

Bogumiła WRZESIŃSKA¹, Roman KRZYWDA², Tomasz WĄSOWSKI¹

e-mail: bogumiła.wrzesinska@pw.edu.pl

¹ Katedra Inżynierii Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa² Zakład Procesów Rozdzielania, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Analiza rozkładów wielkości kropeł generowanych przez rozpylacze stosowane w technologii odazotowania spalin

Wstęp

Konieczność ograniczenia emisji szkodliwych tlenków azotu jest dużym wyzwaniem dla polskiego sektora energetycznego [Wrzesińska i n., 2015]. Niezbędna jest modyfikacja istniejących źródeł zanieczyszczeń, w celu ich dostosowania do nowych standardów emisji. Jedną z metod obniżenia stężenia NO_x w spalinach jest wykorzystanie systemu selektywnej niekatalitycznej redukcji tlenków azotu SNCR (*Selective Non-Catalytic Reduction*). Metoda ta pozwala na redukcję emisji nawet do 60% przy niewielkiej ingerencji w strukturę kotła

Skuteczność technologii SNCR zależy od wielu parametrów, m.in.: stosowanego reduktora, jego miejsca i sposobu dozowania do komory spalania kotła. Jako reduktory stosowane są przede wszystkim wodne roztwory mocznika lub amoniaku. Rozwiązania konstrukcyjne rozpylaczy wykorzystywanych w metodzie SNCR muszą zapewnić iniekcję reagenta w wąskie okno temperaturowe kotła, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów takich jak: wielkość i prędkość kropeł, obszar i kąt rozpylenia oraz równomierność dystrybucji. Ze względu na wymagania procesowe, do dozowania reagenta stosowane są rozpylacze pneumatyczne, które zapewniają odpowiedni rozmiar i energię kinetyczną kropeł.

Prace doświadczalne miały na celu wyznaczenie podstawowych parametrów jakości rozpylenia, mających zasadniczy wpływ na redukcję tlenków azotu w komorze rzeczywistych kotłów energetycznych. Parametry te były niezbędne do kolejnego etapu projektu, w którym otrzymane wyniki laboratoryjne implementowano do modelowania, z wykorzystaniem oprogramowania CFD, zjawisk zachodzących podczas procesu SNCR w kotłach energetycznych.

Jakość rozpylenia

Jakość rozpylenia cieczy zależy od wielkości możliwych do kontrolowania tj. geometria i wymiary rozpylacza, rodzaj cieczy, jak również od wielkości niekontrolowanych tj. zakłócenia, drgania, turbulencja cieczy. Uzyskane krople tworzą zbiór statystyczny, charakteryzowany przez stopień i jednorodność rozpylenia.

Stopień rozpylenia jest definiowany przez średnią średnicę kropeł. W zależności od sposobu obliczania, średnia średnica kropeł określana jest jako arytmetyczna, powierzchniowa lub objętościowa. Parametrem najczęściej stosowanym w analizie procesów wymiany masy i ciepła jest średnia średnica objętościowo-powierzchniowa d_{32} (średnica *Sautera*)

$$d_{32} = SMD = \frac{\sum d^3 \Delta N}{\sum d^2 \Delta N} \quad (1)$$

gdzie: ΔN – udział ilościowy kropeł o średnicy d .

W praktyce korzysta się również ze średnicy: modalnej d_m , mediany $d_v(50)$ oraz $d_v(10)$, $d_v(90)$, które odpowiadają średnicy kropeł, których zawartość objętościowa w zbiorze kropeł jest równa odpowiednio 10% i 90%.

