

WPŁYW PALIWA ZANIECZYSZCZONEGO CHLOREM NA TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW KONTROLI EMISJI NO_x W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

W artykule podjęto temat oceny wpływu paliwa, celowo zanieczyszczonego chlorem, na elementy kontroli emisji tlenków azotu NO_x w silniku z zapłonem samoczynnym. Jakość stosowanego paliwa ma kluczowe znaczenie dla bezawaryjnej pracy silnika. Do zanieczyszczenia paliwa może dojść głównie na etapie transportu lub przechowywania.

Główną uwagę zwrócono na wymiennik ciepła (chłodnicę spalin) EGR, służący recyrkulacji spalin, będąc jednym ze sposobów ograniczenia emisji szkodliwych tlenków azotu. Badania prowadzono w warunkach laboratoryjnych (testy stanowiskowe) w cyklach badawczych składających się z czterech faz. Zastosowano paliwo celowo zanieczyszczone chlorem. Czas trwania badania wyniósł 250 godzin i został przerwany momencie wystąpienia awarii silnika i pojawienia się osadów na wymienniku ciepła EGR. W artykule przedstawiono wyniki badań składu chemicznego osadów, zastosowane metody analizy chemicznej oraz zidentyfikowano źródła i przyczynę pojawienia się osadów.

WSTĘP

Silniki o zapłonie samoczynnym (ZS) są obecnie szeroko stosowane zarówno w transporcie osobowym, towarowym, rolnictwie, jak i przemyśle. Ich główną zaletą jest wysoka wydajność spalania paliwa [1]. Z drugiej strony silniki ZS są istotnym źródłem zanieczyszczenia środowiska, stanowiąc zagrożenie dla zdrowia ze względu na wysoką emisję cząstek stałych (sadzy) oraz tlenków azotu (NO_x) [1-3]. Zaostrzające się regulacje prawne, dotyczące emisji szkodliwych dla zdrowia związków, między innymi tlenków azotu, tlenku węgla, węglowodorów, cząstek stałych i innych, powstających w wyniku spalania paliwa w silniku, skutkują coraz bardziej restrykcyjnymi normami emisyjnymi, a co za tym idzie - potrzebą rozwijania i poprawy metod redukcji powstawania tych związków [4-7]. Związkami, które ze względu na swoją szkodliwość są głównym celem zaostrzających się norm emisyjnych, są tlenki azotu i cząstki stałe [4].

Współcześnie znane są rozwiązania konstrukcyjne stosowane w silnikach, wpływające na zmniejszenie emisji sadzy, NO_x i innych szkodliwych gazów, dodatkowo wprowadzane są alternatywne dla oleju napędowego paliwa silnikowe.

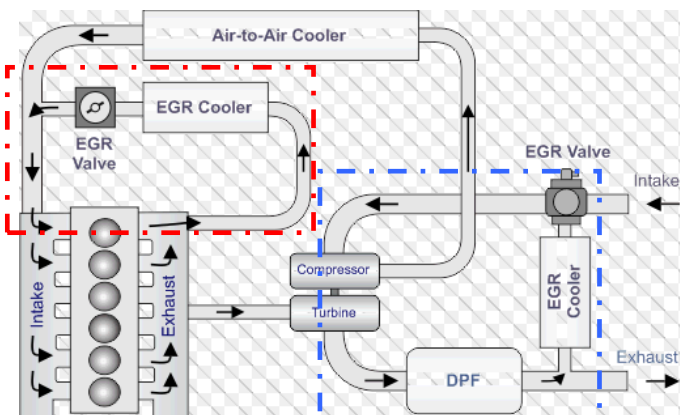
1. MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA EMISJI NO_x

1.1. Zastosowanie układu EGR

Temat związany z redukcją tlenków azotu i cząstek stałych jest szeroko badany i opisywany przez wielu naukowców [1].

W przypadku redukcji emisji tlenków azotu bardzo istotną sprawą jest ograniczenie emisji w miejscu powstawania spalin [4]. Największe zastosowanie w tym przypadku ma układ EGR (ang. Exhaust Gas Recirculation) [8]. Jest to równocześnie jedna z najbardziej wydajnych niekatalitycznych metod redukcji NO_x, powstałych podczas spalania paliwa [2,3]. Schemat silnika o zapłonie samoczynnym z zastosowanym układem EGR został przedstawiony na Rys. 1.

Głównymi czynnikami wpływającymi na wielkość emisji tlenków azotu i cząstek stałych są: wysoka temperatura oraz środowisko bogate w tlen [1,2,6,8,9]. Zadaniem układu EGR jest umożliwienie procesu recyrkulacji spalin do kolektora dolotowego w kontrolowanych warunkach (kontrolowany przepływ gazu). Recyrkulacja spalin polega na mieszaniu części spalin z powietrzem dolotowym zasilaającym silnik oraz poddaniu tej mieszaniny procesowi ponownego spalania. Dzięki temu następuje pełniejsze spalanie paliwa, obniżenie temperatury gazów oraz zmniejszenie w nich stężenia tlenu. Skutkiem tego procesu jest zredukowanie emisji NO_x [1,2,5,8,10]. Wydajność redukcji emisji tlenków azotu zależy od stopnia recyrkulacji spalin do komory spalania silnika, czyli od stopnia otwarcia zaworu EGR [2,4,5,8,9]. Większe otwarcie zaworu EGR powoduje wzrost ilości recyrkulowanych spalin trafiających do kolektora dolotowego [4], a największy stosowany udział spalin w ładunku świeżego powietrza (EGR) w silnikach ZS wynosi ok. 50%. W pewnych punktach pracy silnika odpowiednio dobrany udział spalin (EGR) może spowodować również zmniejszenie zużycia paliwa [2].



