

Daria RADSAK\*

## REDUKCJA EMISJI TLENKÓW AZOTU W KOTŁACH ENERGETYCZNYCH JAKO KONIECZNOŚĆ SPEŁNIENIA EUROPEJSKICH STANDARDÓW EMISYJNYCH

Tlenki azotu emitowane do atmosfery w wyniku energetycznego spalania paliw należą do podstawowych zanieczyszczeń środowiska naturalnego. Konieczność dostosowania energetyki krajowej do wymagań polityki Unii Europejskiej w zakresie standardów emisyjnych wymusza podjęcie kroków w kierunku modernizacji znacznej liczby obiektów energetycznego spalania paliw w Polsce. Dopuszczalne wielkości emisji tlenków azotu precyzuje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE w sprawie emisji przemysłowych (IED). Jako punkt odniesienia standardów emisyjnych tlenków azotu oraz warunków pozwoleń przyjęto dokument referencyjny BAT, zgodnie z którym dostosowanie instalacji do założonych wymagań będzie musiało nastąpić w terminie do 4 lat po opublikowaniu konkluzji. W pracy zostanie przedstawiona problematyka emisji tlenków azotu w kotłach energetycznych, wysokosprawne technologie redukcji emisji tlenków azotu oraz przykład modernizacji kotła polegającej na dobudowie instalacji odazotowania spalin.

SŁOWA KLUCZOWE: emisja tlenków azotu, duże obiekty energetycznego spalania, odazotowanie spalin, dokument referencyjny BAT, standardy emisyjne

### 1. WSTĘP

W wyniku energetycznego spalania paliw następuje emisja do atmosfery toksycznych zanieczyszczeń, takich jak tlenki azotu  $\text{NO}_x$ , dwutlenek siarki  $\text{SO}_2$ , tlenek węgla  $\text{CO}$  oraz pył. Największym udziałem w emisji zanieczyszczeń cechuje się energetyka zawodowa, dlatego emisje przemysłowe obejmowane są wymaganiami prawnymi, ujętymi w aktach prawa polskiego oraz w dyrektywach europejskich.

Jeśli chodzi o emisję tlenków azotu, w procesie energetycznego spalania paliw dominuje emisja tlenku azotu  $\text{NO}$ , dwutlenku azotu  $\text{NO}_2$  oraz rzadziej podtlenku azotu  $\text{N}_2\text{O}$  [6]. Powstawanie tlenków azotu w procesie spalania może być determinowane zarówno utlenianiem azotu zawartego w paliwie, jak i utlenianiem azotu zawartego w powietrzu dostarczonym do procesu spalania.

Celem ograniczenia emisji tlenków azotu w kotłach energetycznych stosuje się metody pierwotne, polegające na ograniczaniu powstawania tlenków azotu

---

\* Politechnika Poznańska.

w komorze paleniskowej oraz metody wtórne, za pomocą których tlenki azotu usuwane są z gazów odlotowych przed wprowadzeniem ich do emitera [4]. Do metod wtórnych zaliczane są również metody kombinowane łącznego odsiarczania i denitryfikacji spalin, cechujące się wysoką skutecznością oczyszczania gazów odlotowych. Mimo pozytywnego efektu odazotowania spalin, warunki spalania niskoemisyjnego są przyczyną pogorszenia warunków eksploatacyjnych kotłów oraz urządzeń pomocniczych [3].

## 2. SKUTKI EMISJI TLENKÓW AZOTU DO ŚRODOWISKA NATURALNEGO

Emisja tlenków azotu do atmosfery wskutek energetycznego spalania paliw uznawana jest za jeden z najbardziej szkodliwych czynników dla środowiska naturalnego. Za najbardziej toksyczny uznaje się dwutlenek azotu  $\text{NO}_2$ . Tlenek azotu  $\text{NO}$  pomimo mniejszych właściwości drażniących, charakteryzuje się niestety szybkim utlenianiem do  $\text{NO}_2$ . Podtlenek azotu  $\text{N}_2\text{O}$  jest gazem nietoksycznym, aczkolwiek zalicza się go do gazów cieplarnianych [11].

Emisja tlenków azotu przyczynia się do rozwoju istotnych problemów środowiskowych, takich jak [7, 9]:

- dziura ozonowa – tlenek azotu  $\text{NO}$  przyczynia się do powstawania dziury ozonowej w wyniku reakcji ze stratosferyczną warstwą ozonową, tworząc dwutlenek azotu  $\text{NO}_2$ ; dodatkowe źródło tlenu azotu stanowi migrujący do stratosfery podtlenek azotu, wchodzący w reakcję z pojedynczymi atomami tlenu w obszarze rozpadu cząstek,
- smog fotochemiczny – występujący w warunkach dużego nasłonecznienia i wilgotności wskutek reakcji fotolizy dwutlenku azotu, prowadząc do powstawania ozonu, który jest jednym z głównych składników smogu utleniającego,
- zakwaszenie środowiska – dwutlenek azotu wchodząc w reakcję z wodą tworzy kwas azotowy, który może przyjmować formę depozycji suchej opadając na powierzchnię ziemi, bądź depozycji mokrej w postaci kwaśnych opadów, zakwaszając wody gruntowe, glebę oraz powodując niszczenie konstrukcji metalowych oraz budynków,
- efekt cieplarniany – wśród emitowanych wskutek procesów spalania tlenków azotu, do gazów szklarniowych zaliczany jest podtlenek azotu  $\text{N}_2\text{O}$ , którego negatywną cechą jest dodatkowo długi czas przebywania w atmosferze (około 114 lat).

Poza negatywnym oddziaływaniem na środowisko naturalne, emitowane tlenki azotu stanowią narażenie inhalacyjne dla organizmów żywych, prowadząc m. in. do wiązania hemoglobiny we krwi, czy wewnątrz tkankowego utleniania  $\text{NO}$  do  $\text{NO}_2$  odbierając tlen zawarty we krwi, czego możliwym skutkiem jest zatrucie organizmu tlenkami azotu [11].

### **3. MECHANIZMY POWSTAWANIA TLENKÓW AZOTU W PROCESIE ENERGETYCZNEGO SPALANIA PALIW**

W wyniku energetycznego spalania paliw emitowane są głównie tlenek azotu, dwutlenek azotu (łącznie ponad 90%) oraz podtlenek azotu (zwykle 5–150 ppm) [9]. Głównymi czynnikami warunkującymi wielkość emisji tlenków azotu w procesie spalania są [4, 6]:

- rodzaj i skład paliwa,
- rodzaj paleniska – palniki poziome oraz rozmieszczone przeciwsobnie przyczyniają się do zwiększania emisji tlenków azotu, natomiast kotły z palnikami narożnymi oraz w układzie tangencjalnym (często ze stopniowaniem powietrza) cechują się niskim poziomem emisji tlenków azotu,
- temperatura w obszarze spalania – ze wzrostem temperatury wzrasta koncentracja tzw. termicznych tlenków azotu,
- nadmiar powietrza w procesie spalania – jego wzrost powoduje zwiększanie emisji tlenków azotu,
- obciążenie bloku energetycznego,
- czas trwania reakcji spalania w maksymalnej temperaturze.

Powstawanie tlenków azotu może następować w wyniku utleniania azotu zawartego w paliwie lub w powietrzu dostarczonym do procesu spalania. W obszarze spalania powyżej 1500°C wraz ze wzrostem temperatury obserwuje się wykładniczy przyrost powstających tlenków azotu wskutek bezpośredniej reakcji azotu gazowego z tlenem. Termiczny charakter reakcji tworzenia tlenków azotu zwany jest mechanizmem Zeldowicza [9].

Powstawanie tlenków azotu według mechanizmu Fenimora, polegającego na przekształcaniu azotu w jego tlenki na skutek obecności węglowodorów w paliwie, nazywane jest również mechanizmem szybkiego tlenku azotu [6]. Ze względu na zawartość azotu w paliwie, wyróżnia się również tworzenie tzw. paliwowych tlenków azotu na drodze utleniania lub redukcji. Przy ich formowaniu największe znaczenie odgrywa wielkość nadmiaru powietrza dostarczonego do procesu spalania [6].

### **4. METODY OGRANICZANIA TLENKÓW AZOTU W KOTŁACH ENERGETYCZNYCH**

Biorąc pod uwagę różnorodność czynników wpływających na tworzenie się tlenków azotu w procesie energetycznego spalania paliw, ich ograniczenie sprowadza się przede wszystkim do redukcji temperatury w obszarze spalania, zmniejszania współczynnika nadmiaru powietrza oraz skracania czasu przebywania reagentów w obszarze wysokich temperatur.

Instalacje denitryfikacji spalin wykorzystują zarówno metody pierwotne, polegające na ograniczaniu tworzenia się tlenków azotu podczas procesu spalania,

a także metody wtórne bazujące na usuwaniu tlenków azotu z gazów spaliny-  
wych, przed wprowadzeniem ich do komina.

Do metod pierwotnych zalicza się [8]:

- stopniowanie powietrza (w palnikach lub w komorze paleniskowej poprzez zastosowanie dysz powietrza OFA i ROFA),
- stopniowanie paliwa i powietrza, tzw. reburning (wewnątrz palników bądź w poszczególnych dyszach),
- recyrkulację spalin,
- zmniejszenie nadmiaru powietrza w komorze paleniskowej,
- obniżenie temperatury powietrza.

W porównaniu do metod pierwotnych, metody wtórne cechują się znacznie większą skutecznością odazotowania spalin, są jednak bardziej kosztowne. Wy-  
różnia się wśród nich [9]:

- metody suche: selektywna redukcja niekatalityczna SNCR, selektywna re-  
dukcja katalityczna SCR, wykorzystanie węgla aktywnego, metody suche  
łącznej eliminacji  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ ,
- metody mokre: proces amoniakalno-ozonowy, proces utleniająco-  
absorbpcyjny, metody mokre łącznej eliminacji  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ .

Porównanie poszczególnych metod denitryfikacji spalin zestawiono  
w tabeli 4.1, natomiast porównanie wartości ich maksymalnych sprawności  
odazotowania przedstawiono na rysunku 4.1.

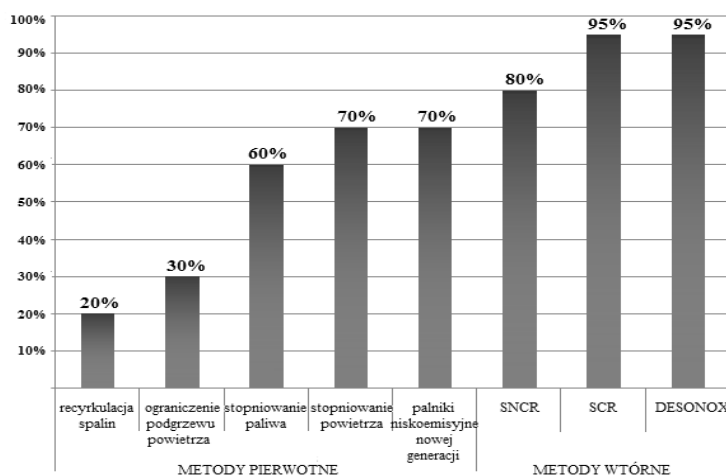
Warunki spalania niskoemisyjnego są przyczyną negatywnych skutków eks-  
ploatacyjnych kotłów oraz urządzeń pomocniczych, powodując wysokotempera-  
turową korozję powierzchni ogrzewalnych, intensyfikację żużlowania, pogorsze-  
nie warunków pracy młynów węglowych, erozję palników pyłowych oraz pogor-  
szenie stabilności płomienia [3]. Z tego powodu, aby nie dopuścić do pogorszenia  
warunków eksploatacyjnych, podczas projektowania instalacji oczyszczania spa-  
lin często konieczne jest również przewidzenie modernizacji urządzeń kotłowych.  
Ograniczenie korozji wysokotemperaturowej prowadzone jest poprzez zapewnie-  
nie optymalnego współczynnika nadmiaru powietrza, stosowanie powłok ochron-  
nych na powierzchni ogrzewalne oraz wprowadzanie do spalin siarczanu amonu  
(w przypadku korozji chlorkowej) [3, 6]. Z kolei w celu poprawy stabilizacji  
płomienia stosuje się zwiększenie turbulizacji przepływu z jednoczesnym spo-  
wolnieniem cząstek i utworzeniem lokalnych stref recyrkulacji, co jest możliwe  
do zrealizowania poprzez instalację pierścieni stabilizujących na wylocie nisko-  
emisyjnych palników wirowych [3]. Jeśli chodzi o pracę zespołu młynowego,  
podczas spalania niskoemisyjnego konieczne jest zapewnienie odpowiedniego  
stopnia przemiału węgla wraz z rozdziałem strumieni paliwa o różnych granula-  
cjach co pogarsza własności dynamiczne młynów węglowych. Poprawa jakości  
przemiału realizowana jest poprzez instalację odsiewaczy statycznych lub dyna-  
micznych wraz z separatorami, z kolei celem poprawy dynamiki pracy młynów  
dostosowuje się warunki pracy odsiewaczy do obciążenia bloku [5].

Tabela 4.1. Porównanie technologii odazotowania spalin [1, 8, 9]

Metoda	Istota technologii	Wady	Zalety
<b>Metody pierwotne</b>			
<b>Stopniowanie powietrza</b>	Podział strumienia powietrza do spalania na strefę pierwszą z niedoborem powietrza oraz strefę drugą z kontrolowanym nadmiarem powietrza. Przykładami technologii mogą być dysze OFA, doprowadzające około 10–25% powietrza nad palnikami pyłowymi, a także rozmieszczone asymetrycznie wysokopiędkościowe dysze ROFA, wprawiające spaliny w ruch turbulentny.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Możliwość spalania niezupełnego w przypadku dysz OFA</li> <li>•Zmniejszenie wydajności palników</li> <li>•Konieczność wyposażenia kotła w kanały powietrza wtórnego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Redukcja ilości tlenu w powietrzu pierwotnym</li> <li>•Dojrzałość technologii</li> </ul>
<b>Recyrkulacja spalin</b>	Obniżenie temperatury w komorze spalania poprzez recyrkulację spalin zewnętrzną (skierowanie części spalin do rekuperatora powietrza i zawrótanie ich z powrotem do kotła) bądź recyrkulację wewnętrzną (w wyniku gazodynamiki płomienia).	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Niestabilność płomienia</li> <li>•Straty energii dla zapewnienia recyrkulacji spalin</li> <li>•Zmniejszenie sprawności kotła</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Możliwość łączenia metody ze stopniowaniem powietrza</li> </ul>
<b>Ograniczenie podgrzewu powietrza</b>	Powietrze do procesu spalania nie jest podgrzewane w regeneracyjnym podgrzewaczu powietrza	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Zwiększenie zapotrzebowania na paliwo do procesu spalania</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Ograniczenie tworzenia termicznych tlenków azotu</li> </ul>
<b>Stopniowanie paliwa</b>	Podział procesu spalania na trzy strefy: <ul style="list-style-type: none"> <li>•pierwsza z nadmiarem powietrza,</li> <li>•druga (redukcyjna), w której z niedoborem powietrza spalane jest dodatkowe paliwo reburningowe (najczęściej gaz ziemny), często z dodatkiem amoniaku lub mocznika,</li> <li>•trzecia, w której następuje dopalanie paliwo wskutek doprowadzenia powietrza wtórnego.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Dodatkowe tworzenie tlenków azotu w dolnej strefie palników</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Prostota instalacji</li> <li>•Możliwość łączenia z innymi metodami</li> <li>•Redukcja emisji SO<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> przy użyciu gazu ziemnego jako paliwa dopalającego</li> </ul>
<b>Palniki niskoemisyjne (LNB)</b>	Zadaniem palników LNB jest redukcja maksymalnych temperatur w procesie spalania przy minimalnej ilości doprowadzanego powietrza wtórnego. W palnikach strumieniowych stosuje się stopniowanie paliwa i/lub powietrza, natomiast w palnikach wirowych – wewnętrzną recyrkulację spalin.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Niestabilność płomienia (poza palnikami nowej generacji)</li> <li>•Możliwość niezupełnego spalania</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Ograniczenie tworzenia termicznych tlenków azotu</li> <li>•Możliwość stosowania dla wszystkich typów paliw</li> </ul>

Tabela 4.1 cd. Porównanie technologii odazotowania spalin [1, 8, 9]

Metody mokre			
<b>SCR</b>	Istotą Selekttywnej Redukcji Katalitycznej jest iniekcja wodnego roztworu amoniaku bądź mocznika do strumienia gazów odlotowych w obecności katalizatora w temperaturze 300–450°C.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne</li> <li>• Emisja NH<sub>3</sub> do atmosfery</li> <li>• Ograniczona żywotność katalizatora</li> <li>• Ryzyko związane ze składowaniem amoniaku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bardzo wysoka skuteczność odazotowania spalin</li> <li>• Możliwość stosowania dla wszystkich typów paliw</li> </ul>
<b>SNCR</b>	Selektywna Redukcja Niekatalityczna polega na redukcji tlenków azotu poprzez wtrysk amoniaku lub mocznika w wysokiej temperaturze (okno temperaturowe w granicach 800°C–1000°C) bez obecności katalizatora.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisja NH<sub>3</sub> do atmosfery</li> <li>• Ryzyko związane ze składowaniem amoniaku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Możliwość łączenia z metodami pierwotnymi</li> <li>• Stosunkowo Wysoka sprawność odazotowania spalin</li> </ul>
Metody kombinowane			
<b>DESNOX</b>	Metoda kompleksowego odsiarczania i odazotowania spalin. Wśród licznych metod kombinowanych wyróżnia się metody suche, np. katalityczne z wykorzystaniem NH <sub>3</sub> i węgla aktywnego czy absorpcyjne na sorbentach stałych, a także metody mokre, głównie absorpcyjne.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne</li> <li>• Ograniczone wdrażanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bardzo wysoka skuteczność oczyszczania spalin</li> <li>• Dodatkowo redukcja emisji pyłu</li> </ul>



Rys. 4.1. Porównanie maksymalnych sprawności poszczególnych metod odazotowania spalin, opracowanie własne na podstawie [1]

