

Zygmunt Marciniak, Ireneusz Pielecha

# Właściwości silników spalinowych w aspekcie ochrony środowiska

**Zwiększenie wymagań ochrony środowiska dotyczy coraz częściej szynowej trakcji spalinowej. Silniki lokomotyw spalinowych muszą obecnie spełniać coraz bardziej rygorystyczne normy emisji spalin. Możliwość spełnienia tych wymagań przez silnik spalinowy jest ograniczona. Znaczącą rolę w tym aspekcie odgrywają układy oczyszczania spalin, które wraz z odpowiednią jakością paliw (zawielkością siarki) umożliwiają spełnienie limitów toksyczności spalin.**

## Stan polskiego taboru spalinowego

Na przestrzeni ostatnich kilku lat zostaje sprowadzanych do kraju coraz większa liczba spalinowych pojazdów trakcyjnych (w tym lokomotyw i lekkich pojazdów szynowych), których silniki spalinowe nie spełniają wymagań w zakresie limitów emisji składników toksycznych. Spowodowane jest to przede wszystkim liberalizacją przewozów kolejowych w kraju i pojawieniem się ponad trzydziestu przewoźników (tzw. operatorów prywatnych) nie skupionych w byłych i obecnych strukturach Polskich Kolei Państwowych S.A.

Sprowadzane lokomotywy spalinowe i lekkie pojazdy z napędem spalinowym szynowe są w różnym stanie technicznym: często przestarzałe wiekowo i technologicznie (pod względem układów elektrycznych i mechanicznych). Wymagają one napraw, modernizacji oraz tzw. „polonizacji”, tj. zabiegów umożliwiających ich bezpieczną eksploatację na torach Polskich Linii Kolejowych S.A.

Znaczna liczba tych trakcyjnych pojazdów szynowych jest naprawiana i modernizowana w kraju, gdzie są poddawane:

- naprawom głównym silników spalinowych wraz ze szczegółowymi regulacjami i wymianami zużytych elementów, aparatów i urządzeń związanych z silnikami; zaletą tego rozwiązania jest pełne dopasowanie wymagań silnika spalinowego i jego osprzętu;
- wymianom (tzw. remotoryzacja) silników spalinowych na nowsze i nowocześniejsze, spełniające określone wymagania w zakresie trwałości, niezawodności, zużycia paliwa i oleju smarowego, a przede wszystkim oddziaływania na środowisko naturalne człowieka; utrudnieniem jest uzyskanie wymaganej prędkości obrotowej silnika spalinowego do wymagań zasilania prądnicy głównej lub zespołu prądnicy i napędów pomocniczych, co odbija się na mniejszej efektywności i prowadzi często do zwiększenia zużycia paliwa.

Przyczynami złego stanu spalinowych trakcyjnych pojazdów szynowych eksploatowanych na liniach krajowych mogą być najczęściej:

- brak możliwości zakupu używanych pojazdów szynowych w Polsce,
- brak taniego i niezawodnego taboru krajowego,
- sprowadzanie taboru wyeksploatowanego i użytego,

- brak spełniania norm emisji spalin, co wymusza konieczność napraw głównych lub remontowych silników lub docelowo wymianę silnika.

Obecnie w Europie eksploatowanych jest około 19 700 lokomotyw spalinowych z silnikami o zapłonem samoczynnym (zrezerwowanych w UIC jest około 17 000) [9].

Znaczną część lokomotyw stanowią jednostki wystużone, wśród których jest około 80% sprzed 1990 r. Średni wiek lokomotywy spalinowej wynosi około 27 lat. Wielkość ta jest szczególnie aktualna (lub nawet zaniżona) w krajowym taborze kolejowym lokomotyw spalinowych. Średni przebieg lokomotyw spalinowych to obecnie około 20 000 km (jednakże maksymalne wielkości mogą być osiągnięte na poziomie 230 tys. km). W latach 2005–2020 spodziewane jest zwiększenie liczby nowych lokomotyw spalinowych o 9000.

## Wymagania dotyczące pojazdów szynowych i silników spalinowych

Silniki spalinowej trakcji szynowej, montowane głównie w lokomotywach spalinowych (lub w innych pojazdach szynowych), powinny spełniać następujące wymagania w zakresie:

- minimalnej masy silnika w wersji poziomej oraz wymaganej przestrzeni dla instalacji podpodłogowych,
- spełnienia wymagań dotyczących emisji spalin według Stage IIIA (lub UIC III),
- niskiego kosztu silnika,
- niskiego zużycia paliwa,
- długich okresów międzyprzeglądowych,
- niskiego poziomu hałasu,
- cyklu życia na poziomie minimum 18 000 godz. (typowy dla pojazdów szynowych),
- inteligentnego systemu diagnostyki pokładowej i dobrej komunikacji z systemami kontroli ruchu.

Natomiast w zakresie wymagań dotyczących całego pojazdu szynowego wyposażonego w silnik spalinowy pożądanym jest:

- montaż systemów oczyszczania spalin, które jednak zwiększają koszt i masę pojazdów szynowych,
- wyposażenie układu w filtr cząstek stałych, które wymagają regeneracji (przeprowadzanej w różny sposób),
- instalowanie systemu do redukcji tlenków azotu, który wymaga zbiornika z mocznikiem i dodatkowego oprzyrządowania.

Niekorzystnymi aspektami wymienionych zabiegów mogą być:

- dodatkowa obsługa systemów oczyszczania spalin,
- zwiększenie kosztów pojazdów (przez zastosowanie pozasilnikowych układów oczyszczania spalin – układy aftertreatment),
- zwiększenie kosztów przez zastosowanie systemów diagnostyki pokładowej OBD,
- konieczność zapewnienia dużej niezawodności i sprawności układów oczyszczania spalin w pojazdach szynowych (obciążenia cieplne, wibracje).

