

## COMPARATIVE ANALYSIS OF NITRIC OXIDE-TRAPS REACTORS PROPERTIES WITH MAGNESIUM OXIDE AND BAR ALUMINATES

**Stanisław Kruczyński, Wiktor Danilczyk, Wojciech Kamela**

*Technical University of Warsaw, Institute of Vehicles  
Narbutta Street 84, 02-524 Warszawa, Poland  
tel. +48 22 6608782, fax: +48 22 8490303  
e-mail: skruczyn@simr.pw.edu.pl*

**Andrzej Darkowski, Małgorzata Księżopolska**

*Technical University of Warsaw  
Department of Nonorganic Chemistry and Solid Body Technology  
Noakowskiego Street 3, 00-664 Warsaw, Poland  
tel. +48 22 6607372, fax: +48 22 6282741  
e-mail: dark@ch.pw.edu.pl*

### **Abstract**

*In this paper properties of the LNT reactors were described. In the discussed reactors the bar aluminates and magnesium oxide were used as a compound for NO<sub>x</sub> storage. There is also discussed a procedure of reactor studies and the test bench. The structure of tested reactor and diffraction analysis of catalysts surface was also described, including pictures from the scanning electron microscope and the X-ray examinations of surface structure with size determination of noble metals crystallites. Article contain analysis of reactors properties in carbon monoxide and hydrocarbon oxidation and nitric oxides storage and reduction for botch models of catalysts at conditions when engine was running by turns rich and lean and when it was running under stoichiometrical conditions. Tests were conducted in few different reactor temperatures. Additionally the analysis of conversion of mine, toxic exhaust gases under conditions when engine was running low had been conducted to simulate the real conditions in which LNT reactors are being used. Summary of all results and determinate parameters showed which of elaborated reactors had better catalytic properties. In this case reactor with magnesium oxide in his structure had better conversion values than the reactor with bar aluminates.*

**Keywords:** combustion engines, air pollution, catalysts, nitric oxides

## ANALIZA PORÓWNAWCZA WŁASNOŚCI REAKTORÓW-PULAPEK TLENKÓW AZOTU ZAWIERAJĄCYCH TLENEK MAGNEZU I GLINIAN BARU

### **Streszczenie**

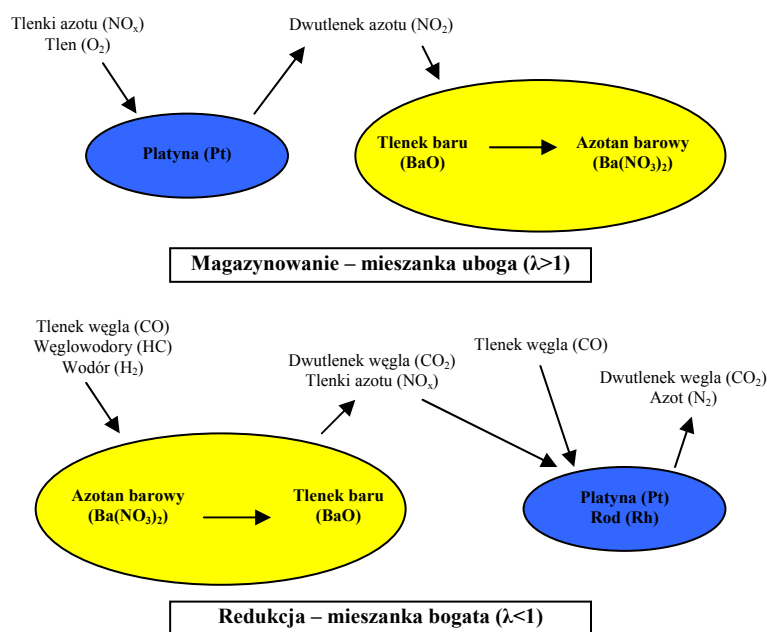
*W pracy opisane zostały własności reaktorów LNT, w których składnikiem magazynującym tlenki azotu jest tlenek magnezu i glinian baru. Omówiona została procedura badań oraz stanowisko badawcze. Przedstawiona została również budowa badanych modeli reaktorów i badania fizykochemiczne ich powierzchni aktywnych, w tym obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz badania rentgenowskie struktury powierzchni wraz z określeniem rozmiarów krystalitów metali szlachetnych (XRD). Praca zawiera analizę właściwości utleniających reaktora (tlenku węgla i węglowodorów) oraz magazynowania i redukcji tlenków azotu przez reaktory, przy zasilaniu silnika na przemian zmienną mieszanką bogatą i ubogą oraz mieszanką stechiometryczną w różnych temperaturach pracy reaktora. Przedstawiono również analizę wartości konwersji toksycznych składników spalin dla przypadku, w*

