

## Ekologiczne aspekty eksploatacji górniczego napędu spalinowego

### Streszczenie

W publikacji omówiono problemy ekologiczne związane z emisją substancji toksycznych w trakcie eksploatacji górniczych napędów spalinowych. Przedstawiono rozkład stężeń składników toksycznych w spalinach, uzyskany w trakcie badań stanowiskowych z uwzględnieniem stanu obciążenia silnika spalinowego. Dokonano zwięzłej analizy krajowych i zagranicznych wymagań dotyczących dopuszczalnych stężeń tych substancji na stanowisku pracy. Ponadto przedstawiono wyniki prowadzonych w ITG KOMAG badań górniczych napędów spalinowych z zakresu emisji substancji toksycznych.

### Summary

Ecological problems associated with emission of toxic substances during operation of mine diesel drives are discussed. Distribution of concentration of toxic components in exhaust gases, obtained during stand tests and including load of diesel engine, is presented. Short analysis of Polish and foreign requirements as regards permissible concentration of these substances at the workplace is given. Moreover, the results of tests of mine diesel drives regarding emission of toxic substances, which were carried out at KOMAG, are enclosed.

## 1. Wstęp

Transport stanowi ważną część procesu wydobywczego węgla. Ze względu na rodzaj transportowanego materiału wyróżniamy: transport główny (transport urobku) oraz transport pomocniczy (transport materiałów i ludzi). Spośród wielu urządzeń transportu pomocniczego szczególne uznanie zyskały urządzenia napędzane silnikami spalinowymi. Wynika to z wielu czynników, do których przede wszystkim należą:

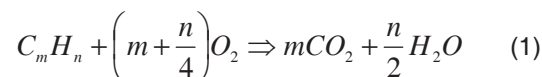
- swoboda w prowadzeniu transportu (brak konieczności stosowania np.: drutu ślizgowego w przypadku lokomotyw elektrycznych, instalacji pneumatycznych, niezbędnych do napełniania zbiorników powietrza lokomotyw pneumatycznych czy liny ciągnącej w przypadku transportu linowego),
- możliwość instalowania dużej mocy w maszynach, co przekłada się na dużą siłę uciągu lokomotywy lub ciągnika,
- duża gęstość energii oraz krótki czas uzupełniania napędu paliwem energetycznym,
- stosunkowo bezpieczny i łatwy w transporcie nośnik energii w postaci oleju napędowego.

Napędy spalinowe posiadają jednak pewne wady związane z generowaniem hałasu oraz emisją ciepła i spalin do atmosfery kopalnianej, powodując tym samym potencjalne zagrożenie dla zdrowia pracujących załóg górniczych.

## 2. Zanieczyszczenia związane z pracą napędu spalinowego

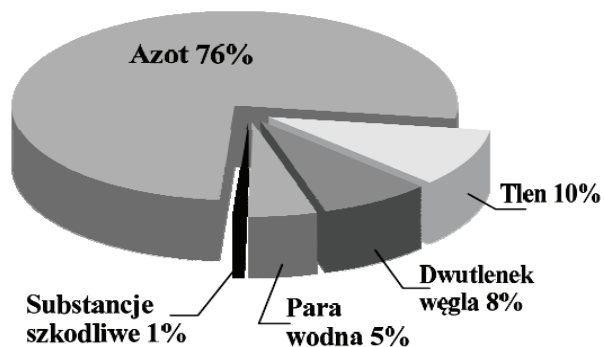
W silniku spalinowym energia mechaniczna uzyskiwana jest w wyniku spalania mieszanki palnej

w komorze spalania. W przypadku silników tłokowych o zapłonie samoczynnym paliwem jest mieszanina ciekłych węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych o średnim składzie  $C_{12,9}H_{23,9}$  [11]. W celu otrzymania jak największej ilości energii cieplnej dąży się do jego spalania całkowitego i zupełnego. Teoretyczne równanie spalania paliwa węglowodorowego przedstawia się następująco:



W rzeczywistości spalanie paliw składających się z różnych węglowodorów z tlenem wraz z pozostałymi gazami wchodzącymi w skład powietrza stanowi złożony proces fizykochemiczny, w którym niektóre cząstki mogą przekształcić się w aktywne rodniki tworząc w rezultacie pośrednie produkty spalania. Reakcje spalania nie zachodzą w całości według teoretycznych równań również, ze względu na krótki czas przebywania oraz niejednorodność mieszanki paliwowej w całej objętości cylindra silnika. Dlatego też zarówno proces spalania, jak i co za tym idzie, skład produktów utleniania będzie zależał od czynników oddziaływujących na szybkość reakcji (skład mieszanki, temperatura, ciśnienie), jak i parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych (system spalania, kształt komory spalania, sposób sporządzania i dozowania mieszanki, obciążenie silnika itp.) [5]. Przykładowy skład spalin przedstawiono na rysunku 1.