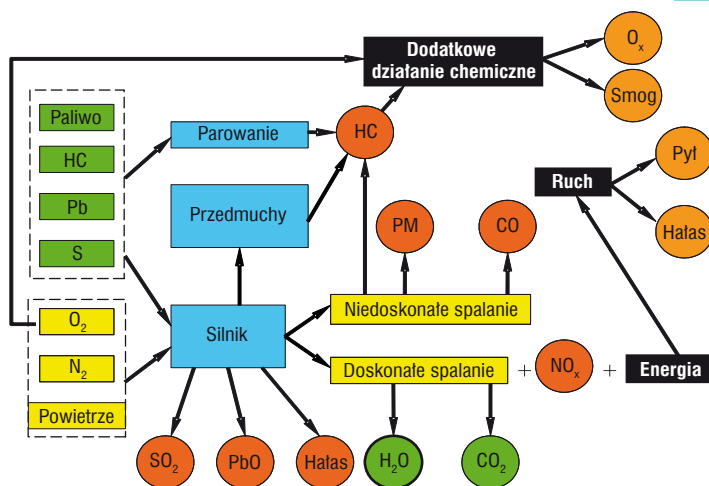
## Emisja szkodliwych składników spalin

Źródłami substancji zanieczyszczających, emitowanych do atmosfery przez silniki spalinowe, są:

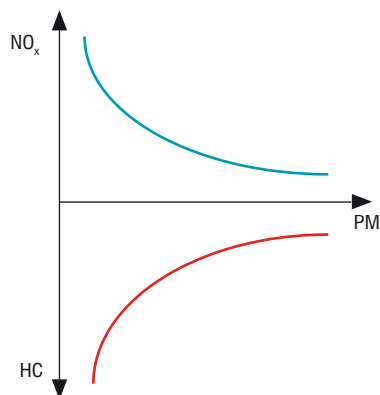
- układ wylotowy silnika,
- skrzynia korbowa,
- układ zasilania w paliwo.

Zasadniczymi gazowymi toksycznymi składnikami spalin są: tlenek węgla, niespalone węglowodory oraz tlenki azotu. Ponadto powstają, głównie w silnikach o zapłonie samoczynnym, cząstki stałe (PM – *particulate matter*). Jednak nie są to jedyne składniki emitowane z pojazdu wyposażonego w silnik spalinowy (rys. 1). Emitowane są również pyły, hałas i powstający w wyniku reakcji chemicznych smog. Obecnie głównym problemem dotyczącym emisji z silników jest ograniczenie tlenków azotu oraz cząstek stałych (rys. 2). Jednakże redukcja tych dwóch składników nie przebiega jednocześnie. Ograniczenie jednego z nich powoduje wzrost emisji drugiego.

Węglowodory aromatyczne charakteryzują się długim okresem opóźnienia zapłonu – są odpowiedzialne za spalanie stukowe w silniku. Z tego też względu nie są pożądanymi składnikami oleju napędowego. Również ze względu na ochronę środowiska ich obecność w paliwach jest wysoce niewskazana: podczas ich spalania (szczególnie węglowodorów wielopierścieniowych) tworzą się wysokocząsteczkowe produkty o właściwościach rakotwórczych, które są wprowadzane do atmosfery wraz ze spalinami.



Rys. 1. Składniki spalin i miejsca ich powstawania w silniku spalinowym [18]



Rys. 2. Zależności dotyczące ważniejszych składników spalin silnika ZS [18]

Zawielkość siarki jest jednym z parametrów oleju napędowego, który w największym stopniu wpływa na poziom emisji cząstek stałych. Siarka z jednej strony intensyfikuje tworzenie cząstek stałych w procesie roboczym silnika, z drugiej obniża skuteczność układów oczyszczania spalin.

Obecnie obowiązujące uregulowania prawne dotyczące zawielkości siarki w paliwie oparte są na dyrektywie 98/70/EC [7]. Oddziaływanie siarki polega na zmniejszeniu efektywności działania i trwałości reaktora katalitycznego, ponadto powoduje wydłużenie czasu w celu osiągnięcia nominalnej temperatury pracy. Paliwo o niskiej zawielkości siarki, określane jako LSD (*Low Sulphur Diesel*), zawiera do 500 ppm S. Zawielkość taka powoduje, że jest możliwe wykorzystanie układów oczyszczania spalin w postaci reaktorów utleniających. Paliwo, określane jako ULSD (*Ultra-Low Sulphur Diesel*), pozwala na stosowanie układów filtrów cząstek stałych. Paliwo to zawiera do 15 ppm siarki. Daty wprowadzania na rynek paliw o określonych zawartościach siarki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

## Zmiany zawielkości siarki w paliwie w aspekcie typów pojazdów [1]

Typ	Data				
	03.2006	06.2006	06.2007	06.2010	06.2012
Pojazdy drogowe	500	15	15	15	15
Pojazdy pozadrogowe	~3000	~3000	500	15	15
Statki/pojazdy szynowe	~3000	~3000	500	500	15

Propozycje limitów emisji dla etapów III i IV dotyczących silników o zastosowaniach pozadrogowych opublikowano przez Komisję Europejską 27 grudnia 2002 r. i przyjęto przez Parlament Europejski w październiku 2003 r. Etap III wprowadzono w 2006 r. Etap IV będzie wprowadzany stopniowo między 2010 a 2014 r. Etapy III i IV dotyczą silników spalinowych lokomotyw i pojazdów szynowych (tab. 2). Mają one zastosowanie tylko do nowych silników i ich wyposażenia. Obecnie dąży się do ujednoczenia przepisów dotyczących emisji składników szkodliwych. Etapy I i II ujednoczono z amerykańskimi przepisami dotyczącymi silników pojazdów *off-road* (pojazdów pozadrogowych). Etapy III i IV są zgodne z normami amerykańskimi Tier 3-4. Etap IV wprowadza limity emisji PM o wielkości 0,020 ÷ 0,025 g/kWh. Oznacza to, że silniki muszą być wyposażone w filtry cząstek stałych (90% zmniejszenie limitu w stosunku do etapu II). Niektóre silniki będą także wymagały stosowania układów redukcji emisji NO<sub>x</sub> w celu spełnienia limitów etapu IV.

