

REDUKCJA TLENKÓW AZOTU ORAZ OPTIMALIZACJA SPALANIA W KOMORACH KOTŁÓW ZA POMOCĄ ASYMETRYCZNEGO SYSTEMU PODAWANIA POWIETRZA WTÓRNEGO

Autorstwo Robert Żmuda

Streszczenie. Stopniowanie powietrza spalania w połączeniu z palnikami tzw. niskoemisyjnymi jest sprawdzoną i stosowaną metodą organizacji procesu spalania w kotłach energetycznych. Celem jest ograniczenie formowania się tlenków azotu w trakcie procesu spalania. Metoda ta jest realizowana za pomocą różnych systemów różniących się między sobą przede wszystkim ilością oraz rozmieszczeniem dysz powietrza wtórnego w odniesieniu do palników. Tego typu systemy często są łączone z techniką stopniowania paliwa lub reburningu. Niezależnie od konstrukcji wszystkie tego rodzaju systemy mają ograniczone możliwości redukcji NO_x, a ich przekroczenie powoduje zakłócenie procesu spalania oraz pracy kotła objawiające się znanymi z eksploatacji efektami negatywnymi. Efekty te to: korozja niskotlenowa ekranów kotłów, wzrost zawartości węgla w popiele lotnym oraz wzrost zawartości CO w spalinach. Celem eliminacji tych efektów ubocznych a jednocześnie celem maksymalnego ograniczenia formowania się tlenków azotu opracowano system podawania powietrza wtórnego za pomocą niesymetrycznie rozmieszczonych na ścianach komory paleniskowej wysokoprędkościowych dysz. Proponowany system pozwala na znacznie głębszy podział powietrza spalania pomiędzy powietrze pierwotne i wtórne, a więc bardziej efektywne ograniczenie formowania się tlenków azotu. W przeciwieństwie jednak do tradycyjnych systemów eliminuje zasadniczo wyżej wspomniane efekty negatywne, jak na przykład korozja niskotlenowa.

1 WSTĘP

Modernizacjom kotłów energetycznych zmierzającym do ograniczenia tworzenia się tlenków azotu już w trakcie procesu spalania towarzyszą bardzo często uciążliwe dla użytkownika kotła zjawiska korozji, szlakowania oraz wzrostu części palnych w popiele lotnym [1,2]. Zastosowanie stopniowania powietrza spalania zmierzające do ograniczenia procesu utleniania azotu zawartego w paliwie wymaga stosowania warunków silnie redukujących w pierwszej strefie spalania a następnie utleniających w strefie spalania wtórnego [3]. Optymalny rozkład koncentracji tlenu oraz temperatury wynikający z mechanizmu niskoemisyjnego procesu spalania jest bardzo trudny do uzyskania w dużych komorach kotłów. Jest to przede wszystkim wynikiem braku wystarczająco efektywnej metody kontroli procesów mieszania zachodzących w komorze spalania kotła. Brak tej kontroli jest szczególnie widoczny w przypadku zmiennej wydajności kotła oraz w przypadku stosowania spalania tzw. niskoemisyjnego mającego na celu ograniczenie formowania się tlenków azotu (stopniowanie powietrza spalania, redukcja temperatury, recyrkulacja spalin) lub mających na celu zniszczenie powstałych wcześniej tlenków azotu wewnątrz komory spalania (redukcja amoniakiem, reburning).

Zastosowanie jednej z tych metod czy ich kombinacji prowadzi do bardzo złożonego pola przepływu spalin, które należy kontrolować niezależnie od wydajności kotła, aby uzyskać pożądaną efekt, to znaczy niskoemisyjne spalanie i prawidłową pracę kotła. Wydaje się więc oczywiste, że rozwojowi niskoemisyjnych technik spalania czy też technik destrukcji zanieczyszczeń wewnątrz komory spalania za pomocą związków chemicznych lub sorbentów towarzyszy wzrost wiedzy oraz rozwój technologii mających na celu efektywną kontrolę aerodynamiki komory spalania.

Niniejsze opracowanie przedstawia zasady nowej organizacji procesu spalania polegającego na wprowadzeniu całej objętości strefy spalania w intensywny rotacyjny ruch. Ruch ten jest wymuszony przez szereg wysokoprędkościowych dysz powietrza wtórnego zlokalizowanych na ścianach w górnej części komory spalania. Rotacyjny ruch umożliwia intensywną wewnętrzną recyrkulację spalin a w efekcie również bardzo dobre mieszanie pomiędzy powietrzem wtórnym a głównym strumieniem spalin. Efektem jest wzrost objętości strefy spalania oraz bardziej równomierny rozkład koncentracji tlenu w całej objętości komory. Przedstawiony w pracy nowy sposób mieszania zapewnia lepszą kontrolę procesu stopniowania powietrza a w efekcie również redukcję tlenków azotu, a szczególnie tlenków azotu, których źródłem jest azot zawarty w paliwie. Nowy sposób organizacji aerodynamiki komory spalania umożliwia optymalną realizację procesu spalania niezależnie od wydajności kotła i paliwa. Uzyskane wyniki eksploatacyjne potwierdzają, że kotły wyposażone w tego typu system spalania charakteryzują się:

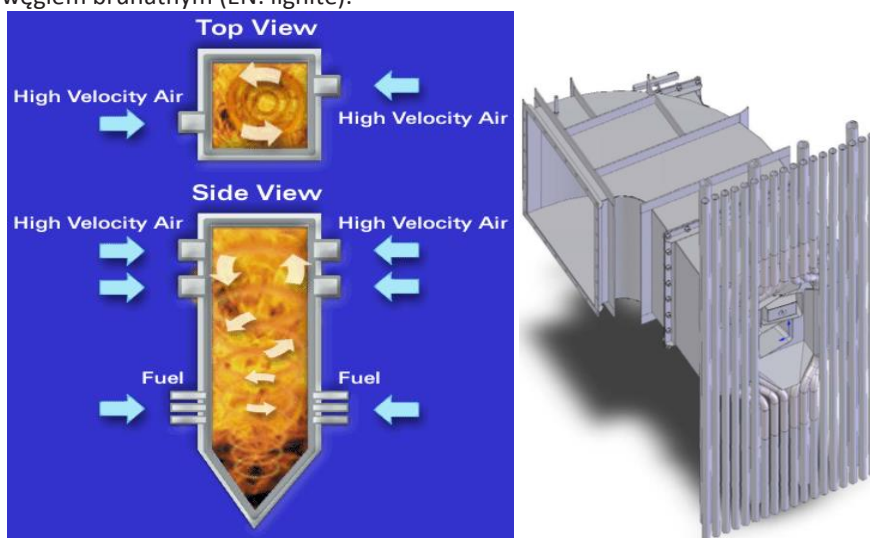
- niskimi emisjami tlenków azotu,

- bardziej równomiernym rozkładem strumienia ciepła w komorze paleniskowej, co powoduje wydłużenie czasu eksploatacji kotła,
- bardziej stabilną pracą komory spalania, nawet w przypadku nierównomiernego podawania mieszanki pyłowo-powietrznej lub zmian jakościowych paliwa,
- stabilnymi parametrami produkowanego czynnika,
- eliminacją negatywnych efektów ubocznych takich jak korozja niskotlenowa, zawartość węgla w popiele czy wzrost CO,
- wzrostem sprawności spalania i kotła.

Nowy sposób organizacji procesu spalania pod nazwą ROFA został zastosowany w różnych typach kotłów (energetyczne, ciepłownicze i przemysłowe), wyposażonych w różne technologie spalania (pyłowe, rusztowe i fluidalne) oraz opalanych paliwami stałymi, ciekłymi, gazowymi, jak również odpadami komunalnymi i biomasą [5–12]. W przypadku kotłów pyłowych omawiany system został zainstalowany z powodzeniem zarówno w kotłach z palnikami naściennymi jak i z palnikami narożnikowymi, mieszczących się w zakresie mocy od 40 do 600 MW_{el}.