## 5. WYMAGANIA PRAWNE DOTYCZĄCE EMISJI TLENKÓW AZOTU W POLSCE

Wymagania prawne dotyczące emisji tlenków azotu w wyniku energetycznego spalania paliw ujęte są zarówno w aktach prawa polskiego, jak i w dyrektywach europejskich, które korespondują z wymaganiami krajowymi wskutek członkostwa Polski w Unii Europejskiej. Standardy emisyjne tlenków azotu z obiektów energetycznego spalania paliw określają następujące akty prawne:

- Prawo Ochrony Środowiska z dnia 27.04.2001 r. (Dz. U. Nr 62 poz. 627),
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4.11.2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz. U. 2014 poz. 1546),
- Przejściowy Plan Krajowy – załącznik do uchwały nr 50/2014 Rady Ministrów z dnia 23.04.2014 r. wraz z późniejszymi zmianami,
- Pozwolenia zintegrowane wydawane przez urząd marszałkowski danego województwa instalacjom zarejestrowanym w Ministerstwie Środowiska,
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24.11.2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola), tzw. dyrektywa IED,
- Dokument referencyjny BAT dla dużych obiektów energetycznego spalania – Best Available Techniques Reference Document for the Large Combustion Plants Final Draft (June.2016).

Dyrektywa IED [2] zastąpiła siedem dotychczas obowiązujących aktów prawnych dotyczących emisji zanieczyszczeń oraz produkcji dwutlenku tytanu. Jej głównym zadaniem jest ustanowienie zasad w kierunku osiągnięcia wysokiego poziomu ochrony środowiska poprzez zapobieganie zanieczyszczeniom przemysłowym. Punktem odniesienia wartości standardów emisyjnych jest dokument referencyjny BAT [1], opisujący najlepsze dostępne techniki dla dużych obiektów energetycznego spalania. Dostosowanie instalacji do wymagań zawartych w dokumencie BAT będzie musiało nastąpić w terminie 4 lat po ich opublikowaniu. Zgodnie z dyrektywą IED, obiekty niespełniające wymagań emisyjnych musiałyby zostać wyłączone z eksploatacji, co byłoby powodem ubytku zdolności wytwórczych w systemie elektroenergetycznym oraz w systemach ciepłowniczych. Z tego powodu dyrektywa IED przewiduje cztery mechanizmy zwalniające czasowo modernizowane obiekty energetycznego spalania z obowiązku przestrzegania założonych wymagań emisyjnych. Do mechanizmów derogacyjnych zalicza się Przejściowy Plan Krajowy, derogacje wynikające z ograniczenia czasu funkcjonowania obiektu, derogacje dla małych systemów wydzielonych oraz derogacje dla zakładów zasilających sieci ciepłownicze.

Dopuszczalne wielkości emisji tlenków azotu dla obiektów spalających węgiel kamienny lub brunatny określone w dyrektywie IED oraz w dokumencie referencyjnym BAT przedstawiono kolejno w tabelach 5.1 oraz 5.2.

Tabela 5.1. Dopuszczalne wielkości emisji NO<sub>x</sub> [mg/Nm<sup>3</sup>] wg dyrektywy IED dla obiektów spalających węgiel kamienny lub brunatny [2]

Całkowita nominalna moc dostarczona w paliwie [MW]	Obiekt oddany do eksploatacji przed 07.01.2014 r., dla którego pozwolenie wydano przed 07.01.2013 r.	Obiekty oddane do eksploatacji po 07.01.2014 r.
50–100	300 450 dla spalania węgla brunatnego	300 400 dla spalania węgla brunatnego
100–300	200	200
>300	200	150

Tabela 5.2. Dopuszczalne wielkości emisji NO<sub>x</sub> [mg/Nm<sup>3</sup>] wg dokumentu BAT dla obiektów spalających węgiel kamienny lub brunatny [1]

Całkowita nominalna moc dostarczona w paliwie [MW]	Średnioroczna emisja [mg/Nm <sup>3</sup> ]		Średnia dobową emisja [mg/Nm <sup>3</sup> ]		
	Obiekt	Nowy	Istniejący	Nowy	Istniejący
<100		100–150	100–270	155–200	165–330
100–300		50–100	100–180	80–130	155–210
≥300 przy spalaniu węgla w złożu fluidalnym lub węgla brunatnego		50–85	<85–150	80–125	140–165
≥300 przy spalaniu węgla kamiennego		65–85	65–150	80–125	<85–165

Przejściowy Plan Krajowy (PPK) [10] jest jednym z mechanizmów ujętych w dyrektywie IED. PPK precyzuje standardy emisyjne dla obiektów energetycznego spalania paliw o mocy nie mniejszej niż 50 MW, dla których pierwsze pozwolenie wydano przed datą 27.11.2002 r. Uczestnictwo w PPK jest dobrowolne w zakresie co najmniej jednego z zanieczyszczeń (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> lub pyłu). Aktualny PPK obejmuje 47 obiektów, dla których określono sumaryczne roczne pułapy emisyjne NO<sub>x</sub>, obniżające się na przestrzeni lat i wynoszące [10]:

- 28 849,63 Mg w roku 2017
- 24 934,91 Mg w roku 2018
- 21 020,19 Mg w roku 2019
- 10 510,18 Mg od 01.01.2020 do 30.06.2020 r.



## 6. MODERNIZACJA INSTALACJI ODAZOTOWANIA SPALIN W KOTLE ENERGETYCZNYM

Analizowanym kotłem energetycznym, dla którego prowadzona jest modernizacja pod kątem redukcji emisji tlenków azotu jest kocioł parowy OP-430, zainstalowany w jednej z elektrociepłowni miejskich. Jest to kocioł jednowalczakowy o naturalnym obiegu wody. Paliwem podstawowym jest pył węgla kamiennego, podawany do kotła palnikami strumieniowymi, umiejscowanymi w układzie tangencjalnym.

Z punktu widzenia ograniczania emisji tlenków azotu, układ paleniskowy kotła od 20. lat wyposażony jest w oddzielne dysze OFA, tzw. dysze SOFA (ang. *Separated OFA*), umieszczone dwupoziomowo: dolne w narożach komory paleniskowej, górne na środku ścian. Spalanie paliwa na poziomie palników niskoemisyjnych realizowano z niedomiarem powietrza, natomiast pozostała część powietrza (około 20%) podawana była około 5 m ponad palnikami przez dysze SOFA, które w wyniku pomiarów optymalizacyjnych ustawiono w pozycji maksymalnego odchylenia w górę.

Biorąc pod uwagę wymagania prawne dotyczące emisji tlenków azotu dla analizowanego obiektu, określone są one zgodnie z wydanym pozwoleniem zintegrowanym jako łączna roczna emisja tlenków azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu dla kolejnych czasookresów

Wielkości dopuszczalnej emisji tlenków azotu [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ] przy zawartości 6% tlenu w spalinach i przeliczeniu na dwutlenek azotu oraz dopuszczalne łączne roczne emisje tlenków azotu zestawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Dopuszczalne wielkości emisji tlenków azotu dla analizowanego obiektu

	Do 31.12.2015	Od 01.01.2016 do 31.12.2017	Od 01.01.2018 do 30.06.2020	Od 01.07.2020
Dopuszczalna wielkość emisji $\text{NO}_2$ [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]	592	592	450	200
Łączna dopuszczalna emisja roczna $\text{NO}_2$ [Mg/rok]	4 291,73	4 185,13	3 513,02	1 718,42

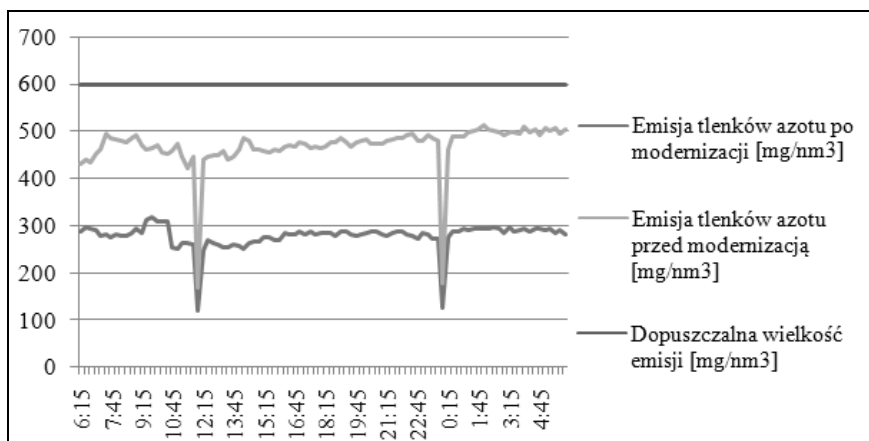
Ze względu na zaostrzające się restrykcje emisyjne, analizowany obiekt jest w trakcie modernizacji pod kątem redukcji emisji tlenków azotu. Dotychczasowa modernizacja układu paleniskowego polegała głównie na zabudowie dysz ROFA