Rys. 1. Schemat silnika z oznaczonymi układami EGR: wysokociśnieniowym (kolor czerwony) oraz niskociśnieniowym (kolor niebieski) (źródło: https://www.dieselnet.com/tech/engine_egr.php)

W nowoczesnych silnikach ZS w pojazdach osobowych stosowane są obecnie dwa, mogące pracować jednocześnie, układy EGR.

Pierwszy z nich, tzw. EGR wysokociśnieniowy (HP-EGR), jest rozwiązaniem klasycznym, w którym część spalin z kolektora wylotowego kierowana jest przez wymiennik ciepła (chłodnicę) z powrotem do kolektora dolotowego. Zaletą takiego rozwiązania jest krótki czas zwłoki w dotarciu spalin do komory spalania oraz możliwe skrócenie fazy nagrzewania silnika. Wadą rozwiązania jest natomiast duże zanieczyszczenie układu dolotowego produktami niekompletnego i niepełnego spalania, zawartymi w gazach spalinyowych oraz utrata części energii spalin wykorzystywanej do napędu turbosprężarki.

W drugim układzie EGR, tzw. niskociśnieniowym (LP-EGR), spaliny pobierane za filtrem cząstek stałych (DPF) kierowane są na wlot powietrza do turbosprężarki, a następnie tak przygotowana mieszanina spalin i powietrza doładowującego służy do zasilania silnika. Zaletą powyższego rozwiązania jest brak utraty części energii spalin do napędu turbosprężarki, a więc możliwe jest zwiększenie sprawności ogólnej silnika. Inną zaletą jest duża czystość spalin (pobieranych za filtrem DPF), natomiast wadą układu jest m.in. długi czas dotarcia spalin do komory spalania oraz erozyjne działanie związków chemicznych obecnych w spalinach na wirnik turbosprężarki.

Ze względu na swoją funkcję i styczność z gorącymi spalinami wymiennik ciepła EGR musi być wykonany z odpowiedniego materiału i posiadać odpowiednią konstrukcję [2]. Najczęściej stosowanymi materiałami do budowy układu EGR są stopy aluminium, przy czym wymiennik ciepła jest dodatkowo chłodzony cieczą chłodzącą silnika.

Nieodpowiedniej jakości lub zanieczyszczone paliwo może być źródłem agresywnych związków, powstających podczas spalania, a w następstwie powodować korozję lub powstawanie zanieczyszczeń wpływających np. na pracę wtryskiwaczy. Korozja materiałów jest procesem niepożądanym, ponieważ powoduje niszczenie materiałów, co jest przyczyną uszkodzenia elementów układu silnika [11].

1.2. Jakość stosowanych paliw i paliwa alternatywne

Wiele badań prowadzonych jest również nad parametrami różnych paliw: konwencjonalnych, alternatywnych, biopaliw i biododatków, ich zachowaniem podczas spalania oraz charakterystyką emisji [3]. Bardzo silny wpływ na spalanie paliwa i charakterystykę emisji mają: lotność paliwa, zawartość tlenu w paliwie, liczba cetanova i ciepło spalania [7].

Wśród paliw alternatywnych, mogących mieć zastosowanie w motoryzacji wymienić można między innymi metanol i etanol. Wyższe alkohole charakteryzują się lepszymi właściwościami fizycznymi i termodynamicznymi [7]. Dodatek pentanolu do paliwa może wpływać na efektywność utlenienia sadzy, nie wpływając równocześnie na emisję tlenków azotu i węglowodorów [9]. Z drugiej strony potwierdzono, że zastosowanie jako paliwa estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych (ang. *Fatty Acids Methyl Esters*, FAME) powoduje zwiększenie emisji NO_x [3].

Niezależnie od rodzaju zastosowanego paliwa, jego jakość ma kluczowe znaczenie dla bezawaryjnej pracy silnika [11-14]. Na jakość paliwa w głównej mierze ma wpływ proces przetwarzania ropy naftowej, ale zanieczyszczenie paliwa może nastąpić na etapie transportu do baz magazynowych, a następnie do stacji paliw lub podczas przechowywania [14]. Badania paliw prowadzi się głównie pod kątem wydajności spalania i rodzajem oraz ilością emitowanych związków, natomiast ocenę jakościową prowadzi się pod kątem spełnienia normy PN-EN 590 [15].

Głównymi zanieczyszczeniami oleju napędowego, pochodzenia zewnętrznego, są zanieczyszczenia mechaniczne lub zanieczyszczenia pierwiastkami wymywanymi np. ze zbiorników, w których jest przechowywane lub transportowane paliwo. Pierwiastki obce ze zbiorników mogą pochodzić z materiału zbiornika lub być pozostałością po wcześniej przechowywanej substancji.