Pomimo, że substancje szkodliwe zajmują ok. 1% objętości spalin stanowią duże zagrożenie dla zdrowia organizmów żywych. Zasadniczymi substancjami toksycznymi są tlenek węgla CO, węglowodory HC, oraz tlenki azotu NOx.



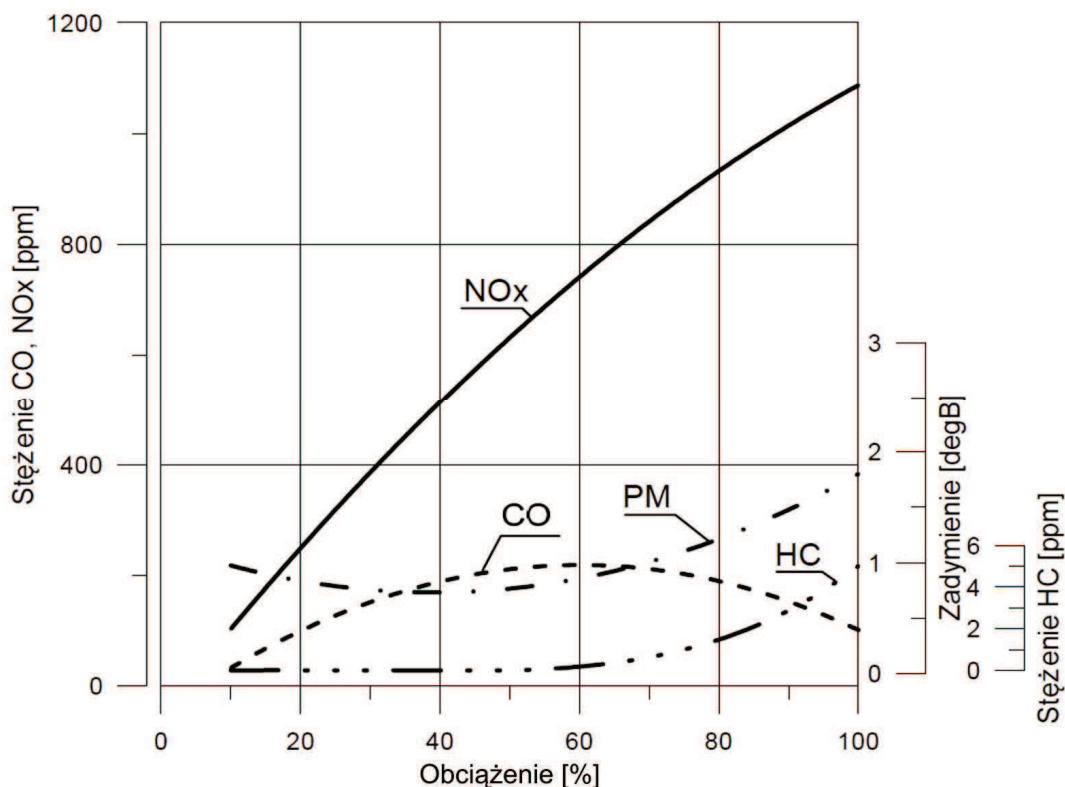
Rys.1. Przykładowy skład gazów spalinowych silników o zapłonie samoczynnym [źródło: opracowanie własne]

Tlenek węgla jest jednym z produktów niezupełnego spalania. Powstaje on w wyniku niedoboru tlenu w mieszance paliwowej (mieszanka bogata  $\lambda < 1$ ), ale również w mieszankach ubogich na skutek niewystarczającego zmieszania paliwa z powietrzem (miejscowo bogata mieszanka). W wysokich temperaturach możliwa jest również dysocjacja dwutlenku węgla do tlenku węgla. Obecność węglowodorów, drugiego z produktów niezupełnego lub niecałkowitego spalania w gazach spalinowych, jest wynikiem niedopalenia paliwa i podobnie, jak w przypadku CO ma miejsce szczególnie przy spalaniu mieszanek bogatych. Ponadto w trakcie eksploatacji silników spalinowych węglowodory ulegają procesowi krakingu, pirolizy i koksowania. Reakcje te prowadzą do powstania

węglowodorów olefinowych zdolnych do polimeryzacji i cyklizacji. Mogą się wówczas tworzyć inne węglowodory, w tym również wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne włącznie z wysoce rakotwórczym benzo(a)piranem [12]. Źródłem węglowodorów są również oleje eksploatacyjne przedostające się do komory spalania po gładziach cylindrów. Zawarte w spalinach tlenki azotu są głównie produktami reakcji tlenu i azotu zawartego w powietrzu. Powstają w sprzyjających warunkach tj. wysoka temperatura spalania oraz nadmiar powietrza.