na przedniej ścianie kotła. Dysze wykorzystują zjawisko stopniowania powietrza do procesu spalania wraz z wewnętrzną recyrkulacją i turbulizacją spalin, dzięki czemu uzyskuje się bardziej równomierny rozkład temperatur w komorze paleniskowej ograniczając tworzenie termicznych tlenków azotu. W paśmie palników pyłowych i w miejscu zabudowy dysz instalacji ROFA wymienione zostały ściany membranowe, które w celu ochrony przed korozją niskotlenową oraz osadzeniem się żużla pokryto ceramiczną powłoką antykorozyjną. Dla zapewnienia wymaganej jakości przemiału, związanej z optymalizacją pracy palników oraz dotrzymania dopuszczalnej wartości niedopału w żużlu, przeprowadzono modernizację młynów węglowych w odsiewacz dynamiczny. Aktualnie odsiewacze dynamiczne zainstalowane zostały na trzech z pięciu młynów węglowych misowo-kulowych, wyposażonych pierwotnie wyłącznie w odsiewacze statyczne. Docelowo, modernizacją mają być objęte wszystkie z zainstalowanych na bloku młynów. Zgodnie ze specyfikacją producenta, instalacja wymienionej metody pierwotnej odazotowania spalin z użyciem dysz ROFA zakłada ograniczenie emisji do poziomu  $\leq 270 \text{ mg/Nm}^3$  po dokonaniu optymalizacji procesu. Planowana modernizacja analizowanego kotła energetycznego zakłada jednak połączenie metody pierwotnej z metodą wtórną selektywnej redukcji niekatalitycznej, polegającej na wprowadzeniu roztworu mocznika w strefę temperaturową odpowiednią dla przebiegu reakcji ( $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ ) przy pomocy powietrza transportującego. Na chwilę obecną, ekrany kotła przygotowane są do podłączenia kanałów powietrza transportującego oraz lanc wtryskowych mocznika. Instalacja dawkowania mocznika zostanie uruchomiona najprawdopodobniej jesienią bieżącego roku, po przeprowadzeniu modernizacji pozostałych kotłów analizowanej elektrociepłowni. Wskutek połączenia obydwu metod przewiduje się ograniczenie emisji  $\text{NO}_x$  do poziomu  $\leq 180 \text{ mg/Nm}^3$ .

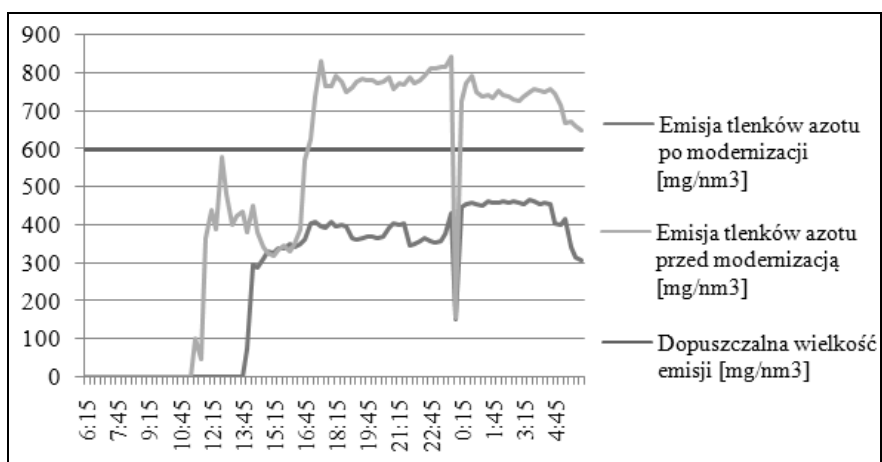
Porównanie wielkości emisji tlenków azotu przed modernizacją oraz po instalacji metody pierwotnej przedstawiono na rys. 6.1. Emisja tlenków azotu przed modernizacją kształtowała się na poziomie  $400\text{--}500 \text{ mg/nm}^3$  przy stabilnej pracy kotła. Po instalacji dysz ROFA, pomimo trwających pomiarów optymalizacyjnych, poziom emisji tlenków azotu zmniejszył się do poziomu  $300 \text{ mg/Nm}^3$ . Największe wielkości emisji  $\text{NO}_x$ , często przekraczające wartości dopuszczalne emisji, notowane były podczas rozruchów kotła z powodu wysokiego nadmiaru powietrza doprowadzonego do kotła oraz pracą palników mazutowych. Najczęściej intensyfikacja tworzenia tlenków azotu maleje po załączeniu młynów węglowych. Po modernizacji kotła, podczas jego rozruchu wielkość emisji  $\text{NO}_x$  nie przekracza aktualnie dopuszczalnej wielkości emisji, co przedstawiono na rys. 6.2. Widoczne na wykresach piki wynikają z kalibracji analizatora, która następuje programowo o godzinie 00:00 i 12:00.

Pomiary emisji tlenków azotu z kotła OP-430 są wartościami 15-minutowymi, pochodzącymi z analizatora spalin zamontowanego przed emitorem, na wylocie kanału spalinowego. Pomiary pobierane są raz na dobę

z systemu zbierającego i przetwarzającego dane z postaci tekstowej na wartość liczbową typu *double* do arkusza kalkulacyjnego Excel, w którym dla każdej doby wykreślany jest przebieg zmian wartości emisji tlenków azotu w czasie.



Rys. 6.1. Wartości stężeń NO<sub>x</sub> podczas normalnej pracy kotła przed i po modernizacji



Rys. 6.2. Wartości stężeń NO<sub>x</sub> podczas rozruchu kotła przed i po modernizacji

## 7. WNIOSKI

Krajowa energetyka, bazująca w znacznej mierze na spalaniu węgla kamiennego stanowi główne źródło emisji szkodliwych dla środowiska tlenków azotu. W świetle obowiązujących przepisów prawnych, istnieje konieczność podjęcia kroków w kierunku dobudowy bądź modernizacji instalacji odzotowania spalin

w licznych obiektach energetycznego spalania paliw. Przedstawiony w pracy przegląd metod odazotowania spalin pozwala stwierdzić, że metody wtórne cechują się najwyższą skutecznością oczyszczania spalin, w szczególności metoda SCR. Ze względu na stosunkowo wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne zdecydowanie częściej preferuje się dobudowę mniej kosztownej instalacji SNCR w połączeniu z powszechnie stosowanymi w energetyce krajowej metodami pierwotnymi odazotowania spalin oraz optymalizacją procesu spalania. Przedstawiony przykład modernizacji kotła energetycznego potwierdza zakładaną skuteczność odazotowania spalin, jednak ze względu na rosnące europejskie restrykcje emisyjne, konieczne będzie uruchomienie instalacji wykorzystującej metodę SNCR w celu spełnienia zakładanego standardu emisji tlenków azotu na poziomie poniżej 200 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### LITERATURA

- [1] Best Available Techniques Reference Document for the Large Combustion Plants, Final Draft (June 2016)  
[http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP\\_FinalDraft\\_06\\_2016.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP_FinalDraft_06_2016.pdf)  
(20.01.2017).
- [2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24.11.2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola) (wersja przekształcona)  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32010L0075>  
(26.01.2017).
- [3] Kordylewski W. (red.), Spalanie i paliwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
- [4] Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M., Energetyka a ochrona środowiska, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [5] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., Elekrownie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
- [6] Pronobis M., Modernizacja kotłów energetycznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [7] Skalska K., Wielgosiński G., Miller J. S., Ledakowicz S., Wstępne utlenianie tlenków azotu za pomocą ozonu jako sposób na intensyfikację procesu absorpcji, Politechnika Łódzka  
[http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol\\_%202012/Skalska\\_%20253-262.pdf](http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Pol_%202012/Skalska_%20253-262.pdf)  
(20.01.2017).
- [8] Szczówka L., Ekologiczny efekt energetycznego wykorzystania biopaliw, seria Monografie nr 154, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2009.
- [9] Tomeczek J., Gradoń B., Rozpondek M., Redukcja emisji zanieczyszczeń z procesów konwersji paliw i odpadów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.

- [10] Uchwała nr 51/2016 Rady Ministrów z dnia 2 maja 2016 r. w sprawie przyjęcia zmiany Przejściowego Planu Krajowego RM-111-45-16  
[https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user\\_upload/mos/srodowisko/ochrona\\_powietrza/PPK2016.pdf](https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user_upload/mos/srodowisko/ochrona_powietrza/PPK2016.pdf) – dostęp 18. 06. 2016.
- [11] Wudaczyk A., Toksyczny wpływ tlenków azotu na organizm człowieka, Praca pogładowa do specjalizacji I stopnia z medycyny pracy, Płock 2001.

### **REDUCTION OF NITROGEN OXIDES EMISSIONS IN POWER BOILERS CONNECTED WITH EUROPEAN LEGAL REQUIREMENTS**

Emissions of nitrogen oxides caused by large combustion processes are the one of the major pollution factors. The necessity of domestic power sector adjustment to European Union requirements for emission standards forces taking vital steps in a view to modernization of majority of Polish large combustions plants. Limit values for nitrogen oxide emissions clarifies the Directive 2010/75/UE of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (IED), according to which, the majority of domestic combustion plants requires the modernization of its' denitrification systems. The Reference Document BAT (Best Available Techniques) was adopted as a point of reference for nitrogen oxides emission standards. The thesis delineates the issue of reduction of nitrogen oxides emissions in power boilers, connected with tightened legal restrictions for industrial emissions, high-effective denitrification technologies and example of power boiled modernization connected with denitrogenation installation extension.

*(Received: 27. 01. 2017, revised: 16. 02. 2017)*