

Wojciech MOKROSZ

e-mail: mokrosz@mokrosz.pl

Mokrosz Sp. z o.o.

Wykorzystanie obliczeń CFD do powiększania skali procesu odsiarczania spalin na przykładzie wybranych instalacji wdrożonych w energetyce

Wprowadzenie

Obliczenia CFD (*Computational Fluid Dynamics*) stanowią rozwiniętą technikę obliczeniową pozwalającą na badanie dynamiki przepływu płynów. Wykorzystanie obliczeń CFD pozwala badać model w różnych konfiguracjach przy zadanych różnych warunkach fizycznych we względnie krótkim czasie i przy znacznie mniejszym koszcie w stosunku do badań modeli fizycznych. Równocześnie dostępna staje się informacja o rozkładzie wszystkich fizycznych zmiennych w całym analizowanym obszarze. W eksperymencie numerycznym eliminowane są dodatkowo niedokładności związane z błędem pomiaru. Programy CFD pozwalają uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pole ciśnienia), ruchu ciepła (pola temperatury) oraz ruchu masy (w tym reakcje chemiczne). Informacje te uzyskiwane są w wyniku numerycznego rozwiązania równań opisujących wymianę pędu oraz bilansu energii i masy.

Modelowanie mokrego absorbera stosowanego w technologii mokrej wapiennej tzw. MOWAP

Modelowanie mokrego absorbera stosowanego w technologii mokrej wapiennej tzw. MOWAP jest istotnym zagadnieniem z punktu widzenia możliwości jego optymalizacji. Znajomość rozkładu pól prędkości w strefie wymiany masy umożliwia optymalizację systemu zraszania. Podobnie można optymalizować pracę separatora kropeł. Aktualnie głównym problemem modelowania tego typu procesów jest moc obliczeniowa współczesnych komputerów i związana z tym konieczność wykonywania obliczeń na tzw. klastrach lub serwerach wykorzystujących kilka licencji CFD. Rozwiązanie takie jest zwykle kosztowne i czasochłonne.

Przedstawione wyniki obliczeń i przyjęte modele dobrano w sposób umożliwiający prowadzenie obliczeń w oparciu o jedną licencję.

Poniżej zaprezentowano wyniki obliczeń rozkładu pól prędkości oraz stężeń. Prezentowane modele umożliwiają zmianę gęstości zraszania w dowolnie wybranych obszarach pracy absorbera np. w celu wyrównania pola prędkości. Ponadto umożliwiają optymalizację pracy zraszaczy i separatorów kropeł w absorberze.

Na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie w numerycznym modelu absorbera natryskowego empirycznego równania opracowanego w wyniku badań w modelowym absorberze. Badania były prowadzone w warunkach ustabilizowanego przepływu spalin (stałego gradientu prędkości) w całej objętości absorbera. Sposób ten umożliwia analizę wpływu wszystkich parametrów procesu odsiarczania na zmianę stężenia dwutlenku siarki, z uwzględnieniem lokalnych zmian burzliwości związanych z geometrią analizowanego obiektu w całej jego objętości.

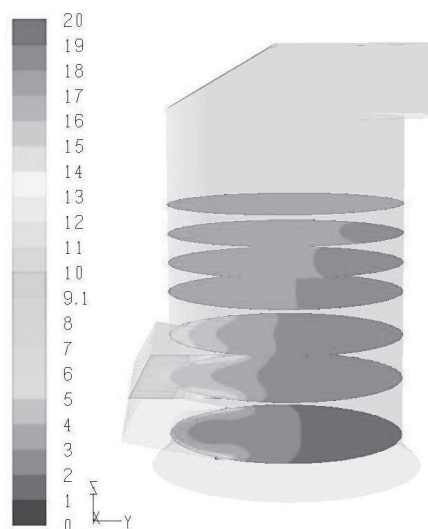
Sprawność procesu absorpcji SO_2 wyrażono równaniem [1]:

$$\eta_{\text{SO}_2} = 1 - \exp\left(-\frac{\beta_{\text{Ag}} \alpha p H_{\text{abs}}}{n_g}\right) \quad (1)$$

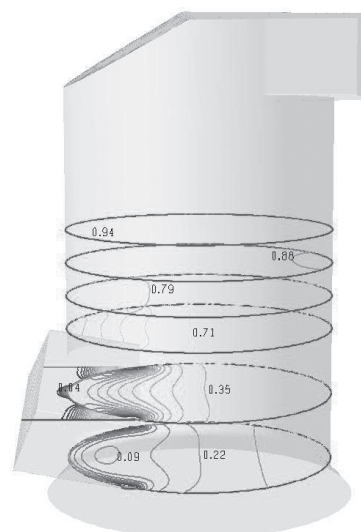
Obowiązującym przy założeniu idealnej dystrybucji monodispersyjnych kropeł, wyrównanym profilem pola prędkości, niskich stężeń dwutlenku siarki oraz spełnieniu warunku zaniku oporów wnikania masy w fazie ciekłej.

Wartość współczynnika wnikania masy określono empirycznie jako funkcję prędkości gazu, gęstości zraszania (stosunku L/G), średnicy kropeł oraz parametrów fizykochemicznych.

Gęstość zraszania wyrażoną jako stosunek L/G zapewniający spełnienie warunku zaniku oporu wnikania masy w fazie ciekłej określono empirycznie jako funkcję czasu retencji zawiesiny w absorberze, nadmiaru stechiometrycznego, stężenia jonów Cl^- oraz średnicy cząstek sorbentu. Poniżej na rysunkach zaprezentowano rozkład prędkości oraz rozkład stężeń ditlenku siarki w absorberze.



Rys. 1. Rozkład prędkości w absorberze



Rys. 2. Rozkład stężenia w absorberze

Modelowanie CFD reaktora pneumatycznego stosowanego w technologii pól suchej

Model poniżej prezentowanego reaktora opracowano na podstawie badań laboratoryjnych prowadzonych w mikroskali na pilotowych instalacjach odsiarczania spalin o różnych wydajnościach spalin. Przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie równania skuteczności

odsiarczania uwzględniającego istotne parametry procesowe. Badania uwzględniały wpływ wilgotności spalin, nadmiaru stechiometrycznego sorbentu Ca/S, powierzchni właściwej sorbentu, stężenia dwutlenku siarki, koncentracji zapylenia oraz wpływ obecności chlorowodoru i popiołu lotnego na proces odsiarczania.

Ilościowy wpływ wybranych parametrów na skuteczność odsiarczania, dla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jako sorbentu, przedstawiono w postaci równań empirycznych opisujących skuteczność procesu odsiarczania w dwóch zakresach końcowej temperatury spalin [2]:

$$\text{Dla } t < 373 \text{ K} \quad \eta_{\text{SO}_2} = 1 - \exp\left[1,5 \Delta T^{0,5} a^{0,4} x_{\text{HCl}}^{0,04} \left(\frac{\text{Ca}}{\text{S}} k_{\text{rec}}\right)^{0,34}\right] \quad (2)$$

Zakres stosowalności równania (2):

$$\Delta T = 10 \div 45 \text{ K}, \quad a = 10 \div 21 \text{ m}^2/\text{g}, \quad x_{\text{HCl}} = 1 \div 250 \text{ ppm}, \\ k_{\text{rec}} = 5 \div 100, \quad \text{Ca/S} = 1,0 \div 1,25 \text{ mol/mol} \\ \text{Błąd korelacji } \delta = \pm 15\%$$

$$\text{Dla } t > 373 \text{ K} \quad \eta_{\text{SO}_2} = 1 - \exp\left[0,07 \Delta T^{0,3} \left(\frac{\text{Ca}}{\text{S}} k_{\text{rec}}\right)^{0,4}\right] \quad (3)$$

Zakres stosowalności równania (3):

$$\Delta T = 45 \div 250 \text{ K}, \quad k_{\text{rec}} = 5 \div 100, \quad \text{Ca/S} = 1,0 \div 1,25 \text{ mol/mol} \\ \text{Błąd korelacji } \delta = \pm 5\%$$

Opisane powyżej badania posłużyły do zaprojektowania przemysłowej instalacji odsiarczania spalin z reaktorem pneumatycznym w ZEC Łódź o wydajności 550 000 nm^3/h . Projekt zakładał zastosowanie reaktora pneumatycznego o kształcie cylindrycznym poprzedzonego przewężeniem w formie zwężki Venturiego mającej na celu wyrównanie profilu prędkości.

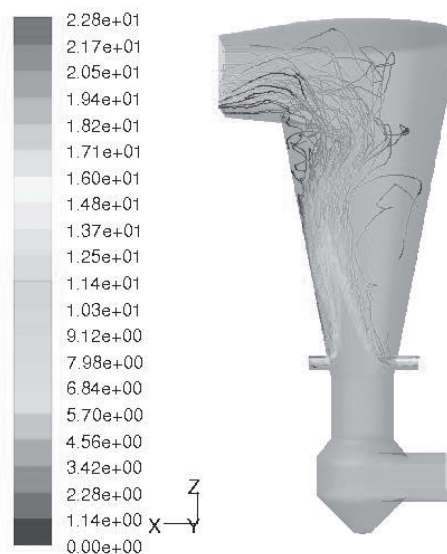
Zrealizowany reaktor pneumatyczny o geometrii jw. umożliwił uzyskanie zakładanych parametrów procesowych, jednak w trakcie długotrwałej eksploatacji wykazywał pewne niedogodności związane z nierównomiernym profilem prędkości. Dodatkowo przy mniejszych obciążeniach występowały skłonności do tworzenia na ściankach reaktora nawisów produktów odsiarczania.

W celu rozszerzenia możliwości aplikacyjnych oraz wyeliminowania opisanych niedogodności rozpoczęto poszukiwania mające na celu, w oparciu o dotychczas posiadane doświadczenia, opracowanie nowej konstrukcji reaktora. Dodatkowym celem opracowania nowej konstrukcji reaktora było uzyskanie wyższych efektywności procesu odsiarczania oraz ograniczenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych instalacji odsiarczania. W celu określenia optymalnego kształtu reaktora przeprowadzone zostały dodatkowe badania laboratoryjne. Pozwoliły one na określenie geometrii reaktora umożliwiającego wytworzenie odpowiedniej dla procesu odsiarczania koncentracji sorbentu w całej objętości reaktora.

Istota rozwiązania polegała na tym, że poprzez odpowiednie ukształtowanie geometrii reaktora w formie odwróconego stożka ściętego, uzyskano odpowiednie ukierunkowanie przepływu spalin wlotowych w sposób umożliwiający wyrównanie profilu prędkości oraz uzyskanie wewnętrznej cyrkulacji sorbentu w obrębie reaktora. Wewnętrzna cyrkulacja transportowanego aerozolu generowana jest w osi pionowej reaktora w szerokim zakresie zmienności przepływu spalin. Położenie wiru wewnętrznej cyrkulacji jest związane ze specyficzną ściśle określoną geometrią kształtu aparatu. Dodatkowo, duże szybkości spalin w warstwie przyściennej nie pozwalają na tworzenie się nawisów i narostów oraz powodują samooczyszczanie się ścian reaktora. Rozwiązanie to przyczynia się do zmniejszenia koncentracji pyłu w odprowadzonych spalinach, przez co możliwe jest stosowanie odpylaczy o mniejszych gabarytach lub zwiększenie stężenia reagentów w reaktorze.

Obliczenia CFD wykorzystano do symulacji przepływu oraz jako narzędzie ilustrujące proces powiększania skali. Ostatecznie w oparciu o te obliczenia RAFAKO S.A. zdecydowało się na wdrożenie badanego reaktora, co zaowocowało trzema wdrożeniami. Uzyskiwany w praktyce efekt odsiarczania tej technologii jest lepszy niż uzyskany w trakcie badań laboratoryjnych oraz w wyniku obliczeń CFD. Aktualnie prowadzone są szczegółowe badania na eksploatowanych obiektach rzeczywistych zmierzające do walidacji posiadanych modeli oraz rozszerzenia

zastosowań analizowanego reaktora o technologii oczyszczania spalin ze spalarni odpadów.



Rys. 3. Trajektorie i prędkości cząstek sorbentu $d_{p3} = 70 \mu\text{m}$

Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowane w pracy wybrane przykłady zastosowań oprogramowania CFD nie wyczerpują licznych jego możliwości. Prezentowane przykłady mają charakter użytkowy i przyczyniły się do zmniejszenia nakładów inwestycyjnych wdrażanych lub modernizowanych technologii i/lub ograniczenia kosztów eksploatacyjnych.

Obliczenia CFD w stosunku do badań rzeczywistych umożliwiają znaczne szybsze uzyskanie wyników. Należy jednak zauważyć, że nie mogą one zastąpić rzeczywistych badań, które są nieodzowne i powinny służyć do walidacji uzyskiwanych wyników obliczeń.

Opisywane modele opracowane w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych lub odwzorowujące geometrię zaprojektowanych aparatów, walidowane później wynikami pomiarów homologacyjnych z rzeczywistych obiektów stanowią doskonałe narzędzie do projektowania i optymalizacji aplikowanych urządzeń i aparatów.

Znajomość pól prędkości umożliwiła ocenę procesów zachodzących w maszynach, aparatach i urządzeniach do wymiany ciepła i masy oraz ich optymalizację, realizowaną realizowaną zwykle poprzez zmianę geometrii lub hydrauliki przepływu.

Oznaczenia

- a – powierzchnia właściwa dyspersji kropeł, [m^2/m^3]
- k_A – współczynnik przenikania masy, [$\text{kmol}/\text{m}^2\text{s}$]
- n_A – natężenie przepływu, [$\text{kmol}/\text{m}^2\text{s}$]
- H_{abs} – wysokość strefy absorpcji, [m]
- p – ciśnienie statyczne w absorberze, [Pa]
- η – skuteczność odsiarczania, [-]
- Ca/S – stosunek molowy reagentów odniesiony do całego strumienia SO_2 w spalinach, [mol/mol]
- ΔT – różnica temperatur między końcową temperaturą spalin i temperaturą adiabatywnego nasycenia spalin, [K]
- c_{HCl} – początkowe stężenie HCl w spalinach, [mg/nm^3]

LITERATURA

- [1] M. Głomba, J. Mazurek, S. Krahl: Badania nad modelem odsiarczania spalin – rozwój modelu obliczeniowego. VII Konferencja Usuwanie szkodliwych substancji gazowych ze spalin kotłowych, s. 121, Słok 2010.
- [2] W. Mokrosz: Inż. Chem. Proc. 25, 1327 (2004).
- [3] Fluent 6.3 dokumentacja.