2 ROTACYJNY SYSTEM ROFA (ROTATING OPPOSED FIRED AIR)

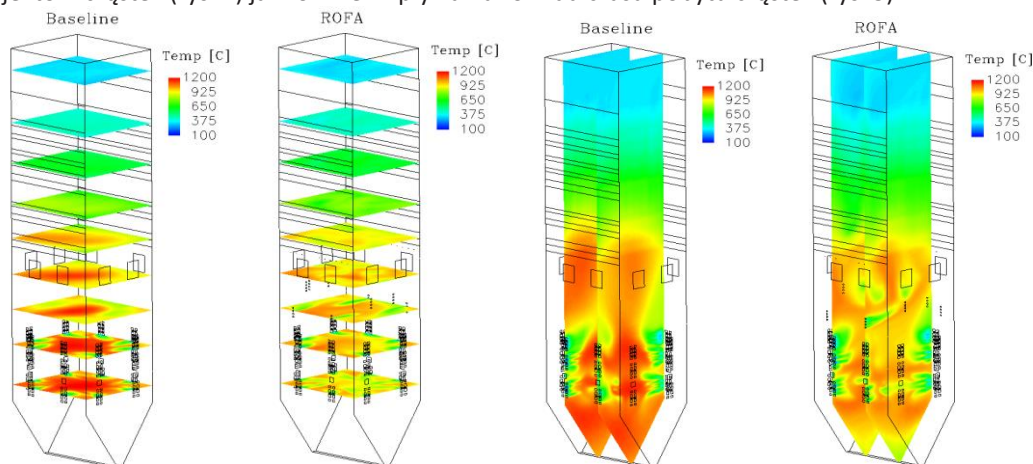
ROFA jest opatentowanym systemem doprowadzania powietrza wtórnego do procesu spalania za pomocą wysokoprędkościowych dysz (rys. 1), niesymetrycznie rozmieszczonych na ścianach komory paleniskowej. W przypadku systemu ROFA, cały strumień spalin wewnątrz komory paleniskowej zostaje wprowadzony w ruch rotacyjny. System pozwala na znacznie głębszy podział powietrza spalania pomiędzy powietrze pierwotne a powietrze wtórne, co ogranicza tworzenie się tlenków azotu powstających na skutek utleniania azotu zawartego w paliwie. W typowym systemie dysz OFA ilość powietrza pierwotnego nie może być niższa niż 90–95% powietrza potrzebnego do spalania. Obniżenie nadmiaru powietrza w pierwszej strefie spalania jest w tym przypadku niemożliwe, ponieważ powoduje korozję niskotlenową ekranów komory spalania oraz wzrost koncentracji CO w spalinach i zawartości części palnych w popiele lotnym tzw. LOI (Loss On Ignition). W przypadku zastosowania systemu ROFA, nie występuje zjawisko korozji niskotlenowej jak również nie następuje zwiększenie emisji CO i wzrost zawartości węgla w popiele lotnym. Ponieważ rotacyjny ruch spalin oddziałuje silnie na proces mieszania również poniżej poziomu lokalizacji systemu ROFA, uzyskuje się równomierny rozkład temperatury, zawartości tlenu i innych składników spalin w całej objętości komory paleniskowej. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład temperatury gazów przed instalacją systemu ROFA oraz po zainstalowaniu systemu ROFA w przypadku kotła z palnikami narożnikowymi opalanym węglem brunatnym (EN: lignite).



Rysunek 1 – Schemat instalacji ROFA (po lewej) oraz skrzynia ROFA z dyszami wysokoprędkościowymi (po prawej)

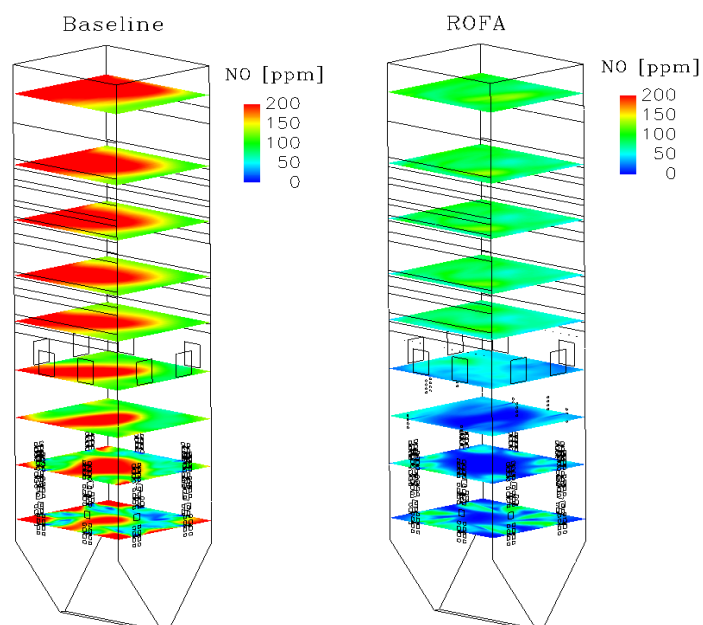
Analiza wyników modelowania numerycznego poparta obserwacjami ruchowymi pozwala stwierdzić, że wprowadzenie rotacyjnego systemu spalania redukuje obecność w objętości komory spalania miejsc o podwyższonej temperaturze tzw. „hot spots” oraz generalnie obniża poziom temperatur wpływając pozytywnie na jego jednorodność. Stwarza to pozytywne warunki do obniżenia ilości

tlenków azotu tworzonych na skutek mechanizmu termicznego. Efektem zastosowania ROFA oraz głębokiego rozdziału powietrza pomiędzy strefę pierwotnego i wtórnego spalania jest ograniczenie formowania się tlenków azotu nie tylko powstających z utleniania azotu zawartego w paliwie ale również ograniczenie utleniania azotu zawartego w powietrzu [4]. Przykład obliczonego rozkładu obszarów formowania się tlenków azotu w kotle węglowym pyłowym z palnikami narożnikowymi przedstawia rysunek 3. Analiza wyników modelowania numerycznego wykazuje, że w wyniku zastosowania ROFA zlikwidowane zostają strefy w narożach kotła przy wylocie paliwa z palników najbardziej odpowiedzialne za formowane się tlenków azotu w pierwszej strefie spalania. Bardziej równomierny rozkład temperatury, niższy jej poziom oraz równomierny rozkład koncentracji tlenu w całej komorze spalania, również w strefie dopalnia pozostałości koksowej, zapewniają niskie emisje NO_x. Rotacyjny system mieszania zwiększa czas pobytu pozostałości koksowej poprzez wydłużenie trajektorii cząstek (rys. 4) jak również wpływa na rozkład czasu pobytu cząstek (rys. 5).

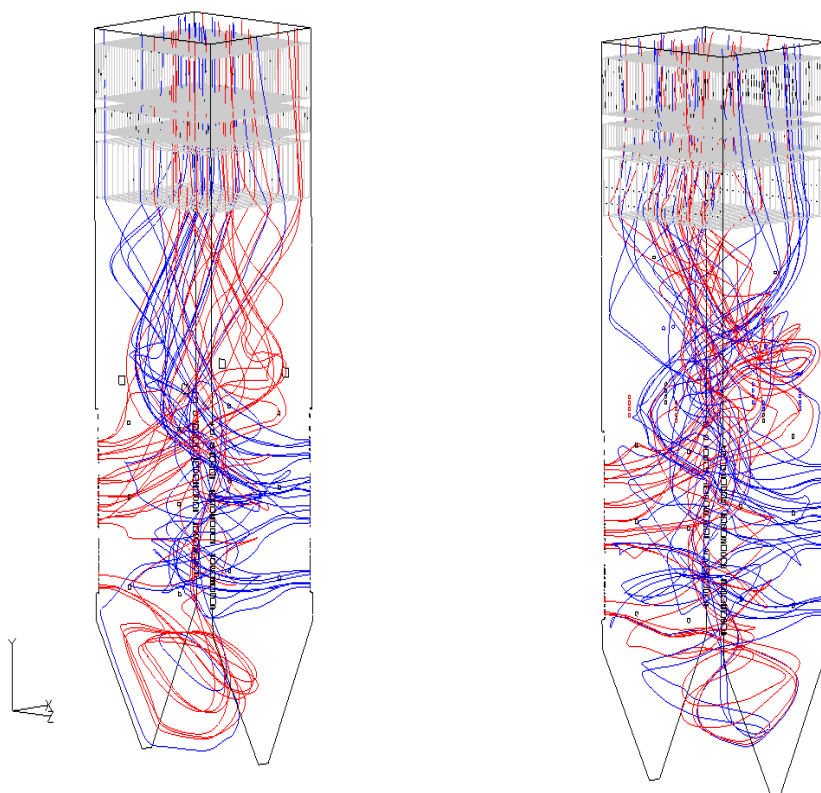


Rysunek 2: rozkład temperatury gazów przed instalacją systemu ROFA oraz po zainstalowaniu systemu ROFA

Wysoce turbulentny przepływ rotacyjny wymuszany przez ROFA zmienia całkowicie pole przepływu spalin w komorze paleniskowej. Tradycyjne pole przepływu spalin w komorze paleniskowej kotłów charakteryzuje się rozwarstwieniem na dwa rodzaje przepływu. W środku komory paleniskowej zwykle istnieje strumień spalin przemieszczających się z dużą prędkością wzdłuż osi pionowej komory paleniskowej. Spaliny oraz cząstki pozostałości koksowej znajdujące się w tej strefie charakteryzują się krótkim czasem pobytu. Strefa ta nazywana jest potocznie strefą przepływu „kominowego”. Poza tą strefą istnieje kilka stref wewnętrznej recyrkulacji spalin. Spaliny oraz cząstki pozostałości koksowej przebywające w strefach recyrkulacji charakteryzują się długim czasem pobytu. Wprowadzenie systemu ROFA likwiduje przepływ „kominowy” oraz strefy recyrkulacji wyrównując i wydłużając jednocześnie czasy pobytu spalin oraz cząstek pozostałości koksowej (rys. 4,5). Proces spalania przebiega w bardziej homogenicznych warunkach w całej strefie spalania. Konsekwencją zmiany pola przepływu jest poprawa i optymalizacja procesu spalania charakteryzująca się obniżeniem całkowitego nadmiaru powietrza spalania oraz redukcją koncentracji CO na wylocie z komory spalania.



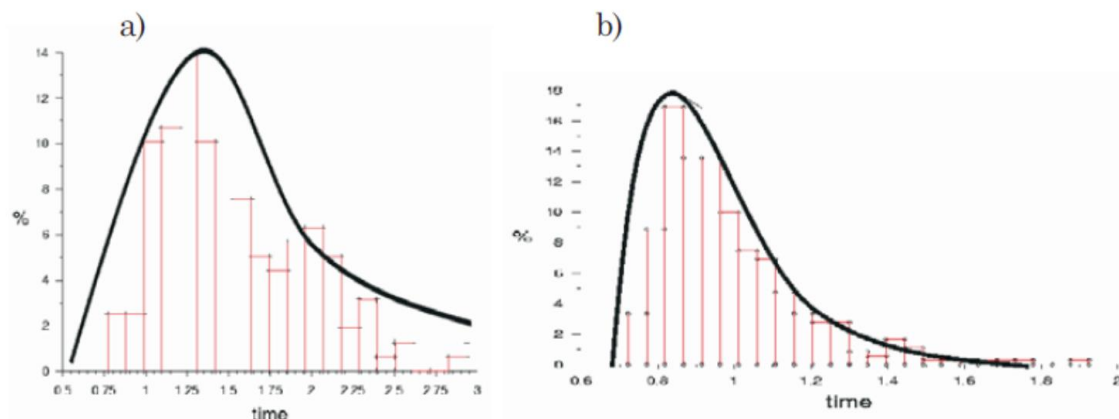
Rysunek 3: rozkład tlenków azotu NOx przed instalacją systemu ROFA oraz po zainstalowaniu systemu ROFA



Rysunek 4: trajektoria cząstek pozostałości koksowej przed i po zainstalowaniu systemu ROFA

Rysunek 6 przedstawia rozkład koncentracji tlenu węgla w komorze spalania kotła z palnikami narożnikowymi opalanego pyłem brunatnym. ROFA powoduje, że na wlocie do części konwekcyjnej kotła poziom CO jest bardzo niski, a rozkład bardzo równomierny. Powoduje to poprawę pracy przegrzewacza pary. W przypadku systemu ROFA na wylocie z podgrzewacza wody, poziom CO nie przekracza 20 ppm w szerokim zakresie obciążeń kotła. Generalnie można również stwierdzić, że często na skutek lepszego mieszania w komorze spalania jest możliwe nieznaczne obniżenie nadmiaru tlenu w komorze paleniskowej co powoduje wzrost sprawności kotła o dodatkowe 0,5–1,5%.

Dodatkowym efektem wytworzenia przez ROFA kontrolowanego niedomiaru tlenu jest efekt obniżenia zawartości SO_3 , co ma szczególne znaczenie w przypadku możliwości wystąpienia osadów w części konwekcyjnej kotła lub w podgrzewaczu powietrza.

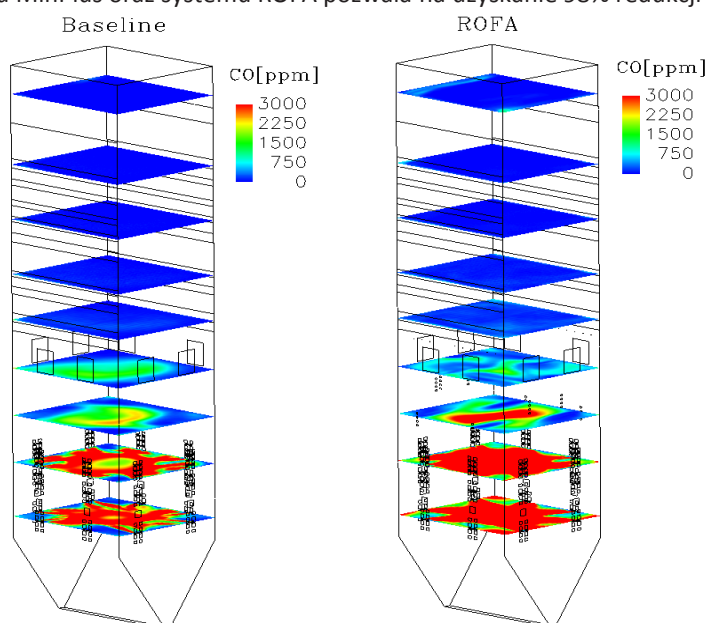


Rysunek 5: Rozkład czasu pobytu przed (b) i po zainstalowaniu (a) systemu ROFA

W przeciwieństwie do tradycyjnych systemów, proponowany system ROFA zapewnia kontrolę procesu mieszania w całej objętości pomiędzy strefą pierwotną a wtórną, tworząc na wyjściu ze strefy ROFA jednorodną mieszaninę spalin o równomiernej temperaturze, koncentracji reagentów oraz zbliżonym czasie pobytu. System ROFA dostarczając znaczną ilość dodatkowej energii kinetycznej, przejmuje kontrolę nad przepływem spalin w objętości komory paleniskowej zmniejszając dynamiczne oddziaływanie pierwszej strefy spalania. W ten sposób uzyskuje się dwa bardzo ważne efekty:

- system ROFA, pracuje efektywnie w całym zakresie pracy kotła,
- system ROFA, stabilizuje przepływ w czasie, redukując fluktuacje pola przepływu oraz koncentracji reagentów.

System ROFA, będąc bardzo efektywnym systemem mieszania tworzy na wylocie z wtórnej strefy spalania, niezależnie od obciążenia kotła, strumień spalin o jednorodnym składzie, temperaturze oraz profilu prędkości. Tak ujednorodniona mieszanina spalin jest przygotowana do wprowadzenia związków chemicznych lub sorbentów w celu dalszej redukcji NO_x , SO_x czy rtęci. Zastosowanie na przykład sorbentu MinPlus oraz systemu ROFA pozwala na uzyskanie 98% redukcji emisji Hg [16].



Rysunek 6: Rozkład tlenku węgla CO przed i po zainstalowaniu systemu ROFA

3 SYSTEM ROTAMIX – SNCR

Technologia ROFA ogranicza tworzenie się tlenków azotu w trakcie procesu spalania. W warunkach przemysłowych całkowita eliminacja tlenków azotu już w trakcie pierwszego etapu procesu spalania nie jest możliwa. Jest to szczególnie trudne przy spalaniu paliw stałych lub ciekłych o dużej zawartości azotu związanego z paliwem. Dlatego konieczny jest drugi stopień redukcji, w którym utworzone w pierwszej strefie spalania tlenki azotu redukowane są za pomocą związków chemicznych amoniaku. Wykorzystuje się tu reakcję amoniaku z tlenkami azotu, w efekcie której tworzy się azot oraz woda. Reakcja przebiega efektywnie w ściśle określonej temperaturze. Optymalna temperatura, zależąca również od substancji chemicznej stosowanej do redukcji, mieści się w granicach 900–1100°C. Typowo stosowane substancje chemiczne to amoniak oraz mocznik. Taki zakres optymalnych temperatur determinuje lokalizację strefy reakcji, która w praktyce usytuowana jest górnej części komory paleniskowej kotła. Reakcja pomiędzy amoniakiem a tlenkami azotu może zachodzić w niższych temperaturach w obecności katalizatora i dlatego w takim przypadku nazywana jest metodą katalitycznej redukcji (SCR – Selective Catalytic Reduction) w przeciwieństwie do poprzedniej metody niekatalitycznej redukcji, SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) [13]. W obu metodach czynnikiem decydującym o ich jakości jest zawartość nieprzereagowanego amoniaku na wyjściu ze strefy reakcji. Poziom emisji amoniaku w przypadku dobrze zaprojektowanego systemu nie powinien przekraczać poziomu 5 ppm. Wyższe emisje są niedopuszczalne ze względu na:

- możliwości wystąpienia korozji elementów znajdujących się na drodze spalin,
- zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła w podgrzewaczu powietrza
- oraz wystąpienia uciążliwego dla otoczenia zapachu.

Jakość metod SNCR ocenia się również na podstawie ilości zużywanego amoniaku lub mocznika. Przy źle pracujących instalacjach ilość zużywanej substancji chemicznej może być nawet o 50–70% wyższa. Jest oczywiste, że w takich przypadkach poziom emisji amoniaku na wyjściu ze strefy redukcji jest znacznie wyższy niż wyżej wspomniane 5 ppm. Innym negatywnym efektem źle pracującej instalacji jest spalanie dostarczanego amoniaku a tym samym wzrost emisji tlenków azotu. Stopień redukcji tlenków azotu, w tak pracującej instalacji, jest bardzo niski przy bardzo dużym ryzyku wystąpienia negatywnych efektów ubocznych. Wysoki stopień redukcji tlenków azotu przy zerowych efektach ubocznych może być osiągnięty tylko wtedy, jeżeli proponowana technologia niezależnie od wydajności kotła gwarantuje:

- właściwy dla stosowanej substancji chemicznej jednakowy poziom temperatury w całej objętości strefy reakcji,
- właściwy czas pobytu reagentów w strefie reakcji.

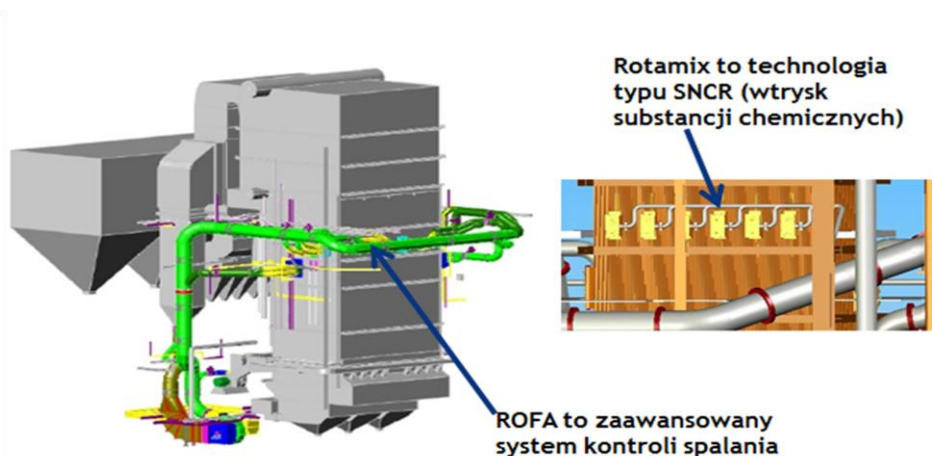
Tylko w przypadku kontroli temperatury w całej objętości strefy reakcji oraz kontroli czasu pobytu możliwe jest zagwarantowanie:

- znacznego ograniczenia ilości tlenków azotu,
- niskiego poziomu (poniżej 5 ppm) nieprzereagowanego amoniaku na wyjściu ze strefy reakcji,
- niskiego zużycia substancji chemicznej.