którym przez badane reaktory przepływały spaliny z silnika zasilanego mieszanką ubogą. Symulacja ta została przeprowadzona w celu odwzorowania rzeczywistych warunków pracy tego typu reaktorów. Podsumowanie wszystkich wyników zarówno badań, jak i wyznaczonych parametrów pozwoliło ostatecznie określić, który z opracowanych reaktorów charakteryzował się lepszymi parametrami pracy. Z dwóch reaktorów, których dotyczy niniejsza praca lepszym pod względem właściwości katalitycznych okazał się reaktor zawierający w swojej strukturze tlenek magnezu.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, zanieczyszczenie powietrza, reaktory katalityczne, tlenki azotu

## 1. Wstęp

Konieczność zmniejszenia zużycia paliwa i ograniczenia emisji dwutlenku węgla przez pojazdy samochodowe spowodowały rozwój technik pozwalających na spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym mieszanek ubogich. Silniki takie np. silniki FSI Volkswagena czy silniki HPI koncernu PSA, spalają mieszanki uwarstwione o stosunku powietrza do paliwa A/F około 50 i zawierają w spalinach ponad do 10% tlenu. Pracując w tych warunkach klasyczny trójfunkcyjny reaktor katalityczny TWC (*Three Way Catalyst*) wykazuje bardzo słabą skuteczność redukcji  $\text{NO}_x$ . Wobec tego rozwinęły się technologie budowy reaktorów umożliwiających usuwanie  $\text{NO}_x$  w obecności tlenu w spalinach. Reaktory takie nazywane są w literaturze pułapkami tlenków azotu LNT (*Lean NO<sub>x</sub> Traps*) Poniżej przedstawiony jest rysunek obrazujący sposób magazynowania oraz uwalniania i redukcji  $\text{NO}_x$  w reaktorach typu LNT.



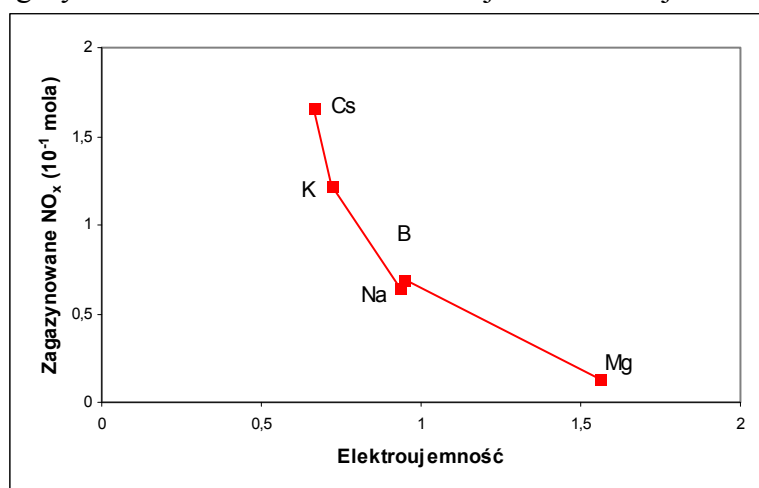
Rys. 1. Schemat mechanizmów magazynowania i redukcji tlenków azotu  
Fig. 1. Schematics of mechanisms of nitric oxides storage and reduction

Mechanizm redukcji  $\text{NO}_x$  jest następujący. W pierwszym kroku  $\text{NO}$  reaguje z  $\text{O}_2$  tworząc  $\text{NO}_2$ , który następnie tworzy termicznie stabilne azotany z zasadowymi tlenkami. W ten sposób magazynowany  $\text{NO}_x$  stopniowo pokrywa materiał magazynujący i musi być okresowo usuwany.

Aby zredukować zmagazynowane  $\text{NO}_x$  do azotu, konieczne są okresowe zmiany z mieszanki ubogiej na mieszankę bogatą (okres redukcji – krótki impuls mieszanki bogatej), w której powierzchniowe azotany rozkładają się i  $\text{NO}_x$  są selektywnie redukowane, poprzez  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  i  $\text{HC}$  tak jak to się dzieje w klasycznym reaktorze trójfunkcyjnym [1].

Właściwości materiałów adsorbujących tlenki azotu są obecnie przedmiotem intensywnych prac badawczych [1, 2, 3, 4, 5]. Przebadano właściwości adsorpcyjne między innymi tlenków takich metali alkalicznych i metali ziem alkalicznych (litowce i berylowce) jak  $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,

Cs oraz Mg. Rysunek zamieszczony poniżej obrazuje zdolność niektórych z wymienionych pierwiastków do magazynowania tlenków azotu w funkcji ich elektroujemności [6].



Rys. 2. Zdolność pierwiastków do magazynowania NO<sub>x</sub> w funkcji ich elektroujemności [6]  
 Fig. 2. Elements ability to store NO<sub>x</sub> in function of their electro negativity [6]

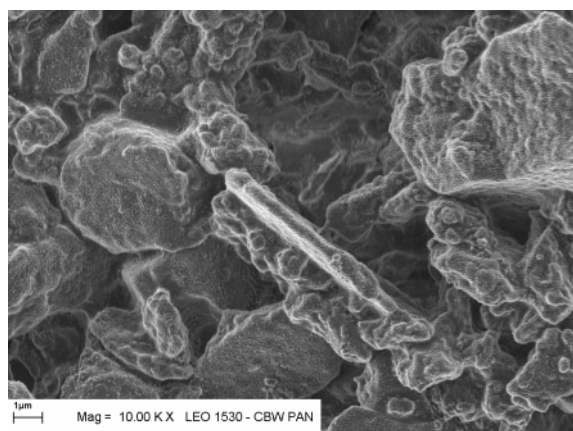
## 2. Reaktory badawcze

Do badań wykorzystane zostały modele reaktorów w kształcie walca o wymiarach: średnica Ø=28mm, długość l=70mm. Oba reaktory wykonane zostały na monolicie z folii stalowej o ilości kanalików 64/cm<sup>2</sup>, którą pokryto aktywnym nośnikiem katalitycznym z mieszaniny tlenków:

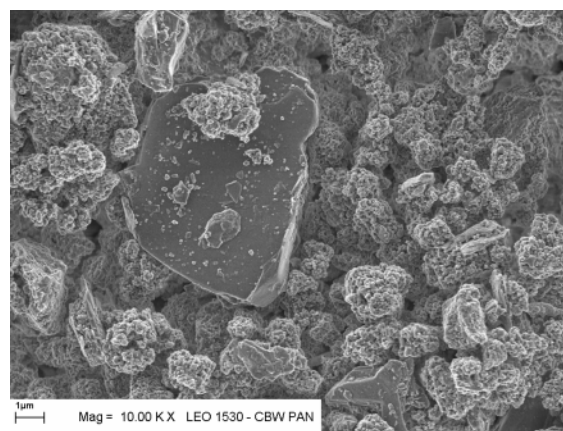
- 30% BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 10% CeO<sub>2</sub>, 60% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w ilości 130 g/dm<sup>3</sup> w przypadku reaktora, w którym jako podłoże magazynujące tlenki azotu zastosowano glinian baru,
- 30% MgO, 10% CeO<sub>2</sub>, 60% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w ilości 130 g/dm<sup>3</sup> w przypadku reaktora, w którym jako podłoże magazynujące tlenki azotu zastosowano tlenek magnezu,

Powierzchnie obu modeli impregnowano metalami szlachetnymi Pt i Rh odpowiednio w ilości 2,8 g/dm<sup>3</sup> i 1,1 g/dm<sup>3</sup>.

Obrazy powierzchni aktywnych reaktorów obrazujące ich topografię w powiększeniu 10000 razy uzyskane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego LEO 1530 przedstawiono na rysunku 2 i 3.