W normie PN-EN 590 w zakresie zawartości pierwiastków postawiono wymagania jedynie co do zawartości siarki ($\leq 10,0$ mg/kg) i manganu ($\leq 2,0$ mg/L) [15]. Dodatkowo, w przypadku FAME, stosowanego jako biopaliwo lub biokomponent do oleju napędowego, normowana jest zawartość fosforu ($\leq 4,0$ mg/kg), sumy sodu i potasu ($\leq 5,0$ mg/kg) oraz sumy wapnia i magnezu (≤ 530 mg/kg). Stężenia pozostałych pierwiastków nie są limitowane żadnymi normami ani wytycznymi, stwierdzono jednak, że podwyższone zawartości krzemu, sodu lub cynku mają negatywny wpływ na układ wtryskowy nowoczesnych silników z zapłonem samoczynnym. Obecność tych pierwiastków w paliwie powoduje korozję elementów układu oraz powstawanie osadów w podwyższonej temperaturze [12,13]. Z powyższych powodów istotne jest kontrolowanie jakości paliwa w szerszym, niż przewidziany w normie, zakresie.

W Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL przebadano na potrzeby własne kilkaset różnych paliw, w szczególności olej napędowy bez dodatków (B0), olej napędowy z 7% dodatkiem FAME (B7), olej napędowy z 10% FAME (B10) oraz czyste FAME jako biokomponent (B100). Typowe zawartości pierwiastków w paliwach i biopaliwach przedstawiono w tabeli 1 [12]. Z przedstawionego zestawienia wynika, że typowa zawartość poszczególnych pierwiastków w nie zanieczyszczonych paliwach kształtuje się poniżej 1 mg/kg. Takie stężenie pierwiastków nie powinno powodować problemów z pracą silnika. W niektórych olejach napędowych obserwowano wyższe stężenia niektórych pierwiastków (sodu, fosforu, krzemu), co z kolei przekładało się na powstawanie osadów na wtryskiwaczach i pogorszenie osiągnięć silnika w badaniach stanowiących.

Tab. 1. Zawartość pierwiastków w paliwach [12]

Pierwiastek	B0 (n=96)	B7 (n=207)	B10 (n=66)	B100 (n=10)
	min ÷ max [mg/kg]			[mg/kg]
Zn	0,10 ÷ 0,47	0,10 ÷ 0,64	0,10 ÷ 0,58	0,76 ± 0,27
Al	0,10 ÷ 0,20	0,10 ÷ 0,58	0,24	< 0,1
B	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ba	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ca	0,11 ÷ 0,15	0,10 ÷ 0,43	0,10 ÷ 0,13	0,17 ± 0,09
Cr	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Cu	0,10 ÷ 0,81	0,10 ÷ 0,72	0,10 ÷ 0,74	0,13 ± 0,04
Fe	0,11 ÷ 0,32	0,19 ÷ 0,25	< 0,1	< 0,1
K	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Mg	0,10	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mn	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mo	< 0,5	< 0,5 ÷ 0,75	< 0,5	< 0,5
Na	0,42 ÷ 2,8	0,16 ÷ 2,4	0,29 ÷ 1,7	6,3 ± 1,3
Ni	< 0,5	< 0,5 ÷ 0,59	0,56	< 0,5
P	0,10 ÷ 1,7	0,11 ÷ 1,5	0,14 ÷ 1,3	2,8 ± 1,0
Pb	0,13 ÷ 0,94	0,10 ÷ 1,4	0,13 ÷ 0,33	< 0,1
Si	0,12 ÷ 1,6	0,10 ÷ 1,0	0,11 ÷ 0,57	< 0,1
Sn	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ti	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
V	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

2. CEL BADAŃ

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu paliwa zanieczyszczonego chlorem na elementy silnika, w tym układ recyrkulacji spalin EGR. Zawartość chloru nie była dotąd monitorowana w stosowanych paliwach, jednak ze względu na charakter kwasotwórczy, podobnie jak siarka, obecność chloru paliwie, a co za tym idzie w spalinach, może mieć korodujący wpływ elementy silnika.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Zastosowane paliwo

Zastosowanym paliwem badawczym był olej napędowy celowo zanieczyszczony chlorem. W tym celu do czystego oleju napędowego, o zawartości poszczególnych pierwiastków poniżej 1 mg/kg, dodano taką ilość dichlorometanu (CAS: 75-09-2; $d = 1,3266 \text{ g/cm}^3$; $M = 84,93 \text{ g/mol}$), aby stężenie chloru w paliwie wynosiło około 750 mg/kg. Zastosowano tak wysoką zawartość chloru, aby spowodować wymuszenie przyspieszonego negatywnego działania spalin zanieczyszczonych chlorem na elementy silnika.