W ramach badań górniczych napędów spalinowych prowadzonych w Komag-u badano skład spalin dla różnych punktów pracy określonych prędkością obrotową oraz momentem obrotowym [1, 2, 4]. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań dla 81 kW silnika przy prędkości obrotowej 2300 obr/min oraz obciążeniu w zakresie 10 ÷ 100% maksymalnego momentu obrotowego.

Cechą charakterystyczną silników o zapłonie samoczynnym jest ich praca z dużym współczynnikiem nadładku powietrza  $\lambda \gg 1$ , szczególnie w silnikach doładowanych, przy czym współczynnik  $\lambda$  nie jest stały w całym zakresie pracy, tak jak ma to miejsce w przypadku silników o zapłonie iskrowym. Jego wartość maleje wraz ze wzrostem obciążenia zbliżając się do minimalnej wartości 1,5 (uzyskanej w badaniach) w przypadku obciążenia maksymalnym momentem obrotowym [4]. Wysoka wartość współczynnika  $\lambda$



Rys.2. Przykładowe stężenie substancji szkodliwych w spalinach [źródło: opracowanie własne]

skutkuje niską zawartością produktów niecałkowitego spalania w gazach spalinowych. Z przedstawionego na rysunku 2 wykresu można zauważyć, że zawartości CO i HC utrzymują się na stałym niskim poziomie i wzrastają nieznacznie w przypadku obciążenia przekraczającego 70%. Taka sama sytuacja dotyczy wartości stężenia cząstek stałych (PM), których pomiaru dokonano pośrednio, poprzez pomiar zadymienia według skali Boscha.

Na tle krzywych stężenia produktów niecałkowitego spalania wyraźnie zaznacza się stężenie tlenków azotu. Stężenie NO<sub>x</sub> wzrasta wraz z obciążeniem i osiąga maksimum w punkcie maksymalnego momentu obrotowego. Dla pomiarów przedstawionych na rysunku 2 wartość stężenia NO<sub>x</sub> sięgała wartości przekraczających 1100 ppm. Zdaniem autora można wysunąć ogólny wniosek, że w przypadku stosowania nowoczesnych silników diesla w napędach górniczych, reprezentowanych przez badany silnik, największym zagrożeniem dla środowiska kopalnianego, wynikającym z emisji gazów spalinowych, są tlenki azotu. Stężenie tlenku węgla oraz węglowodorów utrzymuje się na stosunkowo niskim poziomie.

### 3. Dopuszczalne stężenia tlenków azotu na stanowisku pracy

Dla substancji przenikających do organizmu przez drogi oddechowe opracowano wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń na stanowisku pracy NDS. Zgodnie z definicją najwyższe dopuszczalne stężenie - średnie ważone, jest to takie stężenie, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego i przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy, przez okres jego aktywności zawodowej nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia oraz w stanie jego przyszłych pokoleń. Oprócz stężeń NDS określono również dopuszczalne stężenia chwilowe (NDSCH), które nie powinny spowodować ujemnych zmian w stanie zdrowia pracownika, jeżeli występuje w środowisku pracy nie dłużej niż przez 15 minut i nie częściej niż dwa razy w czasie zmiany roboczej, w odstępach nie krótszych niż jedna godzina. W tabeli 1 porównano wartości dopuszczalne NDS oraz NDSCH tlenków azotu w krajach EU, USA oraz Australii.

Najwyższe dopuszczalne stężenia tlenków azotu na stanowisku pracy [6, 7, 8, 9, 10]

Tabela 1

	NO CAS nr [10102-43-9]		NO <sub>2</sub> CAS nr [10102-44-0]	
	NDS [ppm] / [mg/m <sup>3</sup> ]	NDSCH [ppm] / [mg/m <sup>3</sup> ]	NDS [ppm] / [mg/m <sup>3</sup> ]	NDSCH [ppm] / [mg/m <sup>3</sup> ]
Australia	25 / 31	-	3 / 5,6	5 / 9,4
Austria	25 / 30	-	3 / 6	6 / 12
Francja	25 / 30	-	-	3 / 6
Hiszpania	25 / 31	-	3 / 5,7	5 / 9,6
Irlandia	25 / 30	35 / 45	3 / 5	5 / 9
Niemcy	0,5 / 0,63	1,0 / 1,26	0,5 / 0,95	0,5 / 0,95
<b>Polska<sup>[2]</sup> od 2002 r. do 2005 r.</b>	- / 5 <sup>[1]</sup>	- / 10 <sup>[1]</sup>	- / 5 <sup>[1]</sup>	- / 10 <sup>[1]</sup>
	Dz. U. 2002 nr 217 poz. 1833 <sup>[2]</sup>			
<b>Polska<sup>[3]</sup> od 2005 r.</b>	- / 3,5	- / 7	- / 0,7	- / 0,5
	Dz. U. 2005 nr 212 poz. 1769 <sup>[3]</sup>			
<b>Polska<sup>[4]</sup> od 2002 r.</b>	- / 5	- / 10	-	-
	Dz. U. 2002 nr 139 poz. 1169 <sup>[4]</sup>			
USA-NIOSH <sup>[5]</sup>	25 / 30	-	-	1 / 1,8
USA - OSHA <sup>[6]</sup>	25 / 30	-	-	5 / 9

1. Dotyczy sumy tlenków azotu NO<sub>x</sub>.
2. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
3. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 10 października 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
4. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.
5. The National Institute for Occupational Safety and Health.
6. The Occupational Safety and Health Administration.

Na mocy Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r., w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, określono wartości dopuszczalnych maksymalnych stężeń sumy tlenków azotu na stanowisku pracy na poziomie  $5 \text{ mg/m}^3$  dla NDS oraz  $10 \text{ mg/m}^3$  dla NDSCH. W przypadku zakładów górniczych wartości te reguluje również §187 p.2 Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych, w którym wartości NDS oraz NDSCH dla NO określono w wysokości odpowiednio  $5 \text{ mg/m}^3$  oraz  $10 \text{ mg/m}^3$ , przy czym dla zakładów stosujących maszyny spalinowe wartości te określa się na podstawie stężenia dwutlenku azotu (§187 p.4). Z uwagi na fakt, że toksyczność różnych tlenków azotu jest wyraźnie różna (dwutlenek azotu jest kilkakrotnie bardziej toksyczny od tlenku azotu), Międzyresortowa Komisja ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy zarekomendowała nowe wartości NDS i NDSCH, wprowadzone rozporządzeniem z dnia 10 października 2005 r. [8]. Analizując powyższe zauważyć można, że obowiązujące obecnie dwa akty prawne określają różne zawartości stężeń dopuszczalnych na górniczych stanowiskach pracy (stężenia NO w [6] nie zostały wyłączone dla podziemnych zakładów górniczych tak jak ma to miejsce dla dwutlenku węgla). Porównując obowiązujące wartości stężeń dopuszczalnych z obowiązującymi w innych krajach zauważyć można, że w Polsce przepisy są znacznie bardziej restrykcyjne.

#### 4. Metody ograniczania emisji tlenków azotu

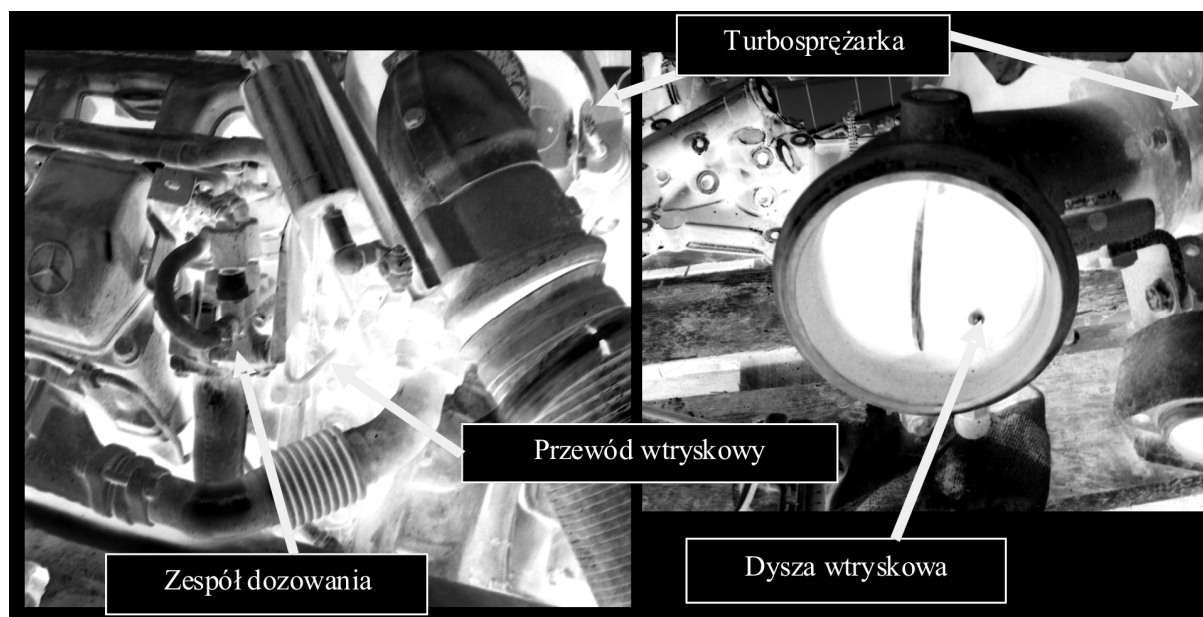
W działaniach zmierzających do ograniczenia emisji tlenków azotu przez pracujące silniki spalinowe możemy wyróżnić dwie grupy:

- działania w zakresie optymalizacji procesu spalania, poprzez zmiany konstrukcji komory spalania, procesu wtrysku paliwa, przygotowania oraz składu mieszanki paliwowej,
- działania w zakresie opracowania metod konwersji tlenków azotu na drodze układu wylotowego.

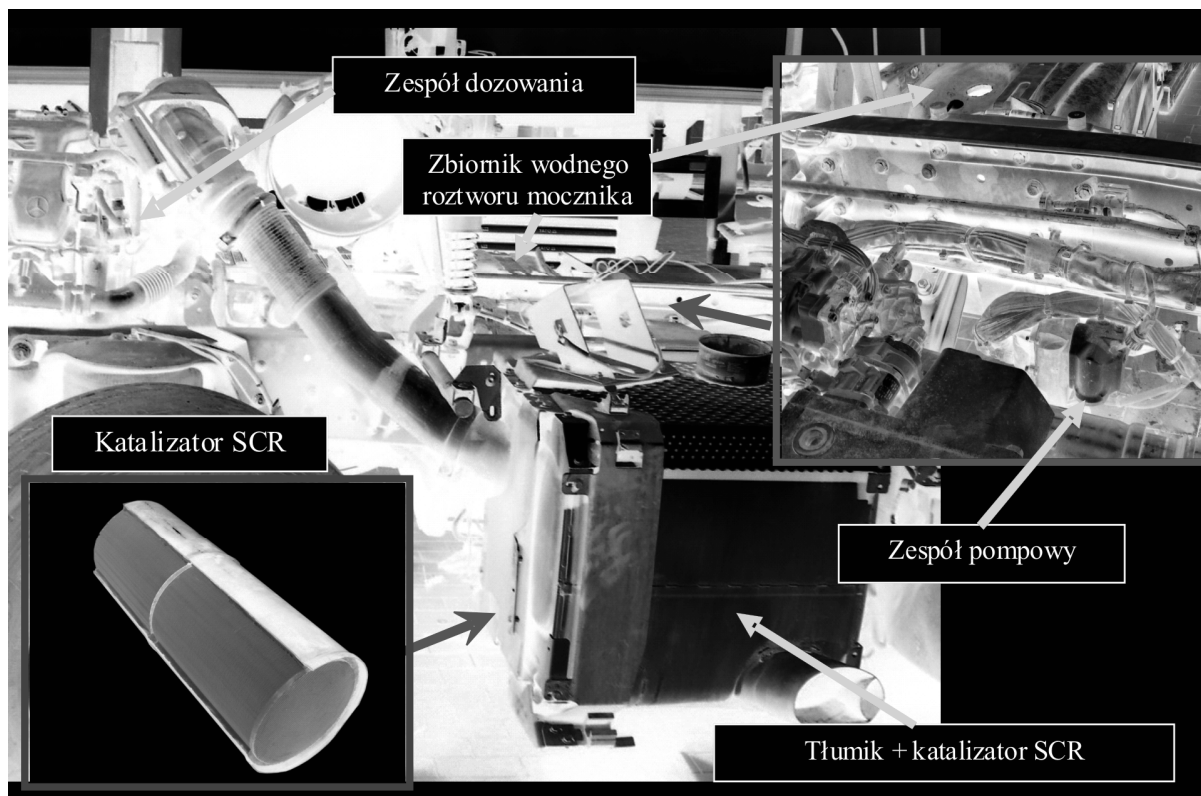
W zakresie metod obróbki spalin na drodze układu wylotowego na szczególną uwagę zasługują metody katalityczne, takie jak:

- SCR – Selective Catalytic Reduction - Selektywna redukcja katalityczna za pomocą wodnego roztworu mocznika; konwersja 65 - 90%,
- LNC – Lean NOx Catalyst - redukcja tlenków azotu (NOx) z wykorzystaniem węglowodorów (HC-SCR); konwersja 10 - 50%,
- LNT – Lean NOx Traps - absorpcja tlenków azotu (NOx) wewnątrz katalizatora i ich okresowe usuwanie; konwersja 50 - 80%.

Największą skuteczność uzyskuje metoda selektywnej redukcji katalitycznej SCR, która polega na zastosowaniu dodatkowego czynnika (reagenta) wtryskiwanego do układu wylotowego przed reaktorem katalitycznym. Czynnikiem reagującym z tlenkami azotu redukuje je do azotu ( $\text{N}_2$ ). Iniekcja reagenta, jakim jest wodny roztwór mocznika, następuje przed reaktorem katalitycznym, najczęściej zaraz za wylotem turbosprężarki. Na rysunku 3 przedstawiono układ dozowania wodnego roztworu mocznika na przykładzie instalacji zabudowanej na ciągniku siodłowym.

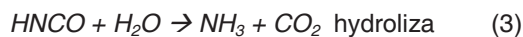


Rys.3. Przykładowy układ dozowania wodnego roztworu mocznika [4]



Rys.4. Przykładowe rozmieszczenie zespołów instalacji SCR [4]

Po iniekcji wodnego roztworu mocznika w pierwszej kolejności następuje odparowanie wody. Następnie w trakcie przepływu przez układ wylotowy następują reakcje termolizy oraz hydrolizy jak poniżej.



Na powierzchni reaktora katalicznego następuje redukcja tlenków azotu zawartych w spalinach według poniższej reakcji:



Ilość dozowanego czynnika redukcyjnego jest ściśle określana przez moduł sterujący na podstawie parametrów pracy silnika spalinowego. Na rysunku 4 przedstawiono rozmieszczenie podstawowych elementów instalacji SCR na przykładzie ciągnika siodłowego.

## 5. Badania skuteczności redukcji tlenków azotu metodą SCR

W celu określenia skuteczności metody konwersji tlenków azotu z wykorzystaniem selektywnej redukcji katalicznej, jak również uzyskania informacji technicznych dotyczących możliwości jej aplikacji w górniczych napędach spalinowych, odpowiednio rozbudowano stanowisko badawcze napędów spalinowych. Stanowisko to wyposażone zostało w odpowiednio zaprojektowany na potrzeby badań układ wylotowy, uwzględniający elementy redukcji

tlenków azotu metodą SCR (rys. 5.). W skład tego układu wchodzi:

- zespół przygotowania reagenta, który pozwala na dozowanie czynnika pod dowolnym ciśnieniem, wpływając tym samym na przepływ jednostkowy oraz parametry geometryczne strugi oraz wielkość kropeł,
- zespół wtrysku, którego regulowane płynnie parametry pracy (czas otwarcia, czas zamknięcia) pozwalają na dokładną regulację dawki reagenta,
- zespół reaktora SCR, który stanowi wymienny moduł układu.

Redukcję cząsteczek tlenków azotu przeprowadza się cząsteczkami amoniaku, który jest substancją toksyczną, dlatego bardzo ważne jest dokładne określenie ilości dozowanego amoniaku tak, aby wszystkie cząsteczki weszły w reakcję. W przeciwnym wypadku może dojść do tzw. ucieczek cząstek amoniaku (ammonia slip). Niezbędną ilość amoniaku można określić po zbilansowaniu równania (4).

$$\frac{m_{4NH_3}}{m_{4NO}} = \frac{M_{4NH_3}}{M_{4NO}} = \frac{68kg/kmol}{120kg/kmol} = 0,566 \quad (5)$$

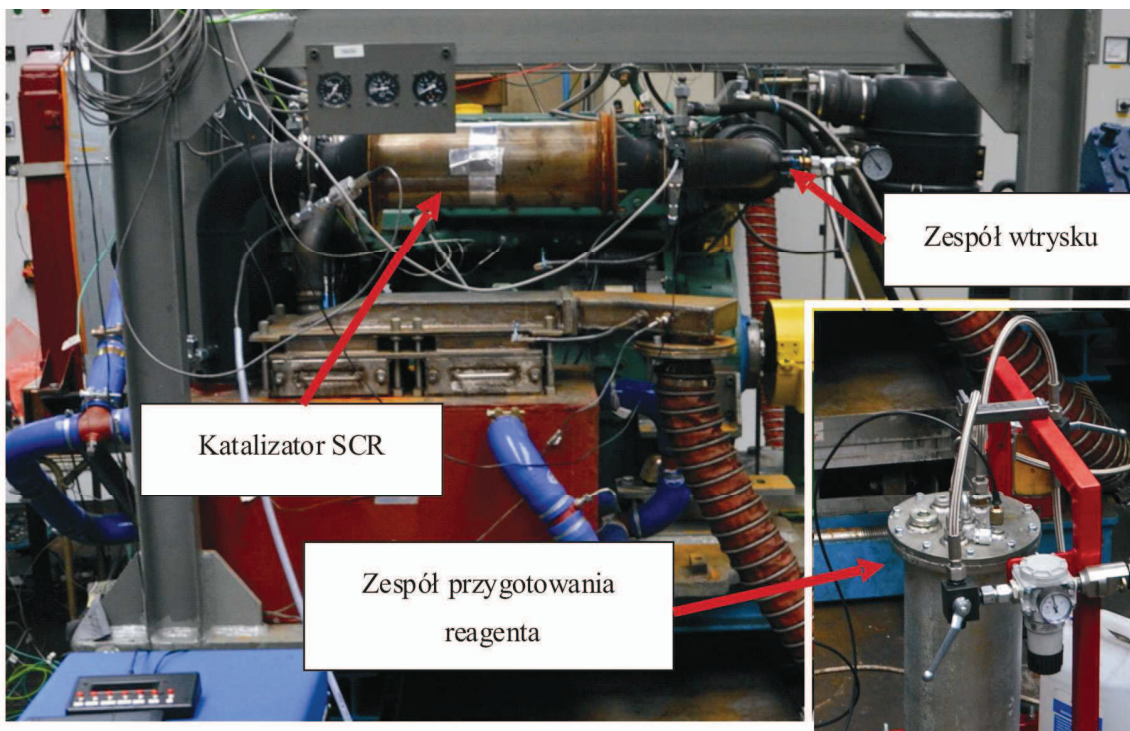
gdzie:

- $m$  – masa cząsteczkowa,
- $M$  – masa całkowita.

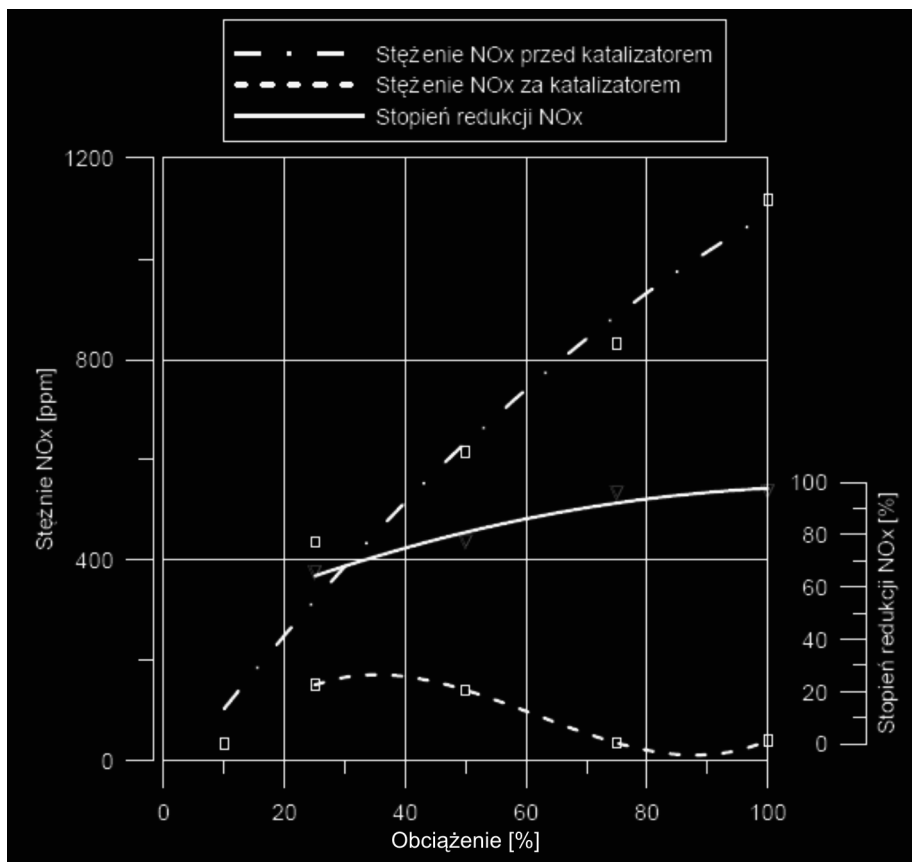
Analogicznie postępując dla równań (2) i (3) oraz uwzględniając stężenie mocznika w wodzie wyznaczyć

można współczynnik określający stosunek masy reagenta do masy tlenków azotu, który pozwala na określenie ilości dozowanego czynnika dla ustalonych punktów pracy (punkty pomiarowe cyklu badawczego).

Wyniki przeprowadzonych pomiarów stężeń tlenków azotu uzyskane w trakcie badań zilustrowano na rysunku 6. W trakcie badań dokonywano pomiarów stężeń substancji toksycznych przed i za reaktorem



Rys.5. SCR na stanowisku badawczym napędów spalinowych



Rys.6. Redukcja tlenków azotu w trakcie badań stanowiskowych [źródło: opracowanie własne]

katalitycznym. Po ustaleniu parametrów pracy silnika (prędkość obrotowa oraz moment obrotowy) rozpoczęto realizację dozowania reagenta. Następnie dokonano pomiarów stężenia NO<sub>x</sub> w spalinach. Najwyższa skuteczność uzyskana została przy pracy silnika w granicach od 80% do 100% obciążenia. Maksymalny stopień redukcji wyniósł w tym zakresie 96%. Wraz ze spadkiem obciążenia malała sprawność układu. Poniżej 25% obciążenia nie zauważono zmian w zawartości NO<sub>x</sub> przed i za katalizatorem. Przyczyną spadku sprawności układu wraz ze spadkiem obciążenia dopatrywać się można z układu wtrysku. Dla niskich stężeń wejściowych wymagane było odpowiednio mniejsze natężenie przepływu czynnika, co z kolei wpływało na wydłużenie czasu zamknięcia wtryskiwacza, w efekcie czego struga czynnika nie była jednorodna. Powodowało to niewystarczające wymieszanie spalin z czynnikiem redukującym. Innym powodem mogła być zbyt niska temperatura spalin, która nie była w stanie doprowadzić do reakcji term- i hydrolizy reagenta na odcinku wtryskiwacz-reaktor. Analizując całościowo wyniki badań podkreślić należy wysoką skuteczność tej metody pozwalającej, dla obciążeń powyżej 25%, obniżyć stężenie tlenków azotu średnio o 80%.

## 6. Podsumowanie

Działania zmierzające do podniesienia sprawności silników spalinowych, takie jak: wprowadzenie wtrysku bezpośredniego, zwiększanie ciśnienia w komorze spalania czy praca na ubogich mieszankach spalinowych nie są bez znaczenia dla składu wydzielanych spalin. Reakcje redukcji i utleniania są przeciwnymi reakcjami chemicznymi, dlatego szczególnie trudne jest jednoczesne uzyskanie niskich stężeń tlenków azotu i produktów niecałkowitego spalania CO, HC.

Wśród metod zmierzających do obniżenia zawartości tlenków azotu w spalinach na szczególną uwagę zasługuje selektywna redukcja katalityczna. Działając w obrębie układu wylotowego nie wpływa ona bezpośrednio na proces spalania mieszanki palnej. Przeprowadzone badania potwierdzają wysoką skuteczność tej metody, szczególnie w obszarze dużych obciążeń silnika. Dostrzegalnym niebezpieczeństwem związanym z wykorzystaniem amoniaku jako reagenta jest możliwość emisji z układu wylotowego części amoniaku nie biorącego udziału w reakcjach. Przepisy w tym zakresie dopuszczają maksymalną emisję amoniaku na poziomie 25 ppm [3].

Dlatego szczególnie ważne jest odpowiednie przygotowanie oraz dozowanie substancji redukującej.

## Literatura

1. Dobrzaniecki P., Mężyk A.: Kształtowanie cech eksploatacyjnych górniczych pojazdów szynowych. ITG KOMAG 2012.
2. Dobrzaniecki P.: Badania stanowiskowe górnictwa napędu spalinowego. Maszyny Górnicze nr 2011 nr 4, str. 25-30.
3. Dyrektywa Komisji 2010/26/UE z dnia 31 marca 2010 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach.
4. Kaczmarczyk K.: Dostosowanie silnika spalinowego do wymagań stawianych górnictwem zespołom spalinowym. ITG KOMAG Gliwice 2013 (materiały nie publikowane).
5. Merkiś J.: Ekologiczne Aspekty stosowania silników spalinowych. WPP Poznań 1995.
6. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. 2002 nr 217 poz. 1833 wraz ze zmianami).
7. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz. U. 2002 nr 139 poz. 1169 wraz ze zmianami).
8. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 10 października 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
9. [www.ciop.pl](http://www.ciop.pl) (20 sierpień 2013).
10. [www.dgouv.de](http://www.dgouv.de) (20 sierpień 2013).
11. [www.itcimp.pwcr.wroc.pl](http://www.itcimp.pwcr.wroc.pl) (19 wrzesień 2013).
12. [www.wiedzainfo.pl](http://www.wiedzainfo.pl) (19 wrzesień 2013).

*Artykuł wpłynął do redakcji w listopadzie 2013 r.*