumienia wtrysków regulacyjnych.

Moc cieplna parownika odpowiada określonej, średniej temperaturze wylotowej z komory paleniskowej (FEGT - Furnace Exit Gas Temperature). FEGT jest temperaturą wyjściową do obliczeń projektowych przegrzewaczy. FEGT można wyznaczyć z obliczeń 3-D na dwa sposoby: z prostego bilansu entalpii cieplnej, wykorzystując wartość ciepła przejętego w komorze, lub z odpowiedniego uśrednienia pola temperatur spalin na wylocie z komory paleniskowej.





Rys. 7. Średnie wartości NO za komorą paleniskową obliczone procedurą 3-D dla różnych nadmiarów powietrza do dysz OFA



Rys. 8. Porównanie mocy cieplnej parownika obliczonej procedurą 3-D z bilansowym zapotrzebowaniem na moc parownika

Rysunek 8 pokazuje porównanie mocy cieplnej parownika obliczonej procedurą 3-D z bilansowym zapotrzebowaniem na moc parownika w rzeczywistej komorze paleniskowej, która uległa częściowemu zabrudzeniu. W tym drugim wykresie uwzględniono projektowane strumienie wody regulacyjnej (wtryski). Obliczenia 3-D komory prowadzono dla ścian o temperaturze wyższej o około 100°C od temperatury czynnika i emisyjności 0,75. Parametry te odpowiadają

warunkom czystej, niezaszlakowanej komory. Rysunek pokazuje, że parownik osiągnie moc nominalną nawet przy znacznym stopniu zabrudzeniu ścian komory.

#### 4. Podsumowanie

Przedmiotem badań numerycznych było ustalenie rozmieszczenia palników gazowych, mającego na celu ustalenie wariantu najbardziej korzystnej współpracy palników pyłowych i gazowych, oraz rozciągnięcie obciążenia pasa palnikowego w celu ograniczenia emisji  $\text{NO}_x$  i CO. Analiza pola wektorowego prędkości pokazała, że niesymetryczne zasilanie komory w wariacie II skutkuje gorzej ukształtowanym wirem. Analiza ryzyka występowania korozji niskotlenowej opierała się na obserwacji pola koncentracji CO. Według tego kryterium najbardziej narażoną częścią kotła jest lej. Nieznacznie wyższe ryzyko korozji leja zaobserwować można dla wersji II ustawienia palników. Maksymalne wartości strumienia do ścian nie przewyższają  $600 \text{ kW/m}^2$ , co zmniejsza ryzyko szlakowania. Nieznacznie korzystniejszy wydaje się wariant pierwszy ustawienia palników gazowych. Obliczenia poziomu  $\text{NO}_x$  dla tej wersji sugerują konieczność utrzymania nadmiaru powietrza w dyszach OFA powyżej wartości 0,1 dla uzyskania stężeń  $\text{NO}_x$  w spalinach poniżej  $500 \text{ mg/m}^3$  przy 6%  $\text{O}_2$ . Przeanalizowano także wydajność parownika w tak zmodernizowanym kotle. Wyniki pokazują, że parownik osiągnie moc nominalną nawet przy znacznym stopniu zabrudzenia ścian komory.

#### Wnioski końcowe

Wykorzystanie gazu z odmetanowania kopalni przynosi zarówno bezpośrednie korzyści ekonomiczne, jak i ekologiczne. Modernizacja kotła zasilanego pyłem węglowym w celu utylizacji gazu kopalnianego nie może zakłócać jego poprawnej pracy. Dodatkowe palniki gazowe zamontowane naściennie w pewnym stopniu zakłócają aerodynamikę przepływu ze spalaniem w komorze paleniskowej, naruszając prawidłowo ukształtowany wir dla kotła sprzed modernizacji. Analizy symulacji 3-D przepływu w kotle wskazują, że wariant pierwszy lokalizacji palników gazowych jest korzystniejszy ze względu na lepiej ukształtowany wir dzięki symetrycznie ustawionym dolnym palnikom gazowym. Ponadto rozkład strumienia promieniowania do ścian jest nieznacznie korzystniejszy w wariacie I, co zmniejsza ryzyko szlakowania komory paleniskowej oraz korozji wysokotemperaturowej.

#### Literatura

- [1] FLUENT, FLUENT 6.3 User Guide, 2006 Lebanon, USA
- [2] Williams A., Backreedy R., Habib R., Jones J.M., Pourkashanian M., Modeling coal combustion: the current position, Fuel 2002, 81, 605-618.
- [3] Advanced Fuel Research Inc. Users guide for FG-DVC, East Hartford, CT, 2004.

- [4] Solomon P.R., Hamblen D.G., Carangelo R.M., Serio M.A., Deshpande G.V., *Combustion and Flame* 1988, 71, 137.
- [5] Magnussen B.F., Hjertager B.H., On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, 16th Symp. (Int'l.) on Combustion, The Combustion Institute 1976, 719-729.
- [6] Ruckert F.U. i in., Comparison of different global reaction mechanisms for coal-fired utility boilers, *Progress in Computational Fluid Dynamics* 2003, 1.3, 130-139.
- [7] Modliński N., Modelowanie spalania fazy gazowej w komorach paleniskowych kotłów energetycznych, *Systems* 2008, 13, 46-52.
- [8] Wiesław R., Szybkość spalania węgla i materiałów węglowych, *Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1993.
- [9] Weber R., Peters A., Breithaupt P., Visser M., *Mathematical Modeling of Swirling Pulverized Coal Flames*, Kansas City 1993, 71-86.

### **Modeling of Pulverised Coal Cofiring with Coal Mine Methane in Large Scale Boiler**

The paper presents 3-D numerical simulation of cofiring coal mine methane with coal in large scale boiler. The purpose of the work is to determine which one from two examined gas burners locations achieves the most optimal gas and coal burners cooperation and extends the thermal load along the burner belt. The extent of modeling studies involves numerical analysis of flow with combustion behind high power burner and heat exchange in the boiler. Combustion aerodynamics and high temperature corrosion risk were assessed for different gas burners location configurations.

The mathematical model used here is based on commercial CFD code FLUENT. Simulation of the following processes takes place in the furnace: turbulent flow, coal combustion, gas phase combustion, particle transport and radiative transport. The gas phase is modeled assuming an Eulerian approach, whilst for the solid phase, the Lagrangian approach is more suitable.

The description of gas phase chemical kinetics in turbulent reactive flow was emphasized. The interaction of chemical reactions and turbulence is modeled using the Eddy Dissipation Concept. Accuracy level of two different global mechanisms was investigated by comparison with detailed mechanism. Rate of the production and high temperature yields for the char, tar, and volatiles and the composition of key species during the devolatilization of coal have been taken from the FG-DVC model output.

Corrosion and slagging risk was estimated by analysis of temperature, CO and incident heat flux in the vicinity of the boilers walls. High levels of these magnitudes indicate unfavorably conditions. Average NO levels behind the combustion chamber suggest keeping excess air level in OFA equal at least 0.1. Calculations have also shown that the evaporator will reach nominal thermal power even with significant amount of deposit formed on the waterwalls.

**Keywords:** combustion, coal-fired boiler, numerical modeling