Poprawność przygotowania paliwa badawczego sprawdzono pod kątem zawartości chloru wykorzystując spektrometr fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją długości fali WD-XRF (Rigaku ZSX Primus II, Japonia). Zastosowano następujące parametry pracy spektrometru: moc lampy: 3 kW (napięcie 50 kV, natężenie prądu 60 mA), czas analizy: 30 s, pomiar tła: dwupunktowy, kryształ: Ge, linia analityczna Cl: K α , kąt: 92,86 deg, współczynnik korelacji liniowej krzywej kalibracyjnej $r^2 = 0,9995$.

Oznaczone stężenie chloru w przygotowanym paliwie wynosiło $747 \pm 12 \text{ mg/kg}$.

3.2. Wymiennik ciepła EGR

Zastosowany w badaniach wymiennik ciepła EGR był wykonany ze stopu aluminium w gatunku EN-AW AlSi9Cu3(Fe) wg normy PN-EN 1706:2011. Wymagania w zakresie składu chemicznego dla gatunku EN-AW AlSi9Cu3(Fe) przedstawiono w tabeli 2 [17].

Tab. 2. Wymagania dla gat. EN-AW AlSi9Cu3(Fe) [17]

Pierwiastek	Wymagania dla gatunku EN-AW AlSi9Cu3(Fe) [%]
Si	$8,0 \div 11,0$
Fe	$0,6 \div 1,1$
Cu	$2,0 \div 4,0$
Mn	$\leq 0,55$
Mg	$0,15 \div 0,55$
Cr	$\leq 0,15$
Ni	$\leq 0,55$
Zn	$\leq 1,2$
Pb	$\leq 0,35$
Sn	$\leq 0,15$
Ti	$\leq 0,20$
Al	osnowa

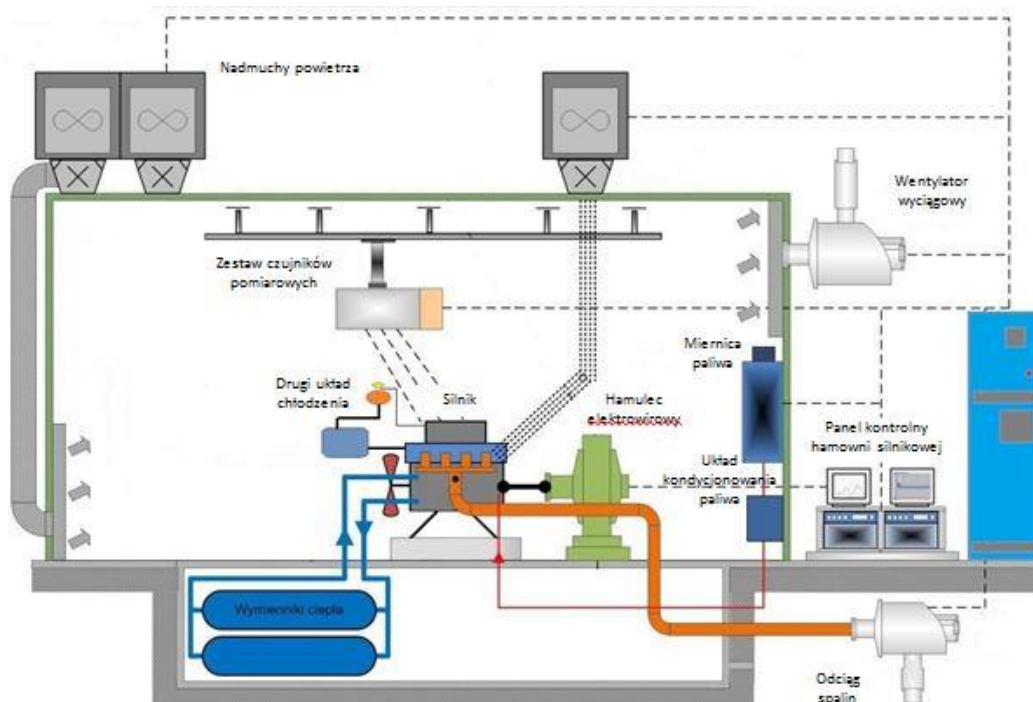
3.3. Stanowisko badawcze

Testy odporności komponentów silnika na korozję przeprowadzono w Laboratorium Badań Silników Instytutu BOSMAL. Stanowisko hamowniane, na którym prowadzone były próby, wyposażono w hamulec elektrowirowy firmy Horiba (Tabela 3) oraz tory pomiarowe ciśnień i temperatur (Rys. 2).

Tab. 3. Charakterystyka hamulca elektrowirowego

Typ hamulca EC	Horiba W230
Zakres prędkości obrotowej	$(0 \div 7500) \text{ obr/min}$
Zakres momentu obrotowego	$(0 \div 750) \text{ Nm}$

Do celów badań wykorzystano silnik o zapłonie samoczynnym o mocy 155kW, spełniający wymogi normy emisji spalin EURO VI. Silnik wyposażony był w dwa niezależne obiegi układów chłodzenia. Pierwszy układ był obiegiem chłodzenia silnika, natomiast układ drugi był obiegiem służącym do chłodzenia powietrza doładowującego oraz do chłodzenia spalin w układzie EGR, poprzez wymiennik ciepła. Obieg drugi został wyposażony w dodatkowy, stanowiskowy wymiennik ciepła typu płytowego, wraz z elektryczną pompą o regulowanym wydatku płynu chłodzącego. W układach chłodzenia zostały zamontowane przetworniki ciśnień oraz czujniki temperatur