Pomiary emisji są przeprowadzane według dwóch testów [7]: testu NRSC, znanego jako test stacjonarny ISO 8178-F, oraz nowego testu NRTC, który opracowano wspólnie z organizacją EPA. Według testu NRTC mierzona będzie emisja cząstek stałych w etapach III i IV, a emisja składników gazowych według testu NRSC.

Europejskie przepisy dotyczące emisji spalin silników trakcji szynowej: lokomotyw (w tym manewrowych) oraz lekkich pojazdów szynowych zawarto w karcie UIC 624 [11, 12]. Dopuszczalne wielkości emisji ustalono w 2001 r. i mają one zastosowanie do nowo produkowanych silników wysokoprężnych trakcji kolejowej. Obowiązującym testem jest ISO 8178-F. Dopuszczalne wielkości

## Terminy wprowadzania europejskich limitów emisji spalin dla pojazdów szynowych [7]

Kategoria	Zastosowanie	III A homologacja typu	III A nowo sprzedawane	III B homologacja typu	III B nowo sprzedawane
RC A RC B	Pojazdy szynowe > 130 kW	do 30.06.2005	do 31.12.2005	po 31.12.2010	po 31.12.2011
RL A	Lokomotywy 130–560 kW	do 31.12.2005	po 31.12.2006		
RH A	Lokomotywy > 560 kW	po 31.12.2007	po 31.12.2008		
R B	Lokomotywy > 130 kW			po 31.12.2010	po 31.12.2011

RC – pojazdy szynowe, R – zastosowania szynowe, RL – lokomotywy małej mocy, A – Stage III A, RH – lokomotywy dużej mocy, B – Stage III B

emisji składników toksycznych podano w tabeli 3. Przepisów nie stosuje się do lokomotyw specjalnych (eksploatowanych w rafinerii lub kopalni) i silników trakcyjnych o mocy użytecznej poniżej 100 kW. Limity UIC I obowiązywały dla wszystkich silników do 31.12.2002 r., natomiast od 1.01.2003 r. (UIC II) obowiązuje podział na silniki o mocy do 560 kW i powyżej tej wielkości. Zmianie uległy mierzone składniki spalin. Zrezygnowano z pomiaru zadyminienia spalin, uwzględniając obecnie w UIC II (tak jak w przypadku norm Euro) pomiar emisji cząstek stałych. Na uwagę zasługuje fakt, że limity UIC od 2008 r. będą zbliżone do limitów etapu IV norm Euro.

Tabela 3

## Limity emisji spalin (lokomotywy > 560 kW) według UIC i ich porównanie do przepisów europejskich [7, 11]

Norma emisji	Obowiązuje	NO <sub>x</sub>	HC	CO	PM
UIC 1	do 31.12.2002	12	0,8	3,0	FSN = 1,6
UIC 2	po 31.12.2002	9,5/9,9	0,8	3,0	0,250
Stage III A	po 31.12.2008	6,0*	0,5*	3,5	0,200
Stage III B (C1)	po 31.12.2011	4,0 (kombinacja)		3,5	0,025

\*  $P > 2000 \text{ kW}$ ,  $V_c > 5 \text{ dm}^3$ ;  $\text{NO}_x = 7,4 \text{ g/(kW-h)}$ ;  $\text{HC} = 0,4 \text{ g/(kW-h)}$

C1 – inny typ testu badawczego, FSN – filter smoke number

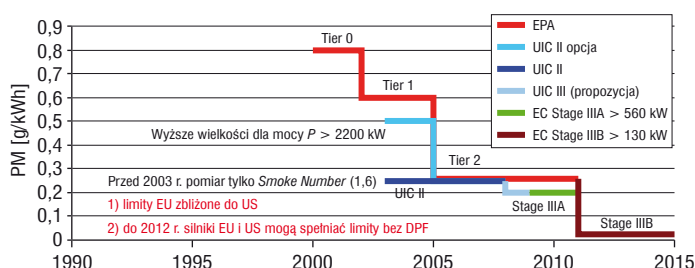
Wielkość emisji i skład cząstek stałych zależy w znacznym stopniu od miejsca w układzie: cylinder–układ wylotowy–atmosfera, dlatego ważnym aspektem jest określenie miejsca i warunków pomiaru tej emisji. Cząstki stałe powstają wskutek procesów chemicznych i fizycznych (których przebiegu do końca nie rozpoznano) zachodzących często równocześnie w różnych miejscach i czasie. Z tego powodu część frakcji gazowej węglowodorów może po wykropleniu zwiększyć emisję cząstek stałych kosztem zmniejszenia emisji węglowodorów.

Wobec coraz bardziej rygorystycznych przepisów prawnych, ograniczających emisję związków szkodliwych, ograniczenie emisji cząstek stałych stało się poważną barierą rozwoju silników o zapłonie samoczynnym. W wyniku lokalnego niedoboru powietrza, w komorze spalania powstaje sadza absorbująca węglowodory i związki nieorganiczne: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i kwasy siarkowe. Sama sadza nie stanowi zagrożenia dla organizmu człowieka, niebezpieczne są związki znajdujące się na jej powierzchni – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, węglowodory pochodzące z niespalonego paliwa i oleju smarującego.

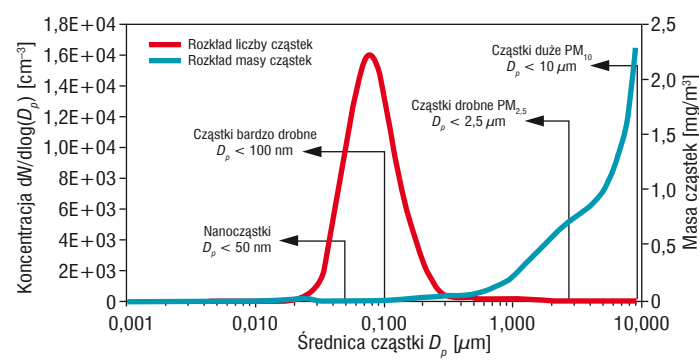
W zakresie wymagań dotyczących silników spalinowych pojazdów szynowych do 2003 r. obowiązywał jedynie pomiar zaciemnienia spalin, realizowany metodami absorpcyjnymi. Wielkość dopuszczalnego zaciemnienia spalin określono na poziomie FSN = 1,6 (rys. 3). Obecnie pomiar taki nie jest wystarczający i metodyka homologacji przewiduje pomiary właściwej emisji cząstek stałych. Pomiar masy PM realizowany jest za pomocą

metody grawimetrycznej polegający na pomiarze różnicy masy filtra po i przed pomiarem. Amerykańskie normy Tier przewidują pomiar emisji PM i ich wielkości dopuszczalne są znacznie mniej rygorystyczne niż limity UIC. Jednakże norma Tier 2 jest zbliżona limitami emisji do norm UIC. Poziom emisji PM znacznie poniżej 0,1 g/kWh, który ma obowiązywać od 2012 r. będzie możliwy do spełnienia jedynie po zastosowaniu filtrów cząstek stałych w układach wylotowych silników o zapłonie samoczynnym.

Obecne limity emisji cząstek stałych dotyczą pomiaru ich masy. Wkrótce zaczną obowiązywać wymagania dotyczące również pomiaru liczby cząstek stałych. Z analizy rozkładu cząstek wynika, że znaczna ich liczba przypada na cząstki o małych średnicach (poniżej 0,1 μm), co przedstawiono na rysunku 4. Obecne pomiary dotyczące masy cząstek pozwalają na pomiary tylko „dużych” cząstek o wymiarach średnic około 10 μm.



Rys. 3. Europejskie i amerykańskie wymagania dotyczące emisji cząstek stałych z silników spalinowych pojazdów szynowych [10]



Rys. 4. Rozkład wielkości cząstek stałych – silnik ZS [13]

## Silniki spalinowe lekkich pojazdów szynowych

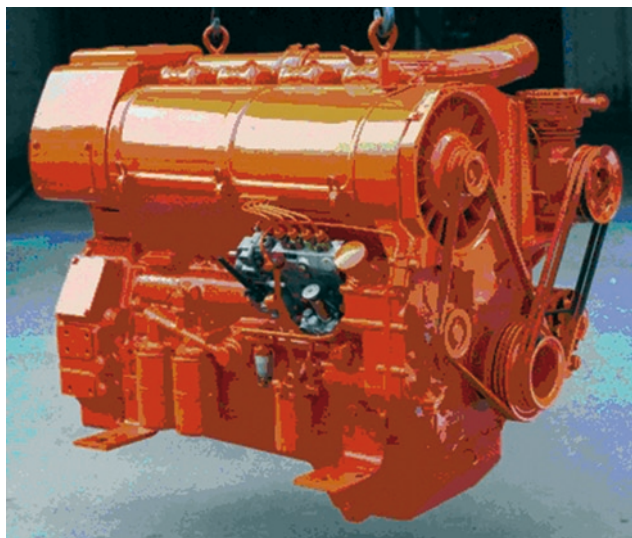
Silniki spalinowe lokomotyw spalinowych to głównie wystużone silniki dużej mocy. Silniki te w zasadzie często nie spełniają limitów emisji składników toksycznych i często podlegają regulacjom lub naprawom głównym w celu poprawy ich parametrów ekologicznych. Nieco inaczej przedstawia się sytuacja w zakresie silników lekkich pojazdów szynowych, w tym autobusów. Wykorzystuje się w nich silniki pojazdów typu *heavy duty* – obciążone

silniki wysokoprężne o pojemnościach skokowych nieprzekraczających 25 dm<sup>3</sup>.

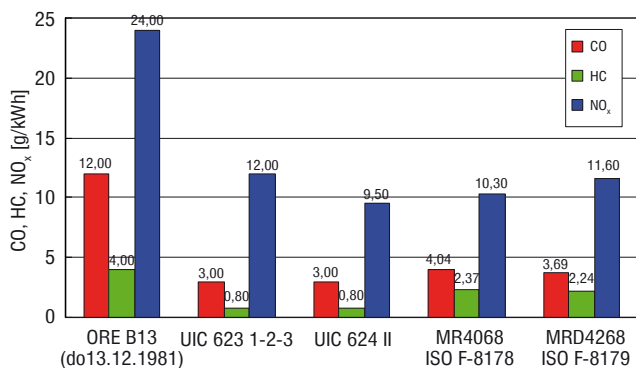
Przykłady takich pojazdów przedstawiono poniżej wraz z wynikami badań ich emisji. Pomiaru emisji spalin dokonano w czasie jazdy, ze względu na wyposażenie tych pojazdów w przekładnię hydrokinetyczną. Wykorzystanie tego typu napędu eliminuje możliwość badań stacjonarnych; zasilanie układu pomiarowego odbywa się z wnętrza pojazdu szynowego za pośrednictwem małych zespołów prądowców.