Jednorodność rozpylenia jest opisywana przez funkcję rozkładu ilościowego lub rozkładu sumarycznego (dystrybuantę) kropeł. Najczęściej stosowane są równania rozkładu logarytmiczno-normalnego, *Rosina-Rammlera*, *Nukiyamy-Tanasawy* [Orzechowski 2008]. Równanie *Rosina-Rammlera* opisuje sumaryczny rozkład objętości kropeł:

$$Y_3(d) = (1 - \Phi_3(d)) = \exp\left[-\left(\frac{d}{d_{RR}}\right)^n\right] \quad (2)$$

gdzie: d_{RR} jest parametrem rozmiaru średnic, a wykładnik n jest parametrem rozkładu średnic (jednorodności rozpylenia). Im większy jest parametr n , tym rozkład jest bardziej jednorodny. Wartość $Y_3(d)$ oznacza udział objętościowy kropeł o średnicach większych od d , a wartość $\Phi_3(d)$ udział objętościowy kropeł o średnicach mniejszych od d . Parametr d_{RR} określa taką średnicę kropeł, dla której $\Phi_3(d) = 0,632$. Oznacza to, że 63,2% objętości składa się z kropeł o średnicy mniejszej od d_{RR} , a 36,8% o średnicy większej od d_{RR} .

Aby wyznaczyć wartości parametrów d_{RR} oraz n należy powyższe równanie zlinearyzować. Wówczas w układzie współrzędnych $\{\ln(d); \ln[\ln(Y_3(d)^{-1})]\}$ otrzymuje się równanie linii prostej o nachyleniu n i wartości odciętej $n \ln(d_{RR})$:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{Y_3(d)}\right) = n \ln(d) - n \ln(d_{RR}) \quad (3)$$

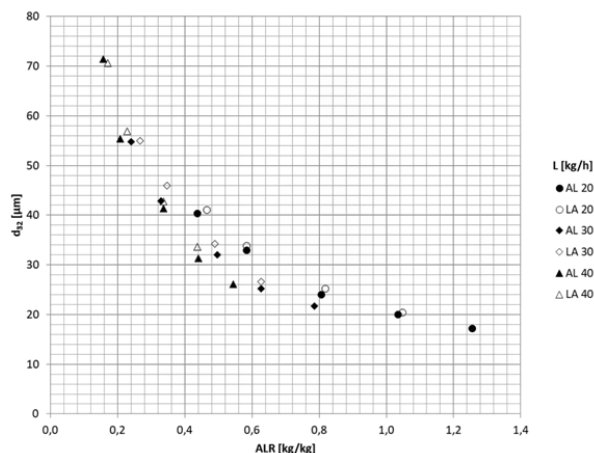
Badania doświadczalne

Aparatura. Badania rozkładów wielkości kropeł generowanych przez dysze (lance) przeprowadzono w specjalnie przygotowanej komorze, symulującej wycinek przestrzeni kotła energetycznego o mocy 29 MW. Korzystano z tzw. metody cieczy immersyjnej MCI oraz urządzenia *Spraytec* firmy *Malvern* wykorzystującego zjawisko dyfrakcji laserowej w celu analizy aerozolu w czasie rzeczywistym. Pomiaru wykonano dla różnych konstrukcji pneumatycznych lanc rozpylających, przy dwóch konfiguracjach zasilania i zmiennych parametrach procesowych. Szczegóły metodyki pomiarowej zamieszczono w pracach [Krzywda i in. 2016; Krawczyk i in. 2016].

Rozpylacz pneumatyczny stosowany w badaniach miał budowę modułową, stąd możliwe było utworzenie kilkudziesięciu konfiguracji lanc różniących się geometrią [Krawczyk i in. 2016].

Wyniki

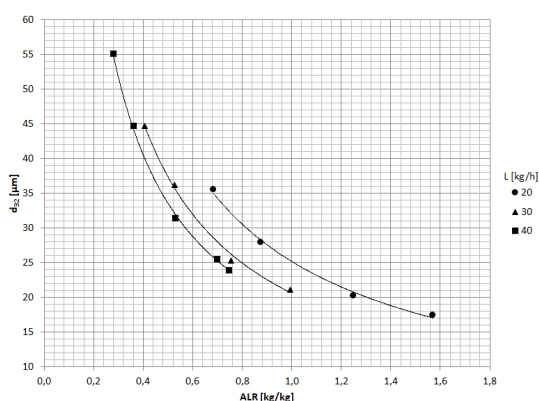
Na rys. 1 porównano średnie średnice kropeł d_{32} w funkcji parametru ALR , definiowanego jako stosunek strumieni masowych gazu do cieczy, dla dwóch konfiguracji przepływów: cieczy dozowanej do strumienia gazu (LA) i gazu dozowanego do cieczy (AL).