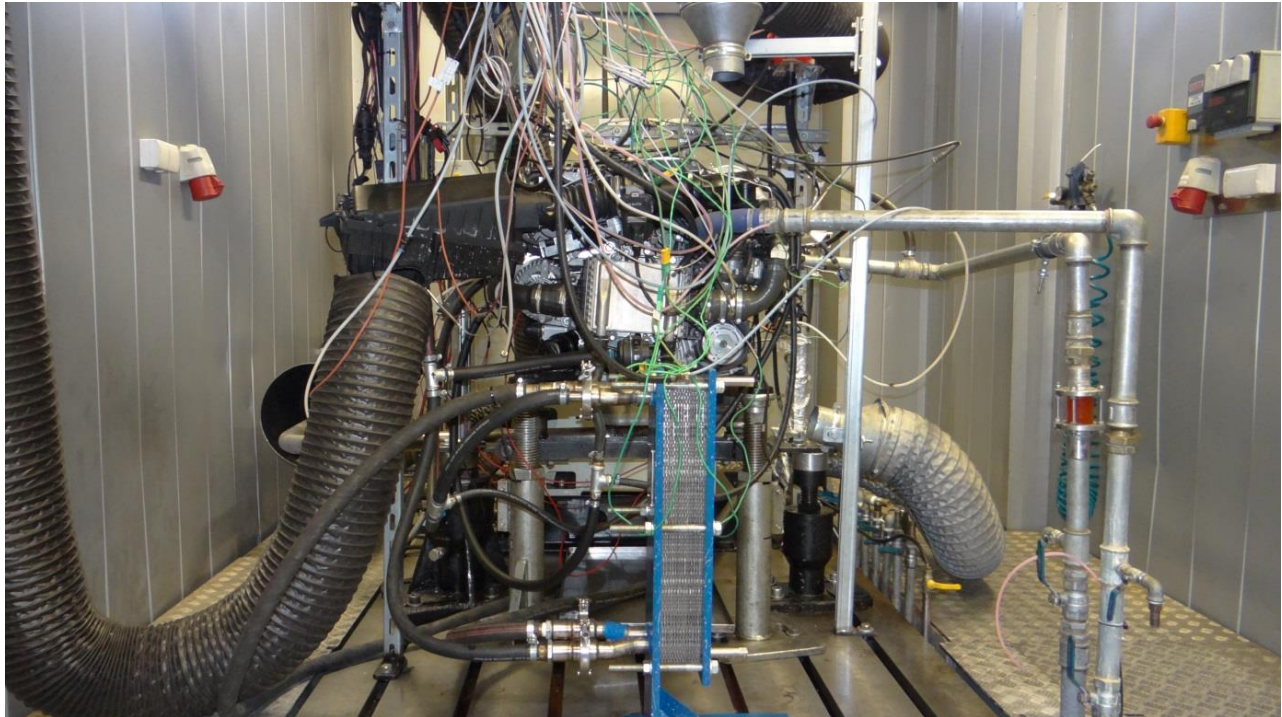


Rys. 2. Schemat stanowiska hamownianego

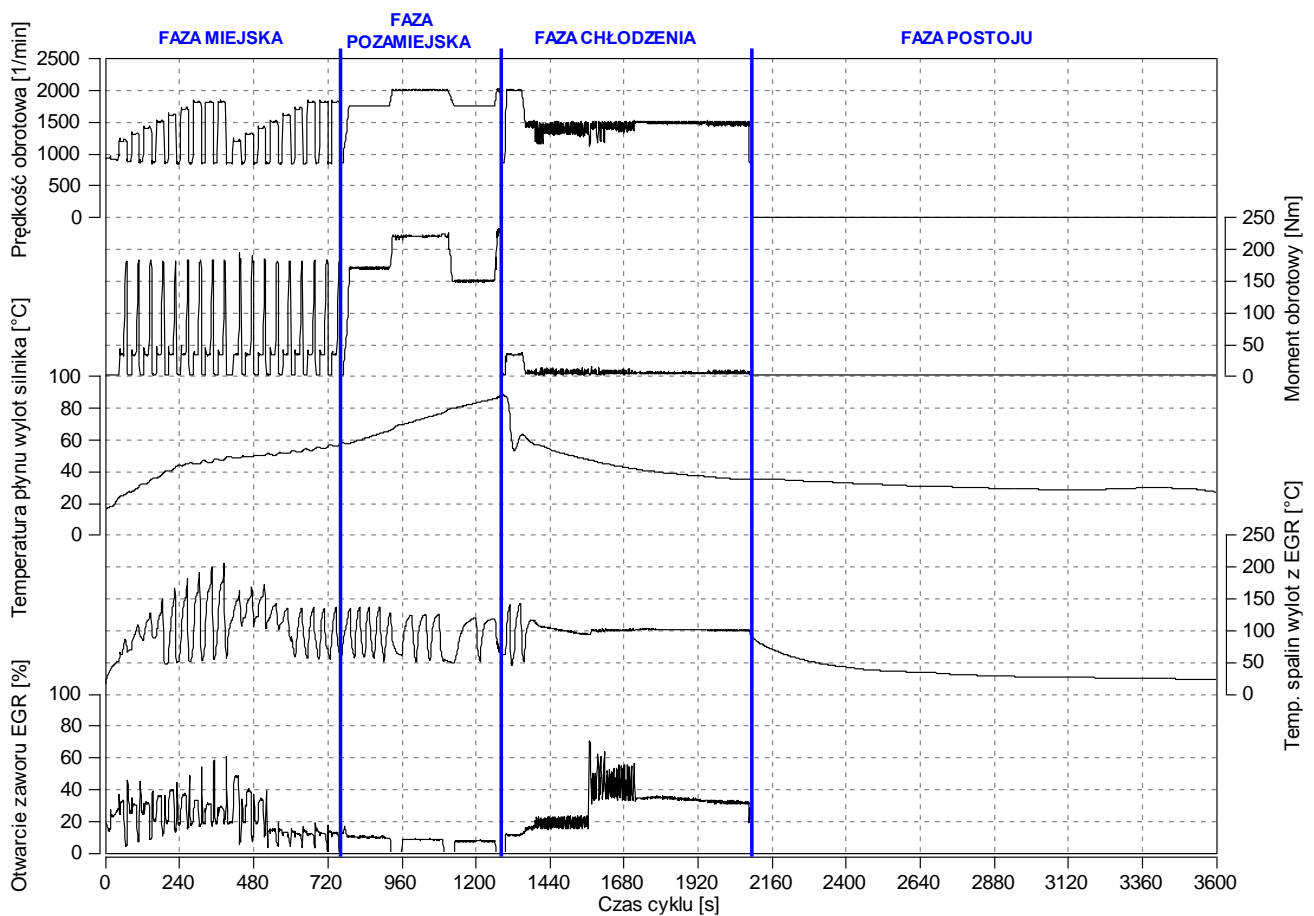
do pomiaru badanych wielkości.

Ciągła rejestracja parametrów pracy silnika, temperatur oraz ciśnień w układach chłodzenia z częstotliwością 1Hz umożliwia pełną kontrolę nad zużywającymi się w wyniku korozji komponentami silnika. Ogólny widok silnika na stanowisku badawczym przedstawiono na Rys. 3.

tami silnika. Ogólny widok silnika na stanowisku badawczym przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Silnik o zapłonie samoczynnym zamontowany na stanowisku badawczym



Rys. 4. Przebieg elementarnego cyklu badawczego

3.4. Przebieg testu stanowiskowego

Przebieg elementarnego cyklu badawczego przedstawiono na Rys. 4. Każdy cykl składał się z czterech faz. Dwie pierwsze fazy testu odpowiadały profilom jazdy miejskiej oraz pozamiejskiej, natomiast celem fazy trzeciej i czwartej było schłodzenie oraz postój silnika.

Faza miejska rozpoczynała się rozruchem zimnego silnika, po którym następowała sekwencja zmian prędkości obrotowej i obciążenia oraz praca na biegu jałowym. Wartość prędkości obrotowej silnika była początkowo zwiększana w pojedynczej sekwencji testu, natomiast profil przebiegu momentu obrotowego pozostawał niezmienny. Czas trwania fazy miejskiej był ruchomy i uwarunkowany osiągnięciem wartości temperatury płynu na wylocie z silnika równej 60°C. W fazie pozamiejskiej następowało dalsze nagrzewanie silnika i osiągał on znamionową temperaturę pracy.

Czas trwania fazy pozamiejskiej był stały.

Kolejnym etapem cyklu badawczego było intensywne chłodzenie silnika wymuszone przez układ stanowiskowy, a następnie zatrzymanie silnika i postój.

Elementarny cykl badawczy został opracowany tak, aby udział pracy silnika w warunkach nagrzewania był stosunkowo duży, co negatywnie wpływa na trwałość elementów silnika, zwiększa toksyczność oraz agresywność chemiczną spalin. Celem takiego postępowania było wymuszenie negatywnego działania spalin zanieczyszczonych chlorem na elementy silnika.

Cykl badawczy powtarzany był na stanowisku hamownianym w próbie 250 godzin, aż do momentu wystąpienia awarii układu recyrkulacji spalin.

3.5. Metoda analizy osadów i płynu chłodzącego

Zawartość pierwiastków w zastosowanym w teście płynie chłodzącym: PARAFLU UP wymieszanym w proporcji 1:1 z wodą destylowaną, oraz w powstałych w trakcie testów osadach (pkt. 4) oznaczono z wykorzystaniem metody spektrometrii emisyjnej z plazmą indukcyjnie sprzężoną ICP-OES (PerkinElmer Optima 8300, USA). Zawartość chloru oznaczono metodą WD-XRF w analogiczny sposób do opisanego w pkt. 3.1.

Skład pierwiastkowy płynu chłodzącego (Rys. 5) był analizowany po rozcieńczeniu próbki wodą dejonizowaną w stosunku 1:10. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3. Skład chemiczny powstałych osadów (Rys. 6-7) określono po ich wcześniejszej mineralizacji w środowisku utleniającym (HNO₃, HCl i H₂O₂). Zawartość chloru oznaczono metodą WD-XRF bezpośrednio w próbce stałej, naniezionej na filtr z celulozy.

Tab. 3. Skład pierwiastkowy płynu chłodzącego

Pierwiastek	Zawartość pierwiastków [mg/L]
Al	1,2
Ca	20
Cl	< 1,0
Cr	< 0,1
Cu	0,1
Fe	< 0,1
K	4 000
Mg	5,0
Mn	0,2
Mo	1,6
Na	1 600
Ni	0,1
P	8,0
S	480
Si	26
Zn	1,1



Rys. 5. Próbkę płynu chłodzącego PARAFLU UP

Z przedstawionego zestawienia zawartości pierwiastków wynika, że głównymi składnikami płynu chłodzącego były potas (K), sód (Na) i siarka (S).

4. WYNIKI BADAŃ

Testy stanowiskowe zostały zakończone po 250 godzinach pracy silnika zasilanego paliwem zanieczyszczonym chlorem, ze względu na awarię silnika.

Na wewnętrznych ściankach wymiennika ciepła EGR zaobserwowano pojawienie się osadów i nalotów o biało-różowym zabarwieniu oraz sadzy, zarówno po stronie wlotowej, jak i wylotowej (Rys. 6 i 7).



Rys. 6. Osady na wymienniku ciepła EGR – część wlotowa



Rys. 7. Osady na wymienniku ciepła EGR – część wylotowa

Różowe zabarwienie osadów świadczy o przedostawaniu się płynu chłodzącego do wnętrza wymiennika, czyli o pojawieniu się nieszczelności pomiędzy stroną chłodzoną płynem chłodzącym, a stroną, przez którą przepływają recykulowane spaliny.

Do badań pobrano próbkę osadu z części wlotowej (osad 1) oraz z części wylotowej (osad 2). Osady poddano przygotowaniu oraz analizie według metodyki opisanej w pkt. 3.5. Wyniki badań składu chemicznego przedstawiono w Tabeli 4.

W składzie chemicznym osadów stwierdzono obecność szeregu pierwiastków. Pojawienie się w osadach glinu (Al), miedzi (Cu), krzemu (Si), cynku (Zn) oraz manganu (Mn) jest związane z materiałem układu EGR (stop aluminium z dodatkiem krzemu), co jednoznacznie świadczy o korozji tego materiału pod wpływem zanieczyszczonego paliwa. Podobnie jest w przypadku obecności w osadach chromu (Cr), żelaza (Fe) i niklu (Ni), których obecność jest związana z korozją materiału wymiennika i/lub materiału części silnika wykonanej ze stali chromo-niklowej. Źródłem sodu (Na), potasu (K), siarki (S), wapnia (Ca), magnezu (Mg) i fosforu (P) w osadzie jest pojawienie się płynu chłodzącego w układzie EGR. Dodatkowo stwierdzono znaczną zawartość chloru (Cl) w osadach, który pochodził z przepływającego paliwa zanieczyszczonego chlorem.

Tab. 4. Skład chemiczny osadów [%]

Pierwiastek	Osad 1	Osad 2
Al	8,2	2,7
Ca	0,03	0,01
Cl	1,8	0,8
Cr	0,3	0,5
Cu	0,02	0,01
Fe	1,8	2,6
K	0,5	0,3
Mg	0,01	< 0,01
Mn	0,04	0,04
Mo	0,01	0,01
Na	0,2	0,1
Ni	0,4	0,4
P	0,01	< 0,01
S	0,3	0,1
Si	0,05	0,03
Zn	0,03	0,02

PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja wpływu jakości paliwa na odporność korozyjną komponentów silnika.

Ze względu na rygorystyczne normy emisji związków szkodliwych, układy oczyszczania spalin wyposażone są obecnie w dużą ilość precyzyjnych komponentów. Wiele układów silnika, takich jak układ chłodzenia, układ recykulacji spalin, układ dolotowy z turbosprężarką pracują w środowisku agresywnych spalin oraz wysokich temperatur. Skutkami pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych jest powstawanie osadów oraz korozja elementów funkcjonalnych poszczególnych układów. Efektem końcowym może być usterka danego układu lub awaria silnika prowadząca do jego unieruchomienia. Podczas przeprowadzonych prób trwałościowych z użyciem zanieczyszczonego paliwa zawierającego podwyższoną zawartość chloru zaobserwowano przyspieszony proces zużycia się wymiennika ciepła w układzie recykulacji spalin.

W pierwszej fazie korozji wymiennika dochodzi do nieszczelności i wzrostu ciśnienia w układzie chłodzenia w wyniku przedostawania się spalin do płynu chłodzącego. Postępująca degradacja wymiennika doprowadza do ubytków płynu chłodzącego dostającego się wraz ze spalinami do komory spalania silnika. W wyniku awarii silnika nie przeprowadzono analizy stanu pozostałych kom-

ponentów mających bezpośredni kontakt ze spalinami podczas pracy silnika. Analiza składu chemicznego osadów wskazuje na zawartość składników pochodzących także z innych komponentów silnika. Szczegółowa analiza pochodzenia tych składników wymaga prowadzenia dalszych prób badawczych.

BIBLIOGRAFIA

- Reitz R. D., Duraisamy G., *Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines*, "Progress in Energy and Combustion Science" 2015, nr 46, 12-71.
- Ghassembaglou N., Torkaman L., *Efficient design of exhaust gas cooler in cold EGR equipped diesel engine*, "Alexandria Engineering Journal" 2016, nr 55, 769-778.
- Yasin M. H. M., Mamat R., Yusop A. F., Mohamad D., Idris N. D., Yusaf T., Rasul M., Najafi G., *Study of a diesel engine performance with exhaust gas recirculation (EGR) system fuelled with palm biodiesel*, "Energy Procedia" 2017, nr 10, 26-31.
- Bieniek A., Mamala J., Graba M., Hennek K., *Impact of EGR control on in-cylinder pressure and ecological properties of CI off-road vehicle engine*, "Combustion Engines" 2017, nr 170(3), 88-95.
- Lattimore T., Wang Ch., Xu H., Wyszynski M. L., Shuai S., *Investigation of EGR effect on combustion and PM emissions in a DISI engine*, "Applied Energy" 2016, nr 161 C, 256-267.
- Baskar P., Senthilkumar A., *Effects of oxygen enriched combustion on pollution and performance characteristics of a diesel engine*, "Engineering Science and Technology, an International Journal" 2016, nr 19, 438-443.
- Li L., Wang J., Wang Z., Xiao J., *Combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled with diesel/biodiesel/pentanol fuel blends*, "Fuel" 2015, nr 156, 211-218.
- Gokul Raj C. R., Jinuchandran, Nandhu K., Jyothis S., Aneesh K. J., Biju Ch. A., *Combustion and emission characteristics of a direct injection diesel engine at various EGR conditions – a numerical experimental study*, "European Journal of Advances in Engineering and Technology" 2018, nr 5(1), 35-42.
- Li B., Li Y., Liu H., Liu F., Wang Z., Wang J., *Combustion and emission characteristics of diesel fuelled with biodiesel/PODE blends*, "Applied Energy" 2017, nr 206, 425-431.
- Saravanan S., *Effect of EGR at advanced injection timing on combustion characteristics of diesel engine*, "Alexandria Engineering Journal" 2015, nr 54, 339-342.
- Osipowicz T., Lisowski M., *The influence of corrosion phenomena on operational parameters of modern fuel injectors CI engines*, "Combustion Engines" 2017, nr 171(4), 17-23.
- Faber J., Brodzik K., *Elemental analysis as an important tool for fuels and biofuels quality control*, "Combustion Engines" 2017, nr 171(4), 140-144.
- Faber J., Brodzik K., Szary J., *Badania składu pierwiastkowego paliw i biopaliw*, "TTS – Technika Transportu Szybowego" 2015, nr 12, 478-483.
- Ambrosiewicz-Walacik M., Pięta A., *Ocena jakości olejów napędowych wykorzystywanych do zasilania silników o ZS z wybranych olsztyńskich stacji paliw*, "Combustion Engines" 2015, nr 172(3), 963-967.
- PN-EN 590+A1:2017-06, *Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań*, 2016.
- PN-EN 14214+A1:2014-04, *Ciekłe przetwory naftowe. Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) do użytku w silnikach samochodowych o zapłonie samoczynnym (Diesla) i zastosowań grzewczych. Wymagania i metody badań*, 2014.

17. PN-EN 1706:2011, *Aluminium i stopy aluminium. Odlewy. Skład chemiczny i własności mechaniczne*, 2011.

The influence of chlorine-contaminated fuel on NO_x emission control elements in compression engine

In paper the impact of intentionally chlorine-contaminated fuel on nitrogen oxides emission control elements in compression engine was described. The quality of fuel used is of key importance for the failure-free operation of the engine. Fuel contamination can occur mainly at the transport or storage stage.

The main attention was paid to the EGR heat exchanger, which is used for exhaust gases recirculation, being one of the ways to reduce the emission of harmful NO_x. The tests were conducted under laboratory conditions (research engine stand tests) in cycles consisting of four phases. The fuel used was intentionally contaminated with chlorine. The test was interrupted after 250 hours at the engine failure and

deposits appearance at the EGR heat exchanger.

Test results of chemical composition of deposits, analytical methods used and sources and the cause of deposits appearance were described in present paper.

Autorzy:

dr inż. **Joanna Faber** – Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku-Białej, Zakład Materiałoznawstwa, e-mail: joanna.faber@bosmal.com.pl

dr inż. **Rafał Sala** – Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku-Białej, Zakład Badań Silników, e-mail: rafal.sala@bosmal.com.pl

dr inż. **Jarosław Krasowski** – Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku-Białej, Zakład Badań Silników, e-mail: jaroslaw.krasowski@bosmal.com.pl

JEL: Q42 DOI: 10.24136/atest.2018.104

Data zgłoszenia: 2018.05.22 Data akceptacji: 2018.06.15