

Nowe rozwiązania proekologiczne w technologii spalania paliw

Joanna GUZIAŁOWSKA-TIC, Agnieszka Weronika BOK, Wilhelm Jan TIC – Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Opolska, Opole

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2013, 67, 10, 881–888

Wprowadzenie

Wzrost demograficzny determinuje potrzebę zaopatrzenia coraz liczniejszej populacji ludzkiej w energię. Aspektowi energetycznemu towarzyszą nieodwrotnie zagadnienia związane z dostępem do paliw określonej jakości oraz efektami ich spalania. Rozwój technologii chemicznej pozwala na wprowadzanie nowatorskich rozwiązań w zakresie bardziej efektywnych sposobów wykorzystania dostępnych paliw, zarówno ciekłych jak i stałych, w skali przemysłowej. Procesy spalania paliw są źródłem emisji szkodliwych zanieczyszczeń do środowiska. Redukcja zanieczyszczeń powietrza, a także pozostałości stałych pochodzących z procesów spalania paliw, a wpływających w istotny sposób na jakość życia, stanowią istotny aspekt rozwiązań proekologicznych.

Dodatki do paliw silnikowych

Celem użycia dodatków do paliw silnikowych jest obniżenie energii aktywacji reakcji utleniania zachodzących w komorze spalania silnika spalinowego. W wyniku obniżenia energii aktywacji możliwe jest prowadzenie procesu utleniania paliwa i zapewnienia zupełności jego spalania w niższej temperaturze. Obniżenie temperatury w komorze spalania wpływa na zmniejszenie w niej maksymalnego ciśnienia i łagodzenie mechanicznej pracy silnika. Jednocześnie utrzymuje się wyższe ciśnienie podczas ruchu tłoka w dół, co zapewnia większą zupełność spalania, a co za tym idzie zmniejszenie emisji szkodliwych substancji ze spalinami. Stwierdzono, że im wyższa temperatura zapłonu paliwa, tym mniejsza jest szybkość jego spalania. Dodatki do paliw silnikowych zwiększają prędkość spalania składników o wysokiej temperaturze wrzenia [1].

Stosując dodatki do paliw silnikowych, maksymalny efekt uzyskuje się przy spalaniu węglowodorów o wysokiej temperaturze wrzenia, czyli w procesie dopalania spalin [1]. Istnieje szeroki wachlarz takich dodatków (benzyna, olej napędowy). Dalej przedstawiono najnowsze trendy w tej dziedzinie.

Pierwszą grupę dodatków stanowią tzw. utleniacze. W pracy [2] scharakteryzowano 11 najbardziej powszechnych dodatków tlenowych, które mogą być stosowane zarówno do silników benzynowych, jak i diesla. Do grupy tych dodatków należą: eter metylo-wo tert-butylo-owy (MTBE), eter etylo-wo tri-butylo-owy (ETBE), eter tert-amyl-owy (TAEE), eter tert-amyl-owo metylo-owy (TAME), eter izopropyl-owy (DIPE), węgiel di metylo-owy (DMC), dimetoksymetan (DMM), eter di butylo-owy (DBE), eter diglikolo-metylo-owy (DGM), węgiel dietylo-owy (DEC), octan 2-metoksyetylo-owy (MEA). W Tabelcy I scharakteryzowano wpływ wymienionych dodatków na emisję: CO, HC, NO_x oraz pyłów.

W pracy [11] omówiono wpływ dodatków, takich jak: etanol, eter metylo-wo-tert-butylo-owy (MTBE), octan etylu oraz octan metylu na wielkość liczby oktanowej RON (Research Octane Number). Testy spalania zastały wykonane z wykorzystaniem benzyny, której skład był następujący: n-parafiny – 26,3%, izoparafiny – 38,7%, związki aromatyczne – 24%, nafteny – 7,3%. Temperatura początku wrzenia dla tej benzyny wyniosła 41°C, natomiast temperatura końcowa destylacji – 178°C.

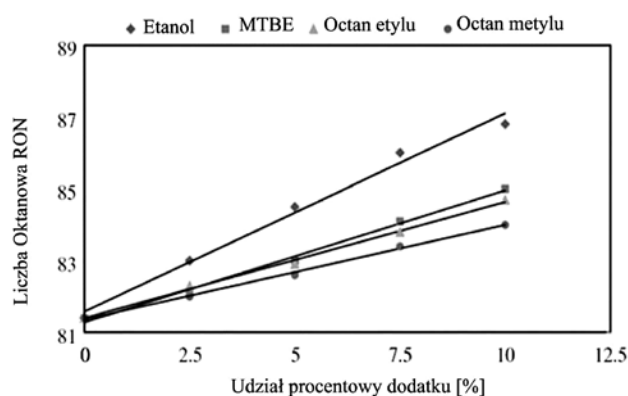
Tablica I

Wpływ dodatków tlenowych na emisję podczas spalania paliw silnikowych [2]

	CO	HC	NO _x	Emisja pyłów (PM)
MTBE	spadek emisji	spadek emisji	różne wyniki [5, 6]	-
ETBE	spadek emisji	spadek emisji	wzrost emisji [7]	-
TAME	spadek emisji	spadek emisji	spadek emisji	-
DIPE	spadek emisji	spadek emisji	spadek emisji	-
DMC	spadek emisji	bez zmian	wzrost emisji [8] spadek emisji [3]	spadek emisji
DMM	spadek emisji	spadek emisji [3] wzrost emisji [4]	spadek emisji	-
DBE	spadek emisji	spadek emisji	wzrost emisji [9]	-
DGM	spadek emisji	spadek emisji	spadek emisji	-
DEC	spadek emisji	spadek emisji	bez zmian [3]	spadek emisji
MEA	spadek emisji	spadek emisji	bez zmian [10]	-

Na Rysunku 1 przedstawiono wpływ różnych dodatków na wartość liczby oktanowej. Początkowa wartość liczby oktanowej wyniosła 81,5. Jak można zaobserwować, zastosowane dodatki podwyższają wartość liczby oktanowej. Przy czym najwyższą wartość RON uzyskano przy zastosowaniu etanolu jako dodatku.

Liczba oktanowa określa odporność na niekontrolowany samozapłon paliwa silnikowego do silników z zapłonem iskrowym, który może powodować jego spalanie stukowe. Im wyższa liczba oktanowa, tym lepiej benzyna jest chroniona przed spalaniem stukowym i lepiej działa silnik.



Rys. 1. Krzywe liczby oktanowej RON dla benzyny z 2,5%, 5%, 7,5% oraz 10% dodatkiem: etanolu, MTBE, octanu etylu oraz octanu metylu [11]

Zalety wynikające ze stosowania dodatków tlenowych są następujące: zmniejszanie emisji tlenku węgla (dla samochodów nowej generacji); zmniejszanie emisji węglowodorów (dla samochodów nowej generacji); zmniejszanie emisji pyłów; możliwość stosowania do silników benzynowych i diesla oraz zwiększenie liczby oktanowej.

Kolejną grupę dodatków stanowią dodatki metaliczne. W badaniach spalania oleju napędowego zastosowano jako dodatki organiczne związki metali grupy pierwszej, drugiej bądź przejściowej [1]. Ich stężenie wynosiło kilka ppb, w przeliczeniu na zawartość metalu. Wykorzystanie tych dodatków w tak małych ilościach nie wpłynęło na zanieczyszczenie komory spalania ani świec zapłonowych. W Tabelcy 2 porównano emisję szkodliwych składników spalin podczas spalania zwykłego oleju napędowego i z 0,01% dodatkiem.

Tabelca 2

Emisja szkodliwych składników spalin [g/kWh] [1]

Szkodliwa substancja	Olej napędowy	Olej napędowy z 0,01% dodatkiem	Zmniejszenie zawartości szkodliwych substancji w gazach spalinowych, %
CO	1,43	1,23	16,3
HC	0,49	0,47	4,2
NO _x	11,33	10,76	5,3

Przedstawione wyniki badań (Tab. 2) pozwalają ocenić zgodność pracy silnika z wymaganiami EURO oraz świadczyć o ogólnej efektywności działania dodatku.

W pracy [12] omówiono wpływ dodatków, takich jak MnO₂ i MgO na pracę silnika wysokoprężnego. Dodatki te były dozowane do oleju napędowego w ilości 8 μmol/l oraz 16 μmol/l. W Tabelcy 3 przedstawiono wpływ dodatków metalicznych na własności paliwa.

Tabelca 3

Wpływ dodatków metalicznych: MnO i MgO na własności oleju napędowego [12]

	Olej napędowy	Olej napędowy + 8 μmol/l MnO ₂	Olej napędowy + 16 μmol/l MnO ₂	Olej napędowy + 8 μmol/l MgO	Olej napędowy + 16 μmol/l MgO
Temperatura krzepnięcia, °C	-23	-27	-31	-26	-28
Temperatura mętnienia, °C	-6	-8	-10	-7	-8
Lepkość w temp. 40°C, cSt	2,6	2,5	2,3	2,4	2,2
Temperatura zapłonu, °C	73	68	62	69	65

Obydwa dodatki poprawiają własności oleju napędowego: lepkość; temperatury zapłonu, mętnienia i krzepnięcia. Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, iż przy użyciu dodatków metalicznych zużycie paliwa spadło o 4,16%. Zauważono również spadek emisji CO o 16,35% oraz spadek dymności o 29,82%. W przypadku NO_x zanotowano natomiast wzrost emisji [12].

Kolejnym przykładem dodatków metalicznych wpływających na pracę silnika wysokoprężnego są MnO i CuO [13]. Tak samo jak w przypadku MnO₂ i MgO [12], zanotowano pozytywny wpływ dodatków na własności oleju napędowego.

Katalizatory spalania olejów opałowych

Stosowanie oleju opałowego, wytworzonego przez mieszanie destylatów ciężkiego oleju z różnymi osadami z procesów rafineryjnych, powoduje zmniejszenie skuteczności pracy kotła, podnoszenie kosztów konserwacji i wiąże się ze znacznym niekorzystnym oddziaływaniem na środowisko.

Zmniejszenie skuteczności pracy kotła i konieczność podnoszenia kosztów konserwacji wynika głównie z tworzenia się osadów na powierzchniach grzewczych kotła. Procesowi temu towarzyszy zjawisko korozji nisko- i wysokotemperaturowej.

Spadek wydajności następuje w wyniku spadku wymiany ciepła, spowodowanego zanieczyszczoną powierzchnią wymiany ciepła, a to powoduje mniejszy uzysk ciepła z jednostki paliwa oraz mniej efektywne spalanie, a więc zwiększenie ilości węglowodorów w gazach odlotowych.

Wzrost emisji tlenków azotu (NO_x), tlenków siarki (SO_x), tlenku węgla (II) (CO) i pyłów jest również związany ze spalaniem ciężkich olejów opałowych w kotłach, które w zależności od obszaru i fazy występowania, można sklasyfikować następująco: strefa spalania wstępnego, właściwego oraz końcowego (Tab. 4).

Tabelca 4

Problemy eksploatacyjne w poszczególnych strefach spalania [14]

Strefa spalania wstępnego	Strefa spalania właściwego	Strefa spalania końcowego
Szlam Osad Zatykanie Korozja w przestrzeni magazynującej i w podajniku	SO _x NO _x CO C _x H _y Pyły	Zażyźnianie Osad Wysokotemperaturowa korozja Niskotemperaturowa korozja Problemy środowiskowe

Większość problemów pojawiających się w strefie spalania właściwego powiązanych jest z istniejącymi już problemami w strefie spalania wstępnego. Podobnie w przypadku problemów środowiskowych zależnych od procesów zachodzących w strefie spalania właściwego. Najlepsze warunki pracy kotła można uzyskać wprowadzając katalizatory w strefie spalania wstępnego i właściwego. Zgodnie z problemami eksploatacyjnymi kotłów (Tab. 4) sklasyfikowano katalizatory poprawiające proces spalania, w zależności od ich kierunków działania (Tab. 5).

Tabelca 5

Wpływ katalizatorów w zależności od kierunku ich zastosowania [14]

Katalizatory polepszające spalanie w strefie spalania wstępnego	Katalizatory polepszające spalanie w strefie spalania właściwego	Katalizatory polepszające spalanie w strefie spalania końcowego
Stabilizatory paliwa	Dodatki polepszające spalanie	Inhibitory korozji
Reduktory szlamu	Depresatory SO ₃	Depresatory osadu
Rozpuszczalniki	Reduktory NO _x	Środki przepłukiwujące
Detergenty	Reduktory pyłów	-
Dodatki obniżające temperaturę krzepnięcia	Reduktory CO	-
Dodatki uszlachetniające przepływ	-	-
Inhibitory korozji	-	-
Neutralizatory kwasowości	-	-
Demulgatory	-	-

Dla zapobiegania problemom związanym z korozją niskotemperaturową, katalizatory powinny spełniać dwie podstawowe funkcje: powinny podnosić temperaturę topnienia składników popiołów powyżej temperatury topnienia metali przyczyniających się do korozji nisko- i wysokotemperaturowej (do takich pierwiastków należą: sód, wanad, nikiel i siarka) oraz modyfikować popiół do postaci skruszonej, ułatwiającej jego usuwanie z układu.

Zastosowanie dwóch katalizatorów może pomóc obniżyć korozję niskotemperaturową poprzez zapobieganie tworzeniu się SO_3 , neutralizację kwasowości kwasu siarkowego oraz ochronę powierzchni podatnych na uszkodzenia.

Zastosowanie dwóch katalizatorów w postaci zawiesiny na bazie magnezu oraz związku metaloorganicznego, przyczynia się do obniżenia stopnia korozji oraz zmniejszenia ilości powstających zanieczyszczeń [15, 16].

Katalizatory metaloorganiczne spalania ciężkich olejów opałowych wpływają przede wszystkim na redukcję sadzy [17]. Katalizatory takie składają się z łańcucha organicznego i metalu. Część organiczna daje zdolność jednorodnego mieszania się z ciekłymi węglowodorami, a metal katalizuje proces spalania.

Na efektywność stosowania katalizatorów znacząco wpływają czynniki, takie jak: parametry pracy kotła podczas działania urządzenia, cechy konstrukcyjne instalacji, sposób dozowania katalizatora oraz właściwości paliw.

Liczba publikacji naukowych na temat katalizatorów polepszających proces spalania olejów opałowych jest niewielka [18÷22], tym bardziej potrzebne są dalsze badania w tym kierunku.

Katalizatory spalania paliw stałych

Zastosowanie węgla jako nośnika energii powoduje powstawanie m.in.: smogu, kwaśnych deszczy i opadów cząstek stałych. Dodatkowo niska zawartość tlenu w atmosferze sprzyja powstawaniu sadzy, produktów smolistych i tlenku węgla. W związku z szerokim zastosowaniem węgla jako źródła energii opracowano wiele rodzajów katalizatorów pozwalających zmniejszyć uciążliwość spalania tego paliwa. Utlenianie produktów smolistych oraz sadzy w miejscu ich powstania powoduje destrukcję wielu produktów ubocznych z niecałkowitego spalania węgla, wykazujących działanie rakotwórcze, mutagenne i toksyczne. Obok CO, to przede wszystkim wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA).

Istotną korzyścią wynikającą z ograniczania zanieczyszczenia sadzą, jest minimalizacja ryzyka jej zapłonu w przewodach kominowych, co eliminuje przyczynę pożarów i uszkodzeń elementów konstrukcyjnych budynków. Ponadto gromadzenie się sadzy na ściankach instalacji powoduje spadek ciągu kominowego, a to utrudnia odprowadzanie spalin z komory spalania i wpływa na wzrost koncentracji toksycznego CO w spalinach. Działanie katalizatorów, wspomagające redukcję emisji CO, usprawnia przebieg procesu utleniania CO do CO_2 i zapewnia drożność kanałów spalinowych [23].

Do najczęściej stosowanych katalizatorów spalania paliw stałych należą związki miedzi i chlorek sodu. Wprowadzenie NaCl do układu pozytywnie wpływa na przebieg procesu spalania węgla kamiennego. Dawkę optymalną określono na poziomie 7–8 g NaCl/m² powierzchni paleniska. Katalizator podniósł wydajność grzewczą instalacji i jednocześnie spowodował redukcję emisji CO i NO_x do atmosfery. Oprócz tego stworzył możliwość zmniejszenia współczynnika nadmiaru powietrza podawanego do komory spalania i zmniejszenia strat ciepła w spalinach o ok. 12% [24]. Chlorek sodu w warunkach panujących w komorze spalania rozkłada się częściowo do chlorowodoru i tlenku sodu. Chlorowódor, reagując z tlenkami stanowiącymi zawartość pozostałości stałej, powoduje powstanie chlorków metali, które łatwiej usunąć z układu grzewczego aniżeli spieki tlenkowe. Z kolei zastosowanie chlorku amonu uchroni instalację przed korozją nisko- i wysokotemperaturową. Jednak jest on jednocześnie źródłem chloru w reakcji syntezy toksycznej grupy zanieczyszczeń, w tym m.in. dioksyn.

Paliwa kopalne zawierają pewne ilości związków nieorganicznych, m.in. chlorków metali: miedzi, manganu, chromu, żelaza. Związki te katalizują wiele reakcji chemicznych, w tym syntezę dioksyn. Inhibitory wprowadzane do strefy spalania mogą wykazywać działanie

redukujące poziom już powstałych zanieczyszczeń. Istnieje również możliwość zahamowania powstawania dioksyn na etapie ich syntezy poprzez zastosowanie inhibitora [23].

W Tablicy 6 zestawiono dwie grupy substancji, które docelowo przyczyniają się do obniżenia poziomu dioksyn w spalinach.

Tablica 6

Związki chemiczne wpływające na poziom dioksyn w spalinach [23]

Inhibitory syntezy dioksyn	Związki organiczne redukujące dioksyny
Tlenek wapnia	Pirydyna
Amoniak	Chinolina
Siarczan amonu, siarczan sodu	Mocznik
Tiosiarczan sodu	Glikol etylenowy
Wodorofosforan (V) amonu sodu	Aminy
Siarka	EDTA
Dolomit	

Dobrym przykładem inhibitora jest siarka i jej związki (Tab. 6). Hamują one proces syntezy dioksyn, w wyniku przekształcania CuCl_2 (najbardziej wydajnego katalizatora i jednocześnie źródła chloru do syntezy dioksyn) w znacznie mniej aktywny katalitycznie CuSO_4 . Prekursorami syntezy dioksyn mogą być związki aromatyczne i alifatyczne znajdujące się na powierzchni powstałych podczas spalania popiołów lotnych. Odmiany dioksyn powstające w obecności siarki wykazują mniejsze właściwości toksyczne.

Wprowadzenie odpowiedniego dodatku do procesu spalania paliw w skali przemysłowej pozwala na obniżenie ilości powstających dioksan nawet o 90%. Jednocześnie taki inhibitor dioksyn – ze względu na aktywność w procesie DeNO_x – może spowodować redukcję ilości emitowanych tlenków azotu. Przykładem substancji chemicznych o takim działaniu są mocznik i amoniak [25].

Inną, efektywną metodą usuwania sadzy jest dostarczenie do paleniska mieszaniny utleniaczy. Termiczny rozkład soli nieorganicznych, takich jak azotany (V) lub manganiany (VII), powoduje powstanie tlenu o dużej reaktywności, który utlenia sadzę w stosunkowo niskiej temperaturze. Zaletą tej metody wspomagania procesu spalania jest wytworzenie dużej objętości gazów wskutek rozkładu niewielkiej ilości wprowadzonych utleniaczy; gazy te dokładnie penetrują zanieczyszczoną powierzchnię, nawet w miejscach, gdzie mechaniczne czyszczenie jest bardzo uciążliwe.

Katalizatory posiadające w swoim składzie utleniacze, mimo opisanych zalet, są mniej efektywne od kompozycji bogatych w sole metali przejściowych. Metale te wspomagają procesy utleniania sadzy tlenem atmosferycznym pochodzącym z powietrza doprowadzanego do komory spalania. Istotną rolę odgrywają organiczne i nieorganiczne sole miedzi (CuSO_4 , CuCl_2 , $\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2$, naftenian miedzi). Wysoką skuteczność działania katalizatora, w tym zmniejszenie o ok. 100°C temperatury spalin, osiągnięto nie tylko dzięki właściwemu doborowi składników, ale też rozdrobnieniu ziaren preparatu poniżej 100 μm .

Substancjami aktywnymi w procesie katalitycznego utleniania depozytów węglowych są związki chemiczne powstałe w efekcie termicznego rozkładu składników dodatku. Podczas rozkładu tych substancji powstaje CuO, który pełni funkcję katalityczną w procesie utleniania sadzy i obniża (nawet o połowę) temperaturę jej utleniania [26]. Znanych jest wiele składników kompozycji katalizatorów pełnego spalania paliw; za najbardziej skuteczne uznawane są związki miedzi.

Badania katalizatora bazującego na mieszaninie tlenków Cu i Mn osadzonych na porowatym tlenku glinu wskazują na pozytywny wpływ na ograniczenie CO i cząstek stałych. Modyfikacja tego katalizatora tlenkami cyrkonu i tytanu o dużym potencjale oksydacyjnym wskazuje na możliwość redukcji emisji wspomnianych zanieczyszczeń w komorze spalania [27].

W procesie spalania węgla trzeba też wspomnieć o technologii odsiarczania i odazotowania DESONOX. Rolę nośnika dla katalizatora metalicznego o wysokiej dyspersji stanowi tu zeolit pochodzenia syntetycznego. Idea tego procesu opiera się na ciągłej eliminacji SO_3 z układu, poprzez wiązanie go z odpadami paleniskowymi typu popiół i żużel. Katalizator typu DESONOX obniża poziom NO_x w środowisku reakcji, determinuje zmniejszenie jego ilości w gazach odlotowych poprzez katalizowanie reakcji wysokotemperaturowego pośredniego utleniania CO za pomocą tlenków azotu [28].

Podsumowanie

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na paliwa ciekłe i stałe oraz wymagania Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska, katalizatory i dodatki stosowane do usprawnienia procesu spalania są bardzo potrzebne.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego można stwierdzić, że zastosowanie dodatków i katalizatorów w procesie spalania paliw zmniejsza emisję do atmosfery CO, SO_x , NO_x , WWA oraz pyłów. Dodatki i katalizatory wpływają również na efektywność spalania oraz wydłużają pracę kotła, a co za tym idzie zmniejszają koszty związane z remontami; zmniejszają też ryzyko korozji wysoko- i niskotemperaturowej w badanym układzie. W przypadku dodatków stosowanych do paliw silnikowych zwiększają one liczbę oktanową, a co za tym idzie zmniejszają niebezpieczeństwo stukowego spalania benzyn i poprawiają pracę silnika.

Na efektywność stosowania katalizatorów znacząco wpływają parametry pracy kotła podczas działania urządzenia, cechy konstrukcyjne instalacji, sposób ich dozowania oraz właściwości paliw.

Literatura

- Serdiuk V.V., Serdiuk D.V., Askinazi L.A.: *Poprawa ekologicznych wskaźników pracy spalinowych silników tłokowych przez zastosowanie katalizatorów spalania*. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska 2008, **10**, 399–411.
- Arteconi A., Mazzarini A., Di Nicola G.: *Emissions from ethers and organic carbonate fuel additives: A review*. Water Air Soil Pollut 2011, **221**, 405–423.
- Ren Y., Huang Z., Miao H., Di Y., Jiang D., Zeng K.: *Combustion and emissions of a DI diesel engine fuelled with diesel-oxygenate blends*. Fuel 2008, **87**, 2691–2697.
- Lu X., Zhang J., Zhang W., Huang Z.: *Improving the combustion and emission of a direct injection compression ignition engines using oxygenated fuel additives combined with cetane improver*. Energy Fuels 2005, **19**, 1879–1888.
- Schifter I, Diaz L. Vera M., Guzman E., Lopez-Salinas E.: *Fuel formulation and vehicle exhaust emission in Mexico*. Fuel 2004, **83**, 2065–2074.
- Song C., Zhang W., Pei Y., Fan G., Xu G.: *Comparative effects of MTBE and ethanol additions into gasoline on exhaust emissions*. Atmospheric Environment 2006, **40**, 1957–1970.
- Baur C., Kim B., Jenkins P.E., Cho Y.S.: *Performance analysis of a SI engine with ETBE as a blending component in motor gasoline and comparison with other blending components*. Energy Conversion Engineering Conference. Proceeding of the 25th Intersociety 1990, **4**, 337–342.
- Nibin T., Sathiyaganam A.p., Sivaprakasam S., Saravanan C. G.: *Investigation on emission characteristic of a diesel engine using oxygenated fuel additive*. IE (I) Journal 2005, **86**, 51–54.
- Zannis T.C., Hountalas D.T.: *DI diesel engine performance and emission form the oxygen enrichment of fuel with various aromatic content*. Energy Fuels 2004, **18**, 659–666.
- Yanfeng G., Shenghua L., Hejun G., Tiegang H., Longbao Z.: *A new diesel oxygenate additive and its effects on engine combustion and emission*. Applied Thermal Engineering 2007, **27**, 202–207.
- Dabbagh H.A., Ghobadi F., Ehsani M.R., Moradmam M.: *The influence of ester additives on the properties of gasoline*. Fuel 2013, **104**, 216–223.
- Keskin A., Gürü M., Altıparmak D.: *Influence of metallic based fuel additives on performance and exhaust emissions of diesel engine*. Energy Conversion and Management 2011, **52**, 60–65.
- Lenin M.A., Swaminathan M.R., Kumaresan G.: *Performance and emission characteristics of a DI diesel engine with a nanofuel additive*. Fuel 2013, **109**, 362–365.
- Prelec Z., Mrakovčić T., Dragicević V.: *Performance study of fuel oil additives in real power plant operating conditions*. Fuel Processing Technology 2013, **110**, 176–183.
- Barroso J., Barreras F., Ballester J.: *Behavior of a high-capacity steam boiler using heavy fuel oil, part 1, high-temperature corrosion*. Fuel Processing Technology 2004, **86**, 89.
- Barreras F., Barroso J.: *Behavior of high-capacity steam boiler using heavy fuel oil, part 2, cold-end corrosion*. Fuel Processing Technology 2004, **86**, 107.
- Somasundaram G., Sunavala P.D.: *Suppression of soot in the combustion of residual furnace oil using organometallic additives*. Fuel 1989, **68**, 921.
- Każmierczak M.: *Całkowite utlenianie organicznych związków siarki*. Przemysł Chemiczny 2003, **82**, 1029.
- Kök M.V., Iscon A.G.: *Catalytic effects of metallic additive on the combustion properties of crude oils by thermal analysis techniques*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2003, **64**, 1311.
- Paullikkas A.: *Cost-benefit analysis for the use of additives in heavy fuel oil fired boilers*. Energy Conversion and Management 2004, **45**, 1725.
- Tic W.J.: *Metal Salts as the Homogeneous Catalysts for an Effective Combustion of Liquid Fuels*. Polish Journal of Environmental Studies 2008, **17**(3), 439.
- Zvereva E.R., Ganina L.V.: *Effects of additives on the working properties of furnace heavy fuel oil*. Chemistry and Technology of Fuels and Oil 2009, **45**(5), 349.
- Chyc M.: *Znaczenie dodatków paliwowych w procesach spalania paliw stałych*. Prace naukowe GIG górnictwo i środowisko 2012, **1**, 5–16.
- Szkarowski A., Naskręt L.: *Poprawa efektywności i jakości warstwowego spalania paliwa*. Magazyn Instalatora 2011, **2**, 150, 24–25.
- Long H.M., Li J.X., Wang P., Gao G., Tang G.W.: *Emission reduction in iron ore sintering by adding urea as inhibitor*. Ironmaking&Steelmaking 2011, **38**(4), 258–262.
- Katalizator do spalania sadzy. Zgłoszenie patentowe nr 365431, RP.
- Doggalia P., Kusabab H., Einagab H., Bensaid S., Rayalua S., Teraokab Y., Labhsetwara N.: *Low-cost catalysts for the control of indoor CO and PM emissions from solid fuel combustion*. Journal of Hazardous Materials 2010, **186**, 796–804.
- Nazimek D.: *Kataliza i katalizatory w ochronie środowiska*. Przemysł Chemiczny 2006, **85**, 8–9, 1058–1060.

Praca została wykonana w ramach projektu Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013 sygnowanego numerem POIG.01.04.00–16–159/12.

Dr inż. Joanna GUZIAŁOWSKA-TIC jest absolwentką Inżynierii Środowiska Politechniki Opolskiej (2004). Doktorat na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej (2008). Obecnie pracuje w Katedrze Inżynierii Środowiska w Zespole Dydaktycznym Gospodarki Odpadami i Technologii Chemicznej. Zainteresowania naukowe: katalizatory ochrony środowiska, zarządzanie chemicznością, ochrona środowiska. Jest autorką lub współautorką 9. rozdziałów w monografiach, 18. artykułów w prasie naukowo technicznej, 3. patentów oraz ponad 30. referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych.
e-mail: j.guzialowska@po.opole.pl

Mgr inż. Agnieszka Weronika BOK jest absolwentką Inżynierii Środowiska Politechniki Opolskiej (2012) i Wydziału Chemicznego Uniwersytetu Opolskiego (2010). Obecnie jest słuchaczką drugiego roku studiów doktoranckich, które realizuje w Katedrze Inżynierii Środowiska, Politechniki Opolska. Zainteresowania naukowe: katalizatory ochrony środowiska, technologia chemiczna, ochrona środowiska. Jest autorką 2. rozdziałów w monografiach, 1. artykułów w prasie naukowo-technicznej i autorką lub współautorką 3. referatów i posterów na konferencjach krajowych i międzynarodowych.

Dr hab. inż. Wilhelm Jan TIC, profesor Politechniki Opolskiej jest absolwentem Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej (1986). Doktorat na Wydziale Chemicznym Politechniki Poznańskiej (2000). Habilitacja na Wydziale Chemicznym Politechniki Łódzkiej (2012). Obecnie pracuje w Katedrze Inżynierii Środowiska w Zespole Dydaktycznym Gospodarki Odpadami i Technologii Chemicznej. Zainteresowania naukowe: technologia chemiczna, kataliza chemiczna, ochrona środowiska. Jest autorem lub współautorem 5. monografii, 21. rozdziałów do monografii, 62. artykułów w prasie naukowo-technicznej, 12. patentów oraz 73. referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych.