

Paulina PIANKO-OPRYCH¹, Tomasz SKAZIAK²

e-mail: paulina.pianko@zut.edu.pl

¹ Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydz. Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin² Przedsiębiorstwo Produkcji Energii Elektrycznej Elektrociepłownia Wałcz, Wałcz

Komputerowe modelowanie dynamiki (CFD) przepływu mieszaniny gazowej przez retortę

Wstęp

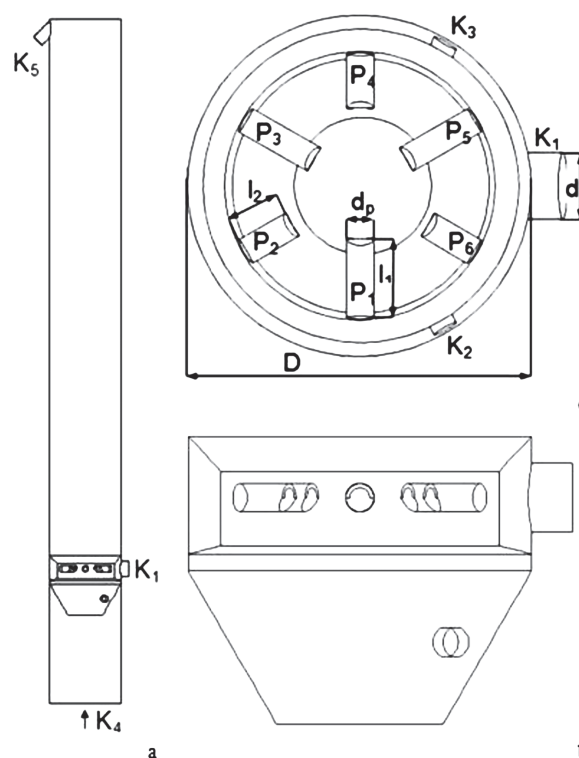
Wyraźny wzrost wymagań dotyczących jakości koksu, obejmującego jego skład chemiczny, zawartości alkaliów, fosforu, chloru, a także niskiej reaktywności oraz wysokiej wytrzymałości koksu doprowadził do sytuacji, w której przedsiębiorstwa produkcji energii z jednej strony stosują mieszanki wsadowe o coraz większej ilości wysokometamorfizowanych węgli koksowych, z drugiej natomiast poszukują nowych rozwiązań aparaturowych, zapewniających pożądane warunki technologiczne procesu koksowania [1]. Zastosowanie węgla wysokometamorfizowanych w mieszance wsadowej jest korzystne ze względu na bardzo dobre właściwości koksotwórcze jednak ograniczone z uwagi na fakt, że węgle podczas procesu koksowania generują wysokie ciśnienie rozprężania, które stwarza zagrożenie dla pracujących urządzeń, w istotny sposób skraca ich żywotność i może doprowadzić do zatrzymania pracy instalacji [2].

Celem badań przedstawionych w prezentowanej pracy było oszacowanie rozkładów prędkości i ciśnień wygenerowanych podczas odgazowywania mieszanek węglowych w rozwiązaniu konstrukcyjnym retorty pionowej Przedsiębiorstwa Produkcji Energii Elektrycznej, Elektrociepłowni Wałcz [3] przy zastosowaniu numerycznej mechaniki płynów (*Computational Fluid Dynamics, CFD*). Cel ten zrealizowano poprzez przeprowadzenie modelowania numerycznego przepływu mieszaniny gazowej przez retortę wykorzystując metodę uśredniania *Reynoldsa* równań *Naviera-Stokesa* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS*). Analizie poddano wartości ciśnień i prędkości na wylocie z sześciu króćców strefy pośredniej, w której dochodzi do schładzania strumienia gazu gorącego przy użyciu strumienia gazu zimnego podawanego od dołu do retorty w strefie dozowania.