W przypadku kotłów pyłowych redukcja ilości amoniaku wynosi około 50–65%. W przypadku nowoczesnych kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CFB) oraz z zainstalowanym systemem ROFA redukcja zużycia amoniaku na poziomie 30% jest również możliwa do uzyskania.

4 INSTALACJA PRZEMYSŁOWA ROFA ORAZ ROTAMIX

Przemysłowa instalacja ROFA (rys. 7) składa się z następujących elementów głównych: wentylatora powietrza wtórnego, kanałów powietrza, regulowanych zasuw, dysz powietrza wtórnego oraz systemu automatyki. Wentylator pobiera powietrze przed lub za podgrzewaczem powietrza i dostarcza je pod zwiększonym ciśnieniem do kilku skrzyń powietrznych umieszczonych w określonych miejscach na ścianach kotła. Ilość powietrza wtórnego kierowanego do poszczególnych skrzyń oraz do komory spalania jest kontrolowana i zmienia się zależnie od wydajności kotła. Przepływ powietrza do każdej ze skrzyń jest kontrolowany oraz precyzyjnie regulowany z poziomu systemu DCS kotła. System ROTAMIX zlokalizowany jest w górnej części komory spalania i składa się z następujących elementów głównych: zespołu dysz podających



Rys. 7. Schemat instalacji ROFA oraz ROTAMIX

roztwór amoniaku, systemu mieszania, zbiornika amoniaku, systemu pomp, systemu pomiarowego zawartości amoniaku w spalinach oraz układu regulacji kontrolującego ilość podawanego roztworu w funkcji parametrów pracy kotła.

W przypadku systemu ROFA obniżenie stężenia NO_x nawet powyżej 60% jest osiągnięte. Stosując dodatkowo system ROTAMIX – SNCR możliwe jest uzyskanie całkowitego obniżenia emisji NO_x na poziomie 85%. Zmniejszenie emisji tlenków azotu o 75–85% jest zawsze osiągnięte nawet przy zmiennym obciążeniu kotła (tabl. 1).

Ze względu na kilkakrotnie wyższe koszty metod SCR w porównaniu do metod SNCR [8] jest oczywiste, że istnieje duże zainteresowanie metodami pierwotnymi oraz SNCR, które są w stanie zagwarantować redukcję emisji tlenków azotu do poziomu określonego przez Dyrektywę w tym LCPD oraz IED nie powodując jednocześnie wyżej wspomnianych efektów ubocznych.

Tablica 1

Przykłady redukcji emisji NO_x uzyskanej przy zastosowaniu ROFA oraz ROTAMIX- SNCR

Nazwa obiektu	Obciążenie	Bez MobotecSystem	MobotecSystem		Z MobotecSystem	
		NO _x	ROFA	ROTAMIX	NO _x	Redukcja
	MW _{el}	mg/m _n ³			mg/m _n ³	%
Elektrownia Dynegy Midwest	77	478	X		214	55
	77	478	X	X	82	83
Elektrownia Cape Fear blok 5 Progress Energy	52	573	X		173	70
	154	494	X		222	55
Elektrownia Cape Fear blok 6 Progress Energy	62	626	X	X	115	82
	133	536	X	X	132	75
	174	511	X	X	148	71
Elektrownia (nazwa zastrzeżona)	300	239	X		152	36
	470	363	X		190	48
	540	470	X		210	55

5 PODSUMOWANIE

Zalety ROFA oraz ROTAMIX które zostały udokumentowane w prawie 80 instalacjach w USA, Szwecji w Polsce:

1. Rotacyjny przepływ spalin intensyfikuje proces mieszania w komorze spalania kotła przez co niezależnie od wydajności:

- a) wytwarza bardziej równomierny (brak „hot spots”) rozkład temperatury,
- b) wytwarza bardziej jednorodną mieszaninę spalin, przez co ogranicza formowanie się tlenków azotu „paliwowych” i „termicznych”,
- c) ujednorodnia rozkład strumienia ciepła do ścian komory,
- d) zwiększa czasu pobytu cząstek pozostałości koksowej i spalin w komorze paleniskowej powodując obniżenie zawartości węgla w popiele lotnym oraz zapewnia niższą koncentrację CO na wylocie z komory spalania,
- e) pozwala na zmniejszenie nadmiaru powietrza oraz poprzez realizację spalania bardziej całkowitego i zupełnego zwiększa sprawność spalania oraz kotła,
- f) zmniejsza efekty uboczne jak na przykład korozja niskotlenowa oraz zanieczyszczanie powierzchni ogrzewalnych kotła.

2. Systemy ROFA oraz ROTAMIX-SNCR czy też ROTAMIX-FSI są sprawdzonymi technologiami redukcji NO_x, SO_x oraz Hg do wartości poniżej poziomów definiowanych przez Unię Europejską za pośrednictwem Dyrektyw LCPD (Large Combustion Plant Directive) oraz IED (Industrial Emissions Directive).

3. Nowy sposób organizacji procesu spalania został zastosowany w różnego typu kotłach energetycznych i ciepłowniczych, opalanych węglem, olejem opałowym ciężkim, biomasą czy gazem. Zakres zastosowania wynosił 40–600 MW_{el} w przypadku kotłów energetycznych.

4. Zastosowanie systemu ROFA umożliwia efektywne przeprowadzenie konwersji lub współspalania węgla z biomasą w celu redukcji emisji CO₂ zarówno w kotłach pyłowych czy rusztowych.

5. Zastosowanie ROFA oraz ROTAMIX w kotłach fluidalnych pozwala zmniejszyć zużycie sorbentu, amoniaku oraz ograniczyć erozję.

Literatura

- [1] Davis K.A., Valentine J.R., Eddings E.G., Heap M.P.: Evaluating the Effects of Low-NO_x Retrofits on Carbon in Ash Levels, Mega Symposium: EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium, Atlanta, GA, August 1999.
- [2] Conn R.E., Shan J., Vatsky J.: Low NO_x combustion systems for minimizing NO_x and fly ash LOI: Wall-firing petcoke and T-firing severe slagging coal., 2005 Conference on Unburned Carbon on Utility Fly Ash, NETL, USA, April 13, 2005.
- [3] Pronobis M.: Modernizacja kotłów energetycznych. WNT Warszawa 2002.
- [4] Wilk Ryszard K.: Low-emission combustion. WPS Gliwice 2002.
- [5] Moberg G., Blid J-O., Wallin S., Fareid T., Ralston J.: Combined De-NO_x/DeSO_x and additional NO_x reduction by cleaning flue gas condensate from amonia., PowerGen Internrnational Conference, New Orleans, LA, Nov. 30 – Dec. 2, 1999.
- [6] Haddad E., Ralston J., Green G., Castagnero: Full-Scale Evaluation of a Multi-Pollutant Technology: SO₂, Hg, and NO_x, Combined Power Plant Air Pollutant Control, Mega Symposium, #117 (2003).
- [7] Ralston J., Fessenden J., Green G., Higgins B., Espinosa G., Use of ROFA and Rotamix to Reduce NO_x in a Riley Turbo-Fired Boiler Burning Landfill Gas and Natural Gas, White Paper at www.mobotecusa.com.
- [8] Haddad E., Crilley J., Higgins B.: The Viability and Economics of Adding a ROFA/Rotamix MobotecSystem to a Selective Catalytic Reduction (SCR) Installation. NETL/DOE 2003 Conference on SCR and SNCR for NO_x Reduction Pittsburgh, PA October 29–30, 2003.
- [9] Crilley J., Shilling M., Higgins B., Coombs K.: SCR Levels of NO_x Reduction with ROFA and Rotamix (SNCR) at Dynegy's Vermilion Power Station, 2004 Stack Emissions Symposium, Clearwater Beach, FL, July 28–30, 2004.
- [10] Crilley J., Haddad E., Higgins B.: Reducing SO₃ Emissions at Coal-Fired Power Plants, Combined Power Plant Air Pollutant Control, Mega Symposium, (2004).
- [11] Błasiak W., Grimbrandt J., Chudy M., Pogodziński A.: Redukcja emisji NO_x i SO_x – Nowa organizacja pola przepływu oraz rozdziału powietrza spalania w kotłach, Energetyka Ciepłna i Zawodowa, str. 60–64, 3/2006.
- [12] Błasiak W., Grimbrandt J.: Round about way of reducing NO_x, Modern Power Systems, pp. 53-54, June 2006.
- [13] Jodal M., Lauridsen T., Dam-Johansen K.: NO_x removal on a coal-fired utility boiler by Selective Non-Catalytic Reduction, Environmental Progress, vol. 11, no. 4, pp. 296–301, 1992.
- [14] Kobyłecki R., Bis Z., Nowak W.: Authothermal Upgrading of Biomass and Wastes for Clean and Efficient Production of Power, Proc. of the 2005 International Conference on Coal Science, Okinawa, Japan, 2005.
- [15] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M.: Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową, Energetyka, str. 207–220, nr 3, 2006.
- [16] Biermann J.P., Higgins B., Wendt J.O.L, Senior C.L., Wang D.: Mercury reduction in a coal fired power plant at over 2000 F using MinPlus sorbent through furnace sorbent injection., Electric Utilities EEnvironmental Conference (EUEC), USA, January 22–25th 2006.