## ■ Dwuczłonowy zespół spaliny typu MR/MRD

– badany w ruchu w IPS „Tabor” Poznań (rys. 5)



12-cyl., V90;  $V_{ss} = 19,144 \text{ dm}^3$ ;  $N_e = 239 \text{ kW}$ ;  $g_e = 216 \text{ g/(kWh)}$



Rys. 5. Wyniki badań emisji spalin dla dwóch silników F12L413F zespołu szynowego MR/MRD [16]

## ■ Trójczłonowy zespół spaliny typu Y

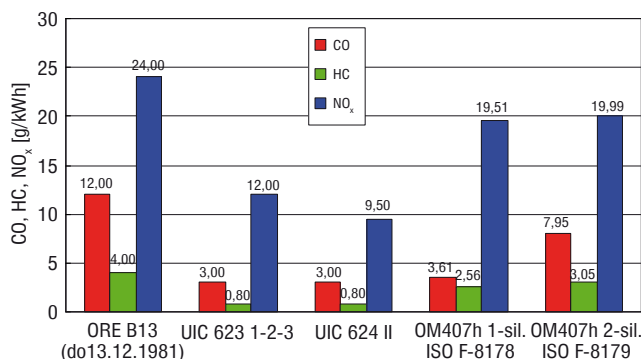
– badany w ruchu w IPS „Tabor” Poznań (rys. 6)

Przedstawione wyniki emisji ze spalinyowego zespołu trakcyjnego typu MR poziomem emisji jest zbliżony do wymagań UIC, jednak obserwuje się znaczne przekroczenie dopuszczalnych wielkości emisji węglowodorów. Spaliny zespół trakcyjny typu Y ma znacznie przekroczone limity emisji według normy UIC.

Jednakże oba te zespoły trakcyjne mogą obecnie wykorzystywać pozasilnikowe układy oczyszczania spalin. Ze względu na konstrukcję tych silników możliwe byłoby zastosowanie układów utleniających reaktorów katalitycznych spalin. Wymusza to jednak



Podpodtłogowy, R6;  $V_{ss} = 11,967 \text{ dm}^3$ ;  $D = 128 \text{ mm}$ ;  $S = 155 \text{ mm}$ ,  
 $N_e = 147 \text{ kW}/2200 \text{ obr./min}$ ;  $M_o = 716 \text{ Nm}/1400 \text{ obr./min}$ ;  
 $g_e = 232 \text{ g/(kWh)}$



Rys. 6. Wyniki badań emisji spalin dla dwóch silników OM407h spalinyowego zespołu trakcyjnego typu Y [15]

zastosowanie odpowiedniej jakości paliw, co omówiono wcześniej.

Specyfika silników spalinyowych lokomotyw użytkowanych na liniach kolejowych w USA jest znacząco odmienna od specyfikacji europejskich (rys. 7). W Stanach Zjednoczonych eksploatuje się obecnie 21 000 lokomotyw spalinyowych o średniej mocy 3467 KM. Znaczna większość lokomotyw (61%) ma zainstalowane silniki o mocach 4000–4400 KM. Silniki spalinyowe budowane są jako średnioobrotowe o dużych pojemnościach skokowych (np. silniki firmy GE o mocy 4400 KM). Współczesne europejskie konstrukcje to silniki wysokoobrotowe o względnie niewielkich pojemnościach skokowych. Silniki o mocach powyżej 2700 KM stanowią tylko 9%. Silniki o małych mocach (17–750 KM) stanowią około 28% udziału w rynku. Pozostałe 63% to silniki o średnich mocach w zakresie 750–2700 KM [10]. Ze względu na większe pojemności skokowe i mniejsze prędkości obrotowe silników lokomotyw eksploatowanych w USA emisja z tych silników może być na niższym poziomie. Głównie dotyczy to emisji tlenków azotu (niższe temperatury spalania, a szczególnie frontu płomienia) oraz możliwość precyzyjnego sterowania dawkowaniem paliwa (istotnym aspektem jest czas potrzebny do spalania dawki paliwa). Mimo korzystniejszych warunków pracy silników lokomotyw w USA, znacznie wcześniej podjęto próbę ograniczenia przez nie emisji cząstek stałych. Pierwsze próby zastosowania fil-

trów wymusiła EPA wprowadzając restrykcyjne przepisy dotyczące emisji spalin z pojazdów pozadrogowych. W Europie próby zastosowania filtrów cząstek stałych podjęto w Szwajcarii i Niemczech (lata 2004–2006).

## Pozasilnikowe metody oczyszczania spalin

### Reaktor utleniający

Zasada działania utleniającego reaktora katalitycznego (DOC – *diesel oxidat catalyst*) polega na tym, iż zawarty w nim katalizator doprowadza związki zawarte w spalinach do reakcji chemicznej, której efektem jest uzyskanie nieszkodliwych składników spalin (woda, dwutlenek węgla). Katalizatorami są zazwyczaj platyna lub pallad, umieszczone wewnątrz urządzenia biorą udział w reakcjach chemicznych, nie ulegając przemianie chemicznej.

Wewnątrz metalowej obudowy, odpornej na uszkodzenia mechaniczne i korozję, znajduje się nośnik ceramiczny lub metalowy (rys. 8). Nośnik ceramiczny jest najczęściej wykorzystywany do produkcji reaktorów katalitycznych, natomiast metalowy wykorzystuje się do współpracy z silnikami o dużej mocy. Jest to podyktowane wysoką temperaturą gazów spalinowych, gdyż metal jest bardziej odporny na wysokie temperatury, szybciej się pobiera i oddaje ciepło.

Wykorzystanie reaktora utleniającego powoduje redukcję węglowodorów i tlenku azotu o około 70%, natomiast ze względu na ograniczenie emisji HC, emisja cząstek stałych może również ulec zmniejszeniu o 20%. Stosowane paliwo powinno zawierać do 500 ppm siarki.

### Filtry cząstek stałych – DPF

Cząstki stałe to przede wszystkim sadze oraz kondensujące na nich siarczany, ciężkie węglowodory – ciekłe frakcje organiczne.