Model geometryczny rozpatrywanego układu

Analizowanym obiektem była retorta zbudowana z pionowej rury o średnicy $D = 3,0$ m i długości $L = 28,5$ m (Rys. 1a), w której na wysokości 5,0 m od podstawy umieszczono skomplikowany układ stożków, pierścieni i rur zdefiniowany jako strefa pośrednia. Model geometryczny rozpatrywanego układu przedstawiono na rys. 1b. Układ ten składał się ze stożka dolnego, w którym znajdowały się dwa króćce wylotowe gazu K_2 i K_3 widoczne na rys. 1c. W odległości 140 mm od dolnego stożka umieszczono odwrócony względem poprzedniego elementu stożek o wysokości 73,4 mm, którego dolna średnica była równa średnicy wewnętrznej retorty, natomiast górna średnica stożka uległa zwężeniu do wartości równej 2,4 m. Kolejnym elementem zbiornika był pierścień o wysokości 0,64 m i średnicy 2,4 m. Na obwodzie pierścienia w odległości, co kąt 60° naprzemiennie umieszczono sześć rur wlotowych o dwóch długościach równych odpowiednio $l_1 = 715$ mm (P_1, P_3, P_5) oraz $l_2 = 490$ mm (P_2, P_4, P_6). Pierwsza rura zlokalizowana na obwodzie pierścienia poniżej króćca K_1 (Rys. 1c – widok z góry) charakteryzowała się długością l_2 , kolejna rura miała długość l_1 . Średnica rur była jednakowa i wynosiła $d_p = 244,5$ mm. Rury zostały zakończone w górnej części blaszkami w kształcie półksiężyców. Ostatnim elementem rozpatrywanego układu był ścięty stożek o średnicy dolnej równej

średnicy pierścienia i górnej średnicy równej średnicy wewnętrznej rury pionowej retorty. W odległości 0,53 m od górnej krawędzi stożka górnego zwiężczającego omawiany układ umieszczono króćciec wlotowy gorącej mieszaniny gazowej, K_1 , o średnicy $d = 0,6$ m. Całość została zobrażowana na rys. 1c jako rozwiązanie konstrukcyjne retorty pionowej przewidzianej do użycia przez Przedsiębiorstwo Produkcji Energii Elektrycznej, Elektrociepłownię Wałcz.



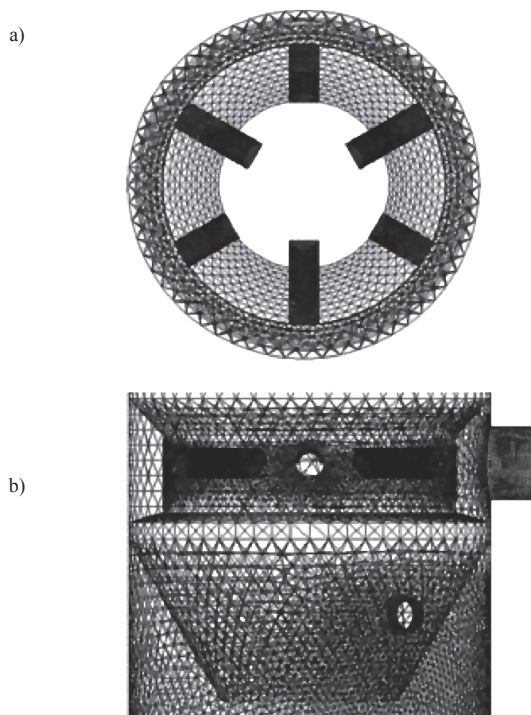
Rys. 1. Pionowa retorta: (a) pełna geometria retorty; (b) strefa pośrednia – układ stożków, pierścieni i rur, widok z boku; (c) strefa pośrednia – część stożkowa retorty z sześcioma rurami wlotowymi umieszczonymi na obwodzie części pierścieniowej retorty

Zasadniczo w rozpatrywanym układzie można wyróżnić trzy strefy: strefę dozowania, strefę pośrednią (mieszania) i strefę wystudzoną. Pierwsza strefa dozowania zlokalizowana jest na dole pionowej retorty i jest to wlot gazu zimnego przez króćciec K_4 . Gaz zimny doprowadzany jest do retorty w temperaturze 313 [K] i przy masowym natężeniu przepływu 4500 [kg/h]. Gaz ten opuszcza retortę króćcami K_2 i K_3 w części stożkowej w temperaturze 513 [K]. Ten fragment retorty wchodzi już w skład strefy pośredniej, w której następuje mieszanie strumienia gazu zimnego z mieszaniną gazów gorących doprowadzanych do retorty króćcem K_1 . Temperatura mieszaniny gazu gorącego na wlocie do strefy pośredniej wynosi 823 [K]. Po schłodzeniu do temperatury około 443 [K] mieszanina gazowa opuszcza retortę przez króćciec K_5 w strefie wystudzonej, obejmującej górną część pionowej rury retorty. Masowe natężenie przepływu gazu gorącego na wlocie do króćca K_1 i na wylocie

z retorty (króciec K_5) wynoszą odpowiednio 9000 [kg/h] i 10150 [kg/h]. W skład mieszaniny gazowej (gorącej) wchodzi związek: dwutlenek węgla 13,6%, woda 31,3%, azot 55,1%, reszta to pył węglowy. Udziały objętościowe mieszaniny gazowej zimnej wynoszą odpowiednio CO_2 – 19,8% i N_2 – 80,2% [3].

Warunki modelowania i analiza problemu

Początkowy etap modelowania z użyciem kodów CFD obejmował wygenerowanie siatki numerycznej i zdefiniowanie warunków jednoznaczności. Geometria i siatka numeryczna została zdefiniowana przy użyciu graficznego pakietu oprogramowania *Gambit*TM 2.4.6. Na rys. 2 przedstawiono fragment siatki niestrukturalnej zdefiniowanej dla strefy pośredniej (mieszania) retorty.



Rys. 2. Siatka niestrukturalna na odcinku strefy pośredniej retorty pionowej: a) widok z góry, b) widok z boku

Cała siatka obliczeniowa obejmuje w przybliżeniu 686 tysięcy (686 k) komórek. Wygenerowana trójwymiarowa (3D) geometria retorty była zasadniczo zgodna z geometrią zaproponowaną przez *Elektrociepłownię Walcz*. Różnica polega na pominięciu 609 otworów o średnicy 10 mm rozmieszczonych w kilku rzędach odpowiednio na powierzchniach rur wlotowych ($P_1 - P_6$) i górnego stożka zlokalizowanego w strefie pośredniej retorty. Uwzględnienie otworów w modelowanej geometrii prowadziło do dużej dysproporcji pomiędzy wielkością komórek obliczeniowych tworzonych przy otworach na powierzchni rur wlotowych a komórkami wygenerowanymi poza strefą pośrednią. Poza dysproporcją w rozmiarach komórek, obecność otworów w geometrii powodowała drastyczny wzrost liczby węzłów siatki, wynikający z konieczności umieszczenia wokół każdego otworu, co najmniej kilku węzłów, aby zapewnić możliwość wygenerowania poprawnej siatki obliczeniowej o równomiernych rozmiarach komórek. Oszacowano sumaryczną powierzchnię otworów oraz powierzchnię rur wlotowych i górnego stożka, na których powinny zostać umieszczone otwory. Stwierdzono, że sumaryczna powierzchnia otworów stanowi zaledwie 0,85% całkowitej powierzchni. Uznano zatem, że pominięcie otworów w geometrii nie wpłynie na zniekształcenie rozkładów analizowanych parametrów.

Do modelowania zastosowano komercyjny pakiet *CFD* o nazwie *Fluent* 6.3.26. Układ rozwiązywanych równań ograniczono do siedmiu równań bilansu różniczkowego: jedno równanie ciągłości dla miesza-

ny gazowej, równanie energii, po jednym równaniu bilansu pędu w kierunku x , y , z oraz dwa równania standardowego modelu burzliwości $k-\epsilon$, uwzględniające warunki przepływu burzliwego [4].

Analizowane zagadnienie uproszczono zakładając, że skład mieszaniny gazów gorących i zimnych jest jednakowy. W obliczeniach zastosowano standardowe wartości parametrów numerycznych, przyjmowanych domyślnie w kodzie *Fluenta*, do których należały: wartości współczynników podrelaksacji, algorytm sprzęgania *SIMPLE* oraz *schemat różnicowy pierwszego rzędu pod prąd* (*the 1st order upwind*). Kryterium zbieżności iteracji numerycznych zostało przyjęte dla znormalizowanej sumy reszt numerycznych ustalonych na poziomie poniżej 10^{-5} .

W celu oceny stopnia równomierności rozkładu prędkości gazu przy przepływie mieszaniny gazowej przez rury wlotowe retorty w strefie pośredniej zastosowano współczynnik M_k opisany równaniem (1):

$$M_k = \frac{1}{A} \int_a \left(\frac{V}{V_a} \right)^2 dA \quad (1)$$

gdzie:

A – pole przekroju poprzecznego na wlocie do rury wlotowej, [m²],

V_a – średnia prędkość gazu w przekroju A , [m/s],

V – prędkości gazu [m/s].

Teoretycznie współczynnik M_k dla idealnego równomiernego rozkładu prędkości mieszaniny gazu w strefie pośredniej retorty powinien wynosić 1,0. Maksymalną dopuszczalną wartością współczynnika równomierności rozkładu, M_k , jest 1,20 [5]. W przypadku, gdy M_k przekracza wartość 1,20 wymagana jest korekta w konstrukcji elementów wchodzących w skład części pośredniej retorty.

Wyniki modelowania

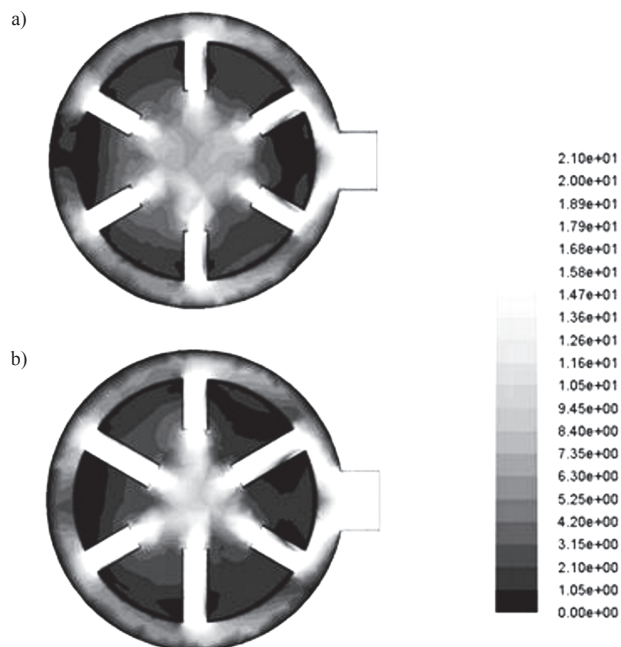
Symulację pierwszą przeprowadzono dla geometrii oryginalnej retorty pracującej w *Przedsiębiorstwie Produkcji Energii Elektrycznej, Elektrociepłowni Walcz*. Oryginalna geometria retorty pionowej charakteryzuje się tym, że w strefie pośredniej na obwodzie pierścienia umieszczone są rurki wlotowe mieszaniny gazowej o jednakowej długości równej $l_2 = 490$ mm. Wyniki zobrazowano w postaci rozkładu średniej prędkości mieszaniny gazowej na płaszczyźnie poziomej w połowie wysokości rur wlotowych w strefie pośredniej retorty na rys. 3a. Łatwo można zaobserwować nierównomierny rozkład prędkości, z tendencją strumienia mieszaniny gazowej do przepływu o dużej prędkości przy wypływie z króćca wlotowego K_1 i utrzymaniem tej tendencji w przypadku przepływu przez rury P_5 i P_6 . Problemem jest tutaj niszczenie zewnętrznej powierzchni pierścieniowej, w którą skierowany jest strumień gorących gazów dozowanych z króćca wlotowego K_1 , co wiąże się z koniecznością przeprowadzania dodatkowych remontów aparatury. Zróżnicowanie średniej prędkości gazu w płaszczyźnie poziomej w połowie wysokości rur wlotowych w strefie pośredniej widoczne jest wyraźnie w przestrzeni pomiędzy ścianą retorty a zewnętrzną powierzchnią pierścienia strefy pośredniej szczególnie w obszarze naprzeciwko króćca K_1 pomiędzy rurami P_2 i P_3 , gdzie występują niskie wartości prędkości mieszaniny gazowej. Ponadto wyróżnić tu można dwa obszary o niskich prędkościach, pierwszy zlokalizowany pomiędzy rurą P_5 i P_6 oraz drugi obszar znajdujący się naprzeciwko pomiędzy rurami P_2 i P_3 .

Symulację drugą przeprowadzono dla zmodyfikowanej geometrii retorty pionowej omówionej szczegółowo w punkcie Model geometryczny rozpatrywanego układu, w której na obwodzie pierścienia naprzemiennie umieszczono rury wlotowe o długościach l_1 i l_2 (Rys. 3b). Ostatecznie strumień mieszaniny gazowej został skutecznie rozprowadzony w przestrzeni pomiędzy ścianą pionową rury retorty a częścią pierścieniową strefy pośredniej, zmniejszeniu uległy również obszary niskich prędkości pomiędzy rurami wlotowymi gazu P_5 i P_6 .

Wskaźnikiem ilościowym określającym równomierność rozkładu prędkości gazu był wskaźnik M_k , którego wartości dla zmodyfikowanej geometrii retorty zostały podane dla kolejnych rur wlotowych w tab. 1. Dla żadnej rury wlotowej wartość współczynnika M_k nie przekroczyła wartości dopuszczalnej 1,20. Wartości te są dostatecznie bliskie warto-

Tab. 1. Zestawienie wyników obliczeń dla zmodyfikowanej geometrii retorty o naprzemiennej długości rur wlotowych mieszanki gazowej

Numer rury wlotowej	1	2	3	4	5	6	Średnia wartość/ odchylenie standardowe
Współczynnik M_k równomierności rozkładu	1,07	0,91	0,91	1,03	1,09	0,99	1,0013/0,07
Objętościowe natężenie przepływu gazu [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,38	0,35	0,35	0,37	0,38	0,36	0,365/0,014
Średnie ciśnienie [Pa]	1796	1795	1800	1796	1788	1783	1793/6,28
Spadek ciśnienia [Pa]	260,2	261,5	256,3	261,0	268,3	268,3	262,61/4,8



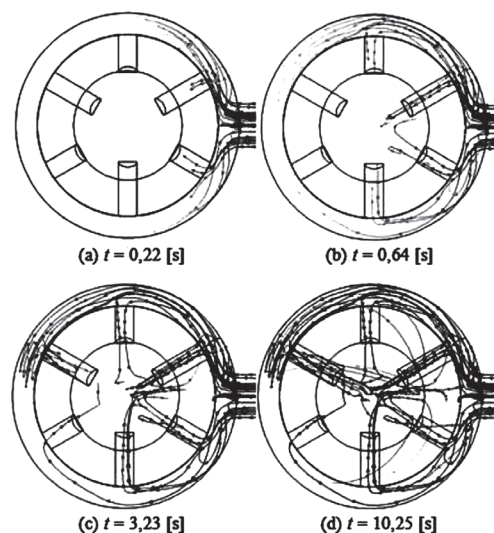
Rys. 3. Rozkład średniej prędkości mieszanki gazowej na płaszczyźnie poziomej w połowie wysokości rur wlotowych w strefie pośredniej retorty: (a) oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne retorty [3], (b) propozycja modyfikacji geometrii retorty pionowej

ści 1,0, aby uznać przepływ mieszanki gazowej przez przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne retorty z układem sześciu rur wlotowych o zmiennej naprzemiennej długości za właściwe, zapewniające równomierny rozkład strumienia gazu i nie wymagające dalszej modyfikacji. Istotne jest jednak, aby wykonanie konstrukcyjne elementów retorty było precyzyjne, albowiem przeprowadzone dodatkowe symulacje numeryczne, w których zawężono o 5% pola przekroju rur wlotowych P_5 i P_6 pokazały, że następuje znaczne pogorszenie stopnia równomierności rozkładu prędkości gazu w retorcie.

Porównano także wartości objętościowego natężenia przepływu gazu przez rury wlotowe i stwierdzono, że różnice pomiędzy nimi są niewielkie, co świadczy o równomiernym rozkładzie prędkości mieszanki gazowej w strefie pośredniej zmodyfikowanej geometrii retorty.

Spadki ciśnień dla kolejnych rur wlotowych zmodyfikowanej geometrii retorty pionowej wyznaczono jako różnicę ciśnień pomiędzy średnim ważonym ciśnieniem odczytanym dla króćca K_1 pomniejszonym o wartość średniego ciśnienia dla rur wlotowych P_1 do P_6 . Średnie wartości ciśnień odczytano przy końcu rur wlotowych dla $y = 95\% y_{max}$, gdzie y_{max} oznacza maksymalną długość rury wlotowej l_1 lub l_2 . Średnie prędkości zostały wyznaczone natomiast na powierzchniach wlotowych do rur wlotowych dla $y = 0$. Analiza wartości ciśnień na wylocie z rur wlotowych retorty wykazuje niewielkie wahania od wartości średniego ciśnienia (Tab. 1). Największe spadki ciśnienia i wartości prędkości gazu stwierdzono dla rur wlotowych P_5 i P_6 , czyli położonych najbliżej króćca wlotowego gorącej mieszanki gazowej K_1 , wartości te są jednak mniejsze od wartości uzyskanych w symulacji pierwszej dla oryginalnej geometrii retorty.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły także na analizę w czasie torów strumienia gorącego gazu wprowadzonego do retorty przez króćce K_1 (Rys. 4). Wyniki zaprezentowano dla płaszczyzny poziomej położonej w osi rur wlotowych dla zmodyfikowanej geometrii



Rys. 4. Tory strumienia gazu wprowadzonego przez króćce K_1 dla zmodyfikowanej geometrii retorty o naprzemiennej długości rur wlotowych $P_1 - P_6$ mieszanki gazowej

retorty kolejno dla czasu t wynoszącego odpowiednio: 0,22; 0,64; 3,23 i 10,25 s. Analiza torów strumienia mieszanki gazowej w czasie pozwoliła na ocenę szybkości dopływu strumienia gazu do kolejnych rur i zidentyfikowanie obszarów stagnacji, gdzie przepływ gazu jest niewielki. Informacje te są bardzo przydatne pozwalają bowiem na prześledzenie zachowania się układu w zależności od przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego aparatu.

Wnioski

Przeprowadzone obliczenia numeryczne umożliwiły analizę jakościową rozkładów prędkości i ciśnień w wybranych punktach retorty, ocenę ilościową stopnia równomierności rozkładu prędkości gazu oraz oszacowanie wartości spadków ciśnienia na wylocie z rur wlotowych w części pośredniej zmodyfikowanej geometrii retorty, dzięki czemu osiągnięto bardziej równomierny rozkład prędkości gazu w retorcie. Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów pozwoliło na diagnostykę warunków pracy retorty, dzięki takiemu podejściu możliwe jest bardziej precyzyjne wskazanie parametrów, których zmiana pozwoli na optymalizację i skuteczną pracę retorty.

LITERATURA

- [1] A. Rozwadowski: Gospodarka surowcami mineralnymi, **23**, nr 2, 49 (2007).
- [2] A. Karcz: Karbo, **7**, 261 (2001).
- [3] Rozwiązania konstrukcyjne retorty pionowej – Przedsiębiorstwo Produkcji Energii Elektrycznej, Elektrociepłownia Wałcz, 2009.
- [4] B. Lauder, D. Spalding: Comp. Meth. App. Mech. & Eng., **3**, nr 2, 269 (1974).
- [5] T. Malcher: ElektroFiltry, **14**, 3 (2004).