

Wojciech MOKROSZ

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 technologię 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 bilans 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.

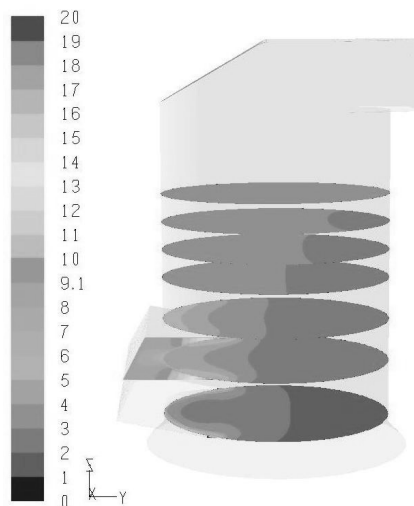
Sprawność procesu absorpcji SO_2 wyrażono równaniem [1] w postaci:

$$\eta_{SO_2} = 1 - \exp\left(-\frac{\beta_{Ag} \cdot a \cdot p \cdot H_{abs}}{n_g}\right) \quad (1)$$

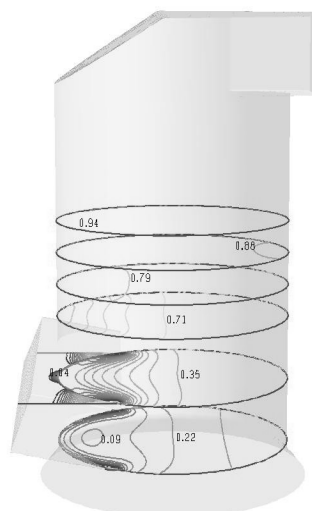
Obowiązującym przy założeniu idealnej dystrybucji monodispersyjnych kropeł, wyrównanym profilu pola prędkości, niskich stężeń dwutlenku siarki oraz spełnieniu warunku zaniku oporów wnikania masy w fazie ciekłej.

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 pól prędkości oraz rozkład pól stężeń ditlenku siarki w absorberze.



Rys. 1. Rozkład profilu prędkości w absorberze.



Rys. 2. Rozkład stężenia w absorberze

Modelowanie CFD reaktora pneumatycznego stosowanego w technologii półsuchej.

Model poniżej prezentowanego reaktora opracowano na podstawie badań laboratoryjnych prowadzonych w mikro skali 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 odsiarczenia.

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

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

Zakres stosowalności równania (2):

$$\Delta T = 10 \div 45 \text{ K}, \quad a = 10 \div 21 \text{ m}^2/\text{g}, \quad x_{\text{HCl}} = 1 \div 250 \text{ ppm},$$

$$k_{\text{rec}} = 5 \div 100, \quad \text{Ca/S} = 1,0 \div 1,25 \text{ mol/mol}$$

$$\text{Błąd korelacji } \delta = \pm 15\%$$

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

Zakres stosowalności równania (3):

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

$$\text{Błąd korelacji } \delta = \pm 5\%$$

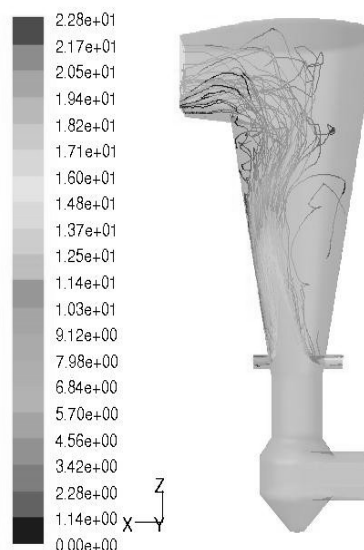
Opisane powyżej badania posłużyły do zaprojektowania przemysłowej instalacji odsiarczenia spalin z reaktorem pneumatycznym w ZEC Łódź o wydajności $550\,000 \text{ nm}^3/\text{h}$. Projekt zakładał zastosowanie reaktora pneumatycznego o kształcie cylindrycznym poprzedzonego przewężeniem w formie zwężki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

Zrealizowany reaktor pneumatyczny o geometrii j.w. 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 odsiarczenia.

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 odsiarczenia oraz ograniczenie kosztów inwestycyjnych, i eksploatacyjnych instalacji odsiarczenia. W celu określenia optymalnego kształtu reaktora, przeprowadzone zostały dodatkowe badania laboratoryjne. Pozwoliły one na określenie geometrii reaktora umożliwiającego wytworzenie odpowiedniej dla procesu odsiarczenia koncentracji sorbentu w całej objętości reaktora.

Istotą 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.^[1] Uzyskiwany w praktyce efekt odsiarczenia tej technologii jest lepszy niż uzyskany w trakcie badań laboratoryjnych oraz w wyniku obliczeń CFD. Aktualnie prowadzone są szczegółowe badania na eksplo^[2] atowanych obiektach rzeczywistych mierzące do walidacji posiadanych modeli oraz rozszerzenia zastosowań analizowanego reaktora o technologie oczyszczania spalin ze spalarni odpadów.^[3]



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

Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowane w referacie wybrane przykłady zastosowań oprogramowania CFD nie wyczerpują licznych możliwości ich zastosowań. Wszystkie prezentowane przykłady posiadają charakter użyteczny 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 rozkładu pól prędkości umożliwia ocenę zachodzących w maszynach, aparatach i urządzeniach procesów wymiany ciepła i masy oraz ich optymalizację realizowaną zwykle poprzez zmianę geometrii lub hydrauliki przepływu.

Oznaczenia - symbols

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 odsiarczenia	
Ca/S	- stosunek molowy reagentów odniesiony do całego strumienia SO_2 w spalinach	mol/mol
Δt	- różnica temperatur pomiędzy końcową temperaturą spalin i temperaturą adiabatyicznego nasycenia spalin	K
C_{HCl}	- początkowe stężenia HCl w spalinach	mg/nm^3

Literatura

- [1] M. Głomba, J. Mazurek, S. Krahl: Badania nad modelem odsiarczenia spalin – rozwój modelu obliczeniowego. VII Konferencja Usuwanie szkodliwych substancji gazowych ze spalin kotłowych. Słok 2010., 121
- [2] W. Mokrosz, Odsiarczenie spalin w reaktorze pneumatycznym z recyrkulacją sorbentu. Weryfikacja modelu. Inż. Chem. Proc. 2004, 25, 1327
- [3] Fluent 6.3 documentation.

Streszczenie:

W referacie zaprezentowano możliwości wykorzystania narzędzi CAD/CAM w procesach powiększania skali oraz optymalizacji wdrożonych w energetyce instalacji odsiarczania spalin. Na przykładach mokrej i półsuchej technologii odsiarczania spalin omówiono proces powiększania skali począwszy od badań laboratoryjnych poprzez półtechnikę do wdrożenia i badań homologacyjnych. Wskazano sposoby i możliwości wykorzystania narzędzi CAD/CAM do powiększania skali oraz optymalizacji procesów oczyszczania spalin.

słowa kluczowe: obliczenia CFD, instalacje oczyszczania spalin

The use of CFD modelling at the scale-up procedure of flue gases desulphurisation process, based on examples of selected plants installed in power industry**Abstract::**

The paper presents the possibilities of CAD/CAM tools application for the scale-up and optimisation procedures in case of selected plants for flue gases desulphurisation, installed in power industry. Based on wet and semi-dry technologies of flue gases desulphurisation a scale-up procedure is described, starting from laboratory research, through a pilot plant scale research to implementation and certification of the plant. The ways and possible application of CAD/CAM tools for scale-up and optimisation of flue gases desulphurisation process are described.

keywords: CFD modelling, flue gas desulphurisation plant