Rys. 3. Obraz SEM powierzchni aktywnej reaktora Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 Fig. 3. The SEM view of active surface of reactor Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



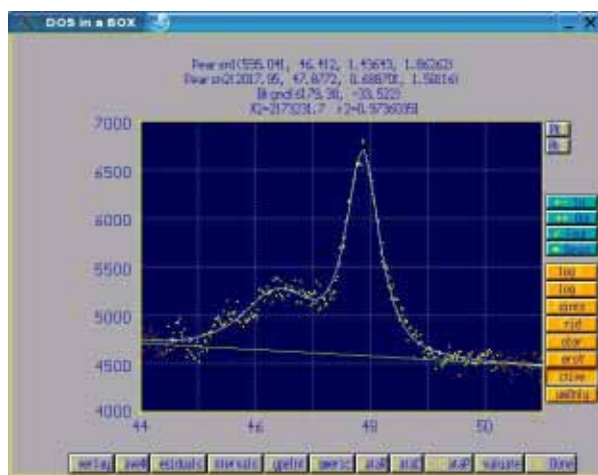
Rys. 4. Obraz SEM powierzchni aktywnej reaktora Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 Fig. 4. The SEM view of active surface of reactor Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Badania XRD powierzchni aktywnych reaktorów wykonano na dyfraktometrze D5000 Siemens-Bruker AXS z lampą Cu wykorzystując linię promieniowania charakterystycznego  $\text{CuK}\alpha$  o długości fali  $\lambda=1,54184\text{\AA}$ . Wszystkie widma dyfrakcyjne zostały zmierzone w geometrii symetrycznej Bragg-Brentano. Poniżej na rysunkach 4 oraz 5 przedstawione zostały fragmenty widm dyfrakcyjnych obu badanych reaktorów.

Dla próbki, w której jako związek magazynujący  $\text{NO}_x$  zastosowano glinian baru, przy założeniu, że szerokie maksimum leżące pod kątem  $46,41$  stopnia należy do fazy metalicznej, to odpowiada ono stałej sieci  $0,3913\text{ nm}$  i z prawa Vegarda odpowiada lokalnemu składowi metali  $92\% \text{ Pt} + 8\% \text{ Rh}$ . Z szerokości refleksów korzystając z zależności Scherrera można określić rozmiar krystalitów metali na około  $6,7\text{ nm}$ .

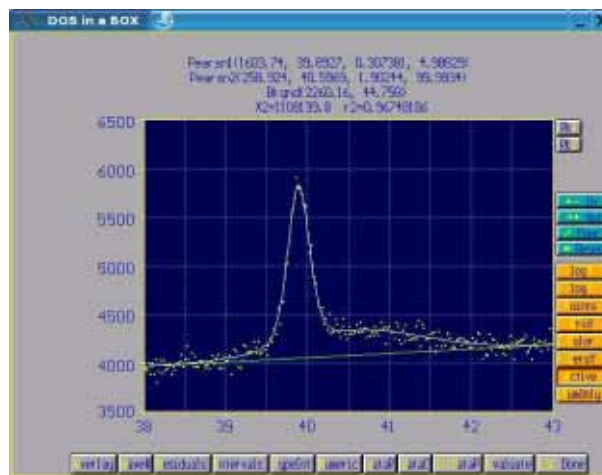
W przypadku reaktora  $\text{Pt/Rh-MgO/CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , trudno analizowane podniesienie tła w okolicy  $47$  stopni sugeruje, że maksimum to reprezentuje fazę fcc metalu o stałej sieci  $0,3849\text{ nm}$ . Zastosowanie prawa Vegarda (analiza refleksu w okolicy  $39,8$  stopnia) sugeruje skład  $38\% \text{ Pt} + 62\% \text{ Rh}$ , a szerokość maksimum ze wzoru Scherrera sugeruje wielkość krystalitów  $5\text{ nm}$ .

Powyższe oszacowania są jedynie sugestią, a obwarowana założeniami analiza jednego obszaru nie daje całkowicie pewnych wartości pomiarów.



Rys. 5. Fragment widma dyfrakcyjnego powierzchni reaktora  $\text{Pt/Rh- BaAl}_2\text{O}_4/\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 5. Excerpt of diffraction spectrum of reactor  $\text{Pt/Rh- BaAl}_2\text{O}_4/\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  surface



Rys.6. Fragment widma dyfrakcyjnego powierzchni reaktora  $\text{Pt/Rh- MgO/CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 6. Excerpt of diffraction spectrum of reactor  $\text{Pt/Rh- MgO/CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  surface

### 3. Procedura badań

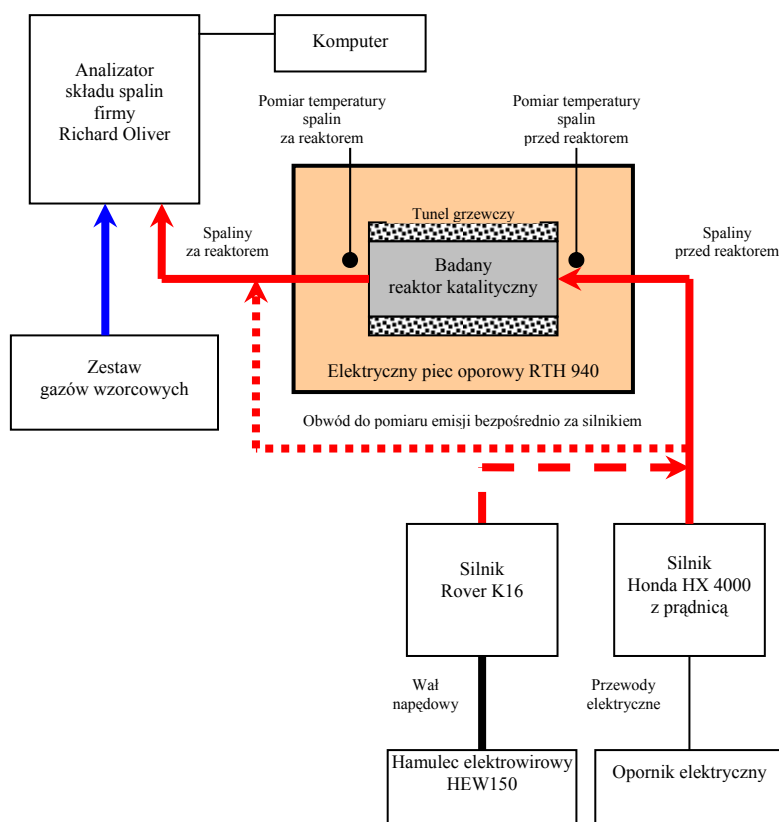
Do badań właściwości magazynowania i redukcji  $\text{NO}_x$  przy zasilaniu silnika mieszanką uboga/bogata służył silnik Honda HX 4000 współpracujący z prądnicą prądu przemiennego. Silnik pracował ze stałą prędkością obrotową wynoszącą  $3000\text{ obr/min}$ . Przełączanie między mieszanką ubogą i bogatą odbywało się poprzez otwieranie lub zamykanie zaworu powietrznego umieszczonego w podstawie gaźnika. Otwarcie zaworu powodowało dostarczenie do silnika dodatkowego powietrza, a co za tym idzie przejście na pracę w trybie mieszanki ubogiej ( $\lambda > 1$ ). Praca na mieszance bogatej ( $\lambda < 1$ ) była realizowana przy zamkniętym zaworze powietrznym. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 6.

Badania właściwości konwersji  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  i  $\text{NO}_x$  przez reaktor, przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną ( $\lambda=1$ ) były prowadzone na silniku Rover K16. W tym przypadku obciążenie realizowane było poprzez hamulec elektrowirowy. Podczas badań oba silniki były zasilane paliwem o zmniejszonej zawartości siarki (poniżej  $10\text{ ppm}$ ). Użyto je w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa szybkiego zatrucia reaktora siarką.

Model reaktora umieszczono w elektrycznym piecu rurowym umożliwiającym zadawanie dowolnych temperatur konwersji katalitycznej. Względne objętościowe natężenie przepływu

spalin wynosiło  $SV= 20000 \text{ h}^{-1}$ . Rejestrowano stężenia składników spalin przed i za modelem badanego reaktora z częstotliwością 0,5Hz. Badania wykonano w następującym cyklu:

- rejestracja stężeń składników spalin silnika Honda HX 4000 w ciągu 60s pracy silnika na mieszance bogatej (redukcja reaktora -  $A/F=14,0$ ) i skokowe przełączenie silnika na zasilanie mieszanką ubogą (magazynowanie  $\text{NO}_x$  -  $A/F=20,0$ ) na okres pracy 100s. Rejestrację taką wykonano dla stałych temperatur konwersji katalitycznej odpowiednio:
  - 162, 214, 285, 318, 360 i 418°C dla reaktora Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - 160, 207, 269, 300, 357 i 407 °C dla reaktora Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- obliczenia bieżącej konwersji CO, HC i  $\text{NO}_x$  w trakcie rejestracji stężeń,
- obliczenia średniej konwersji CO, HC i  $\text{NO}_x$  w cyklu symulującym rzeczywiste warunki pracy silnika spalającego uwarstwione mieszanki ubogie. Cykl ten (okres redukcji + okres magazynowania) wynosił: 5s ( $A/F=14,0$ ) + 60s ( $A/F=20,0$ ),
- pomiary stężeń CO, HC i  $\text{NO}_x$  silnika Rover K16 przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną ( $\lambda=1$ ) oraz obliczenia ich konwersji.

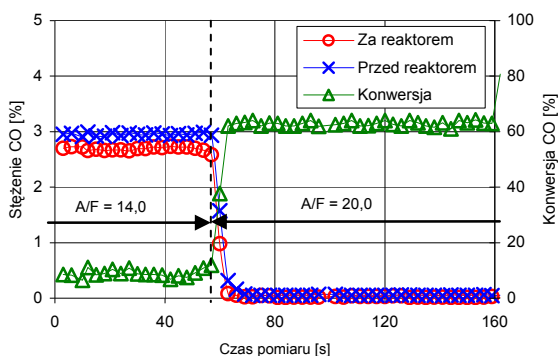


Rys.7. Schemat stanowiska badawczego  
Fig. 7. Schematic of test bench

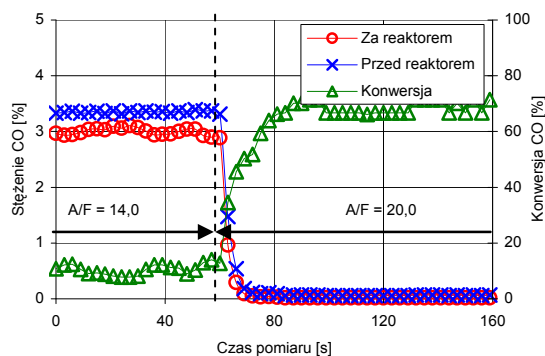
#### 4. Wyniki badań

Na rysunkach 8÷13 przedstawione zostały wyniki pomiarów stężeń tlenku węgla, węglowodorów oraz tlenków azotu mierzone za i przed reaktorami w warunkach zasilania silnika na przemian zmienną mieszanką bogatą i ubogą. Przedstawiono również obliczone wartości konwersji wymienionych składników spalin.

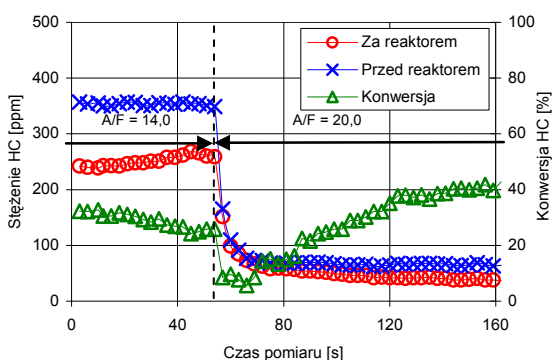
Pomiary wartości stężeń dla obu reaktorów byłyby przeprowadzane dla kilku wartości temperatury pracy reaktorów. Jednak w niniejszym opracowaniu przedstawione zostały wyniki tylko dla temperatur, w których reaktory osiągały najwyższe wartości konwersji tlenków azotu.



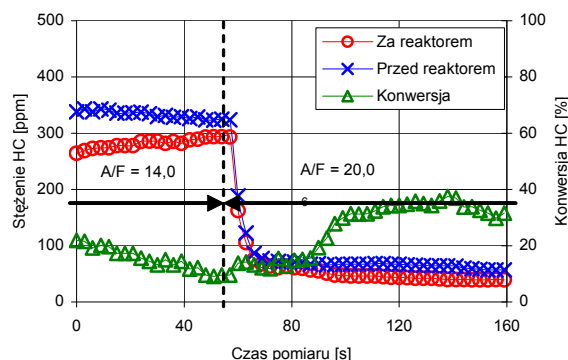