Rys. 1. Porównanie średniej średnicy kropeł dla dwóch konfiguracji przepływów: LA - ciecz dozowana do gazu (znaczniki puste) i AL - gaz dozowany do cieczy (znaczniki pełne)

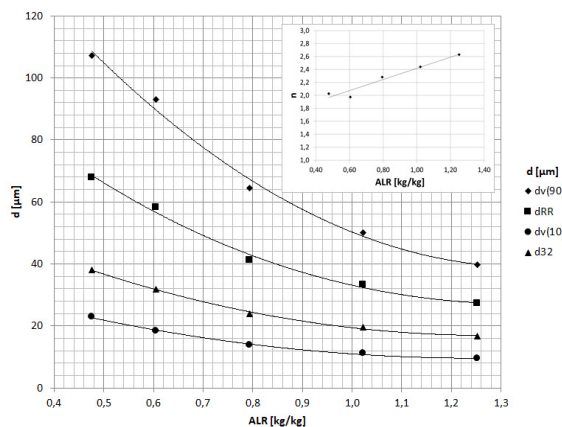
Z porównania średnic kropeł uzyskanych dla takiej samej konstrukcji lancy wynika, że praktycznie nie występują różnice wartości d_{32} przy zachowaniu tych samych przepływów cieczy i gazu. Stwierdzono minimalnie większe wartości dla konfiguracji LA, z tym że różnice są rzędu $1 \div 2 \mu\text{m}$. W badaniach doświadczalnych stwierdzono natomiast, że dla konfiguracji przepływów AL w wielu przypadkach występują pulsacje strugi kropeł, zwłaszcza przy dużych przepływach mediów oraz małych średnicach dyszy wylotowej i otworów w rurze wewnętrznej, którymi dozowano gaz. Stąd też wynika, że zakres regulacyjny lancy w przypadku konfiguracji AL jest znacznie mniejszy niż konfiguracji LA. Do badań aplikacyjnych wybrano system zasilania typu LA.

Spośród parametrów konstrukcyjnych i procesowych największy wpływ na średnią średnicę kropeł oraz rozkład ich wielkości mają natężenia przepływu cieczy i gazu. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wykresy pokazujące wpływ natężeń przepływu cieczy i gazu na średnicę kropeł d_{32} .



Rys. 2. Zależność średniej średnicy kropeł d_{32} od ALR dla różnych przepływów cieczy L

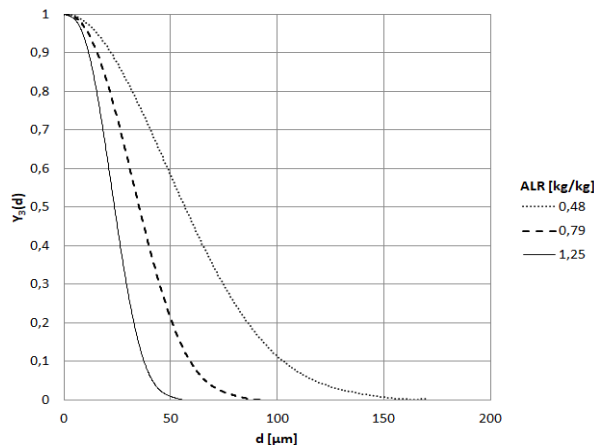
Średnia średnica kropeł malała zarówno ze wzrostem natężenia przepływu cieczy i gazu, jak i ich wzajemnego stosunku określonego jako ALR. Niezależnie od przepływów cieczy i gazu zależność średnicy kropeł od wartości ALR ma podobny charakter (krzywe mają zbliżony kształt).



Rys. 3. Porównanie charakterystycznych średnic kropeł i wykładnika n

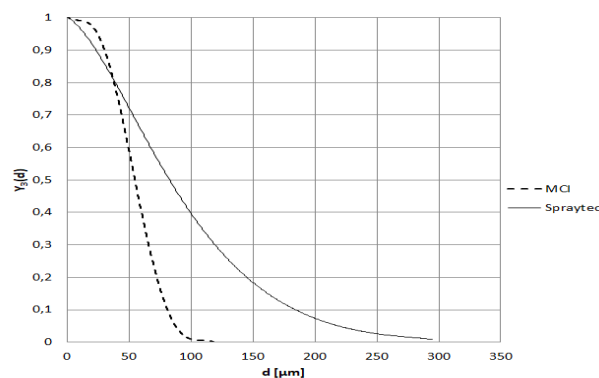
Na rys. 3 przedstawiono charakterystyczne średnice kropeł generowanych przez rozpylacz o tej samej konstrukcji i wymiarach geometrycznych. Dodatkowo pokazano wartości wykładnika n . Natomiast na rys. 4 zaprezentowano przykładowe krzywe rozkładu *Rosina-Rammlera*.

Z przedstawionych na rys. 3 i 4 rozkładów wielkości kropeł wynika, że natężenia przepływów mediów w rozpylaczu znacząco wpływają na widmo rozpylenia. Ze wzrostem ALR rozkład staje się bardziej jednorodny, co przejawia się większym nachyleniem krzywej rozkładu i większą wartością parametru n . Wszystkie przedstawione wyżej wyniki uzyskano za pomocą urządzenia *Spraytec*.



Rys. 4. Sumaryczne rozkłady objętości kropeł

W badaniach stwierdzono również znaczący wpływ metody pomiarowej na uzyskane rozkłady średnic kropeł. Metoda wylapywania kropeł na warstwę cieczy immersyjnej jest z założenia znacznie mniej precyzyjna od dyfrakcji laserowej. Mierzone tą metodą wielkości kropeł nie obejmują całego spektrum średnic (Rys. 5). Mimo to jest to metoda przydatna np. do badań porównawczych, ze względu na prostotę, dostępność i niską cenę.



Rys. 5. Porównanie rozkładów wielkości kropeł uzyskane metodami cieczy immersyjnej MCI i dyfrakcji laserowej (*Spraytec*)

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzono badania eksperymentalne jakości rozpylenia cieczy przez rozpylacze pneumatyczne stosowane w technologii SNCR, mającej dominujący wpływ na sprawność redukcji tlenków azotu.

Kluczowym parametrem decydującym o stopniu i jednorodności rozpylenia są natężenia strumieni obu mediów i ich wzajemny stosunek ALR. Ze wzrostem ALR otrzymano krople o mniejszych średnicach i bardziej jednorodnym rozkładzie.

LITERATURA

- Krawczyk P., Badyda K., Młynarz S., (2016). Effect of air to water ratio on the performance of internal mixing two-fluid atomizer. *Chem. Proc. Eng.*, 37(4), 461-471. DOI: 10/1515/cpe-2016-0038
- Krzywda R., Wrzesińska B., Wąsowski T., (2016). Badania lancy rozpylających przeznaczonych do niekatalizacyjnej redukcji tlenków azotu (SNCR) w kotłach o małej mocy. *Chemik*, 70, 10, 605-610
- Orzechowski Z., Prywer J., (2008). *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*. WNT, Warszawa
- Wrzesińska B., Krzywda R., Wąsowski T., Krawczyk P., Badyda K., (2015). Technologia selektywnej niekatalizacyjnej redukcji tlenków azotu pod kątem zastosowania jej w kotłach dla energetyki przemysłowej i ciepłownictwa. *Przem. Chem.*, 94, 608-613. DOI: 10.15199/62.2015.4.22

Praca wykonana w ramach projektu POIG.01.03.01-14-035/12. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.