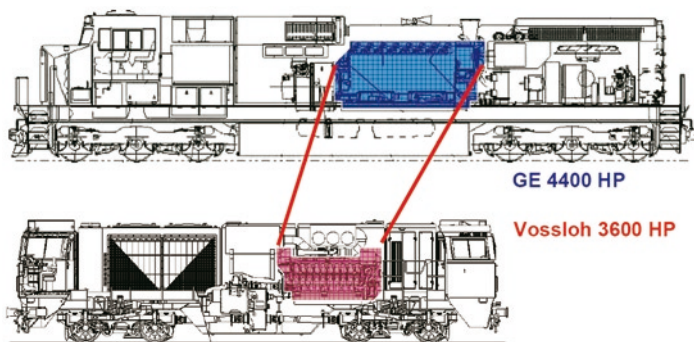
Filtry sadzowe (DPF – *diesel particulate filter*) w silnikach ZS umożliwiają znaczną redukcję cząstek stałych PM, które należy w pierwszej kolejności oddzielić od gazów (rys. 9), a następnie zgromadzone cząstki powinny ulec spalaniu w temperaturze około 600°C [18].

Regeneracja filtrów polega na wypalaniu przechwyconych cząstek. Proces regeneracji następuje zazwyczaj po przekroczeniu założonej różnicy ciśnień (spowodowanej zwiększeniem się oporów przepływu) przed i za filtrem. Ponieważ spalanie cząstek jest możliwe w temperaturze 600°C, a temperatura spalin silnika w tym miejscu osiąga średnio 250–300°C, konieczne jest czasowe podniesienie jej w filtrze lub obniżenie temperatury spalania cząstek przez zastosowanie reaktorów katalitycznych. Filtry monolityczne regeneruje się poprzez dostarczenie do filtra dodatkowej ilości ciepła (np. za pomocą palnika) wystarczającej do wytworzenia i utrzymania odpowiedniej temperatury.

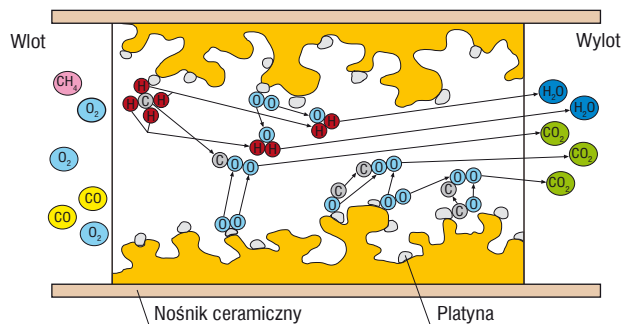
### System CRT

System CRT (*continuous regeneration trap*) jest to połączenie reaktora Oxicat i filtra cząstek stałych (rys. 10). W systemie tym, stosując paliwo o zawielkości siarki poniżej 50 ppm, można uniknąć kosztownego systemu regeneracji filtra, ponieważ następuje samoregeneracja już w temperaturze między 240 a 450°C. Redukcję emisji związków toksycznych (dzięki zastosowaniu tego rozwiązania) przedstawiono na rysunku 11.

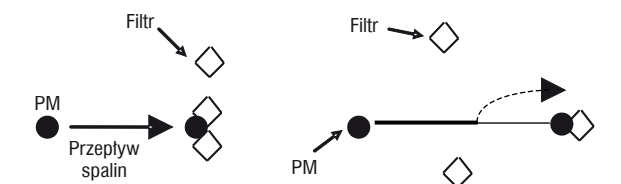
Reaktor utleniający powoduje utlenianie CO i HC do CO<sub>2</sub> oraz H<sub>2</sub>O. Jednocześnie część tlenków azotu jest utleniana do NO<sub>2</sub>. Utlenione NO<sub>2</sub> reagując z węglem z filtra powoduje jego utlenia-



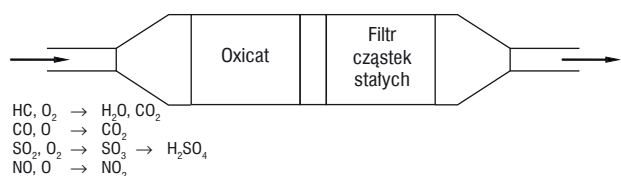
Rys. 7. Wielkości silników montowanych w lokomotywach amerykańskich i europejskich [10]



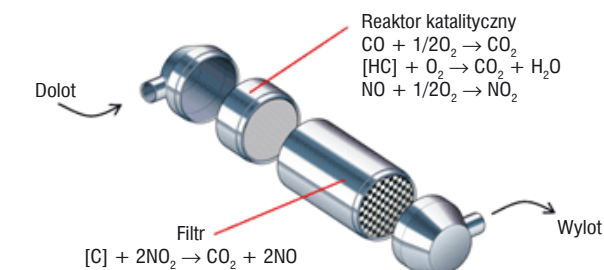
Rys. 8. Zasada działania utleniającego reaktora katalitycznego [17]



Rys. 9. Mechanizm filtrowania cząstek stałych [18]



Rys. 10. Schemat systemu CRT [4]

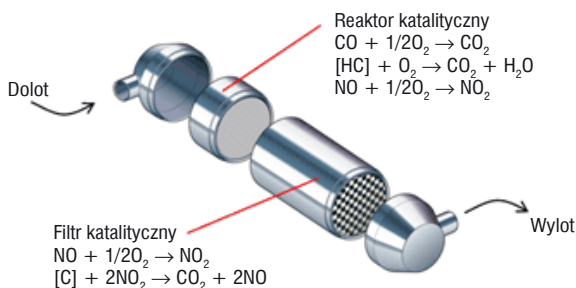


Rys. 11. Reakcje utleniania w systemie ciągłej regeneracji filtra (CRT) [6]

nie do CO<sub>2</sub> oraz jednocześnie „produkcję” tlenków azotu. Powoduje to samooczyszczanie filtra cząstek stałych.

Nowszym rozwiązaniem jest dodatkowa „produkcja” dwutlenku azotu w filtrze cząstek stałych. Filtr dodatkowo wyposaża się w układ reaktora katalitycznego pozwalającego na dodatkowe reakcje utleniania NO w celu zwiększenia sprawności oczyszczania

filtra cząstek stałych. System ten nosi nazwę CCRT (*catalysed CRT*) i jest przedstawiony na rysunku 12.

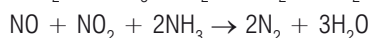
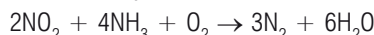
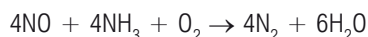


Rys. 12. Schemat układu CCRT [6]

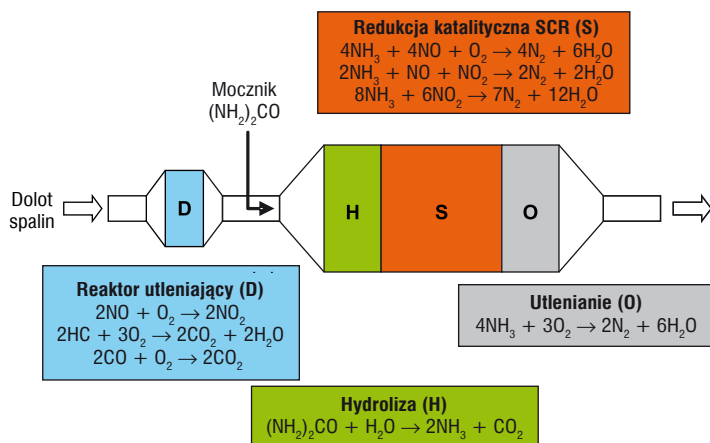
## Układy selektywnej redukcji katalitycznej – SCR

Selektywna katalityczna redukcja tlenków azotu (SCR- $\text{NO}_x$ ) jest obecnie podstawowym sposobem zmniejszenia emisji tych składników w silnikach spalinowych dużej mocy. Jako reduktory są stosowane najczęściej amoniak  $\text{NH}_3$  (SCR- $\text{NH}_3$ ) i inne związki zawierające azot, węglowodory nasycone i nienasycone o krótkim łańcuchu (SCR-HC), alkohole, itp. Selektywna katalityczna redukcja musi być efektywna w warunkach obecności dużego stężenia tlenu oraz dwutlenku siarki.

Amoniak wprowadzony przed reaktorem do strumienia gazów spalinowych w wyniku reakcji w obecności tlenu umożliwia zmniejszenie emisji  $\text{NO}_x$  o 90–95% [2, 3], wskutek reakcji:

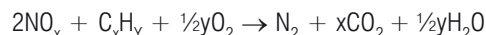


Powszechnie stosowane reaktory SCR- $\text{NH}_3$ , do redukcji  $\text{NO}_x$  za pomocą amoniaku, to reaktory oparte na  $\text{TiO}_2$  jako składnika warstwy pośredniej i  $\text{V}_2\text{O}_5$  jako składnika warstwy aktywnej [5]. W skład może wchodzić także  $\text{SiO}_2$ , a część  $\text{V}_2\text{O}_5$  może być zastąpiona przez  $\text{WO}_3$  lub  $\text{MoO}_3$ . Główną zaletą tego reaktora jest jego duża odporność na szkodliwe oddziaływanie tlenków siarki w warunkach eksploatacyjnych. Schemat działania systemu selektywnej redukcji katalitycznej przedstawiono na rysunku 13.



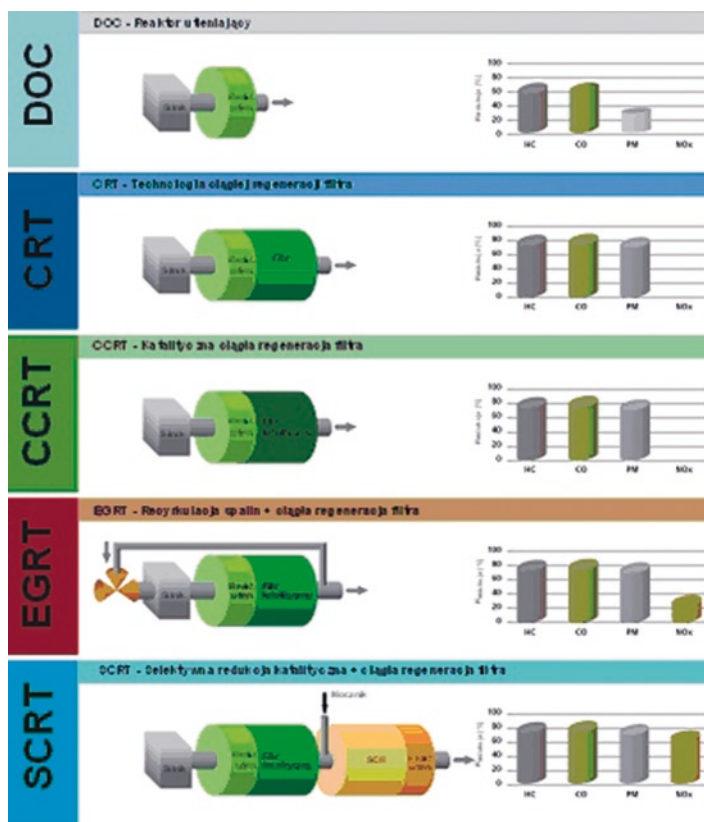
Rys. 13. Schemat układu SCR [19]

Proces konwersji  $\text{NO}_x$  zachodzi w warunkach nadmiaru tlenu w obecności węglowodorów, np. propenu, propanu, etylenu. W związku z tym, węglowodory są obiecującymi alternatywnymi reduktorami w stosunku do amoniaku. Proces ten przebiega według następującej reakcji:



Reduktorami mogą być węglowodory, począwszy od etanu aż do cetanu. Stosuje się także związki organiczne zawierające tlen, np.: alkohole (metanol, etanol) oraz ketony.

Przedstawione metody ograniczania emisji składników szkodliwych nie wyczerpują zagadnienia i możliwości zastosować rozwiązań łączonych. Na rysunku 14 przedstawiono typowe rozwiązania stosowane w silnikach spalinowych pojazdów typu HDV



Rys. 14. Zestawienie sposobów redukcji emisji wraz z typowymi efektami obniżenia poszczególnych składników szkodliwych spalin [6]

(*heavy duty vehicles*) – pojazdów z wysokoobciążonymi silnikami o zapłonie samoczynnym, do których należy zaliczyć spalinowe pojazdy szynowe (w tym lokomotywy spalinowe).

## Podsumowanie

Wprowadzanie przepisów ograniczających emisję substancji toksycznych ze źródeł pozadrogowych do środowiska naturalnego zmusza do stosowania w układach wylotowych dodatkowych urządzeń oczyszczających spaliny. W większości obecnie nowo produkowanych silnikach do pojazdów szynowych (w tym lokomotyw) są wprowadzane rozwiązania konstrukcyjne niewystarczające do spełniania limitów emisji spalin. Konieczne staje się więc wykorzystanie innych rozwiązań. Kompleksowe działania w celu ograniczenia emisji składników toksycznych mogą polegać na

modyfikacji układu spalania, zastosowaniu układów oczyszczania spalin i stosowaniu odpowiednich paliw:

- spalanie:
  - EGR (niskociśnieniowy),
  - zmiana parametrów wtrysku paliwa, zmiana technologii (wtryskiwacze piezoelektryczne),
  - optymalizacja doładowania,
  - optymalizacja chłodzenia silnika;
- oczyszczanie spalin:
  - filtr cząstek stałych (DPF),
  - kombinacja reaktorów utleniających i filtrów DPF,
  - selektywna redukcja katalityczna (SCR),
  - absorbery NO<sub>x</sub>;
- paliwa:
  - lepszej jakości paliwo (ograniczana zawielkość siarki do poziomu 500 ppm lub docelowo do poziomu 50 (150 ppm),
  - paliwa alternatywne (CNG, LNG, Biodiesel).



## Literatura

- [1] Balon T.: *Locomotive Emissions Assessment and Diesel Emission Reduction Options*. New England Railroad Club Expo 2006, Boston 2006.
- [2] Bayhan M.: *Exhaust emission control and catalytic conversion*. KONES'97, Szczyrk-Bielsko-Biała 1997.
- [3] Christoffersen P., Frederiksen S., Mikkelsen S.: *Progress in SCR De-NOx and silencing technology for diesel engine exhaust systems*. FISITA F98CIM1, Paris 1998.
- [4] *Cornnig Technical Seminar Diesel – Environmental Products Division*. Wiesbaden. 2002.
- [5] Delarue C.: *Diesel car engines – the feasibility of very low exhaust emission*. Renault SA. FISITA F98P015, Paris 1998.
- [6] Diesel retrofit emissions control solutions. [www.jmcatlysts.com](http://www.jmcatlysts.com). Pensylwania 2008.
- [7] Directive 2004/26/EC of the European Parliament and of the Council amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. 21.04.2004.
- [8] Dyrektywa 97/68/EC Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstwa państw członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojedźnych nieporuszających się po drogach. 16.12.1997.
- [9] Halder M.: *Rail Diesel Study. Introduction and Presentation of WP 1 results*. Final Workshop. Paris 2006.
- [10] Iden M.: *Engines of Change. Progress and Challenges in Reducing Exhaust Emissions from North American Diesel Locomotives*. American Society of Mechanical Engineers, California 2006.
- [11] Karta UIC 623-2, *Badania homologacyjne silników spalinowych pojazdów napędowych*. Wyd. 3, kwiecień 2005.
- [12] Karta UIC 624 *Badanie emisji gazów wydechowych silników spalinowych trakcyjnych*. Wyd. 2, kwiecień 2003.
- [13] Kittelson D.: *Engines and Nanoparticles: A Review*, Journal of Aerosol Science. No. 29, 1998.
- [14] Kruczyński S., Bielińska A., Przytuski J.: *Problemy katalitycznego ograniczenia emisji tlenków azotu w silnikach o zapłonie samoczynnym*. Materiały niepublikowane, Warszawa 1997.
- [15] Marciniak Z., Pielecha I.: *Protokół z badań toksyczności spalin silników zespołu trakcyjnego typu Y*. Opracowanie IPS „Tabor”, Poznań 2008.
- [16] Marciniak Z., Pielecha I.: *Protokół z badań toksyczności spalin zespołu trakcyjnego typu MR/MRD*. Opracowanie IPS „Tabor”, Poznań 2007.
- [17] Materiały firmy Volkswagen, 2007.
- [18] Merkisz J.: *Emisja cząstek stałych przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [19] [www.handling-adblue.co.uk](http://www.handling-adblue.co.uk)



## Prenumerata 2008

Krajowa za 1 egz. ● kwartalna – 60,00 zł ● półroczna – 120,00 zł  
● roczna – 240,00 zł

Ze zleceniem wysyłki za granicę\*

Europa (poczta zwykła) ● roczna – 87,00 euro/egz.  
(poczta lotnicza) ● roczna – 96,00 euro/egz.  
poza Europę (poczta lotnicza) ● roczna – 132,00 USD/egz.

\* W przypadku innych walut obowiązują kursy przeliczeniowe w dniu dokonania wpłaty.

Prenumeratę z wysyłką za granicę można opłacić także w Polsce w złotych, według aktualnego przelicznika walut.

Konto bankowe PKO BP I O/Łódź 08 1020 3352 0000 1802 0012 8074  
EMI-PRESS, 91-360 Łódź, ul. Motylowa 3/25

Korespondencja EMI-PRESS 90-955 Łódź 8, skrytka pocztowa 103  
tel./fax 042 633 37 51, e-mail: [swiatkolei@emipress.com.pl](mailto:swiatkolei@emipress.com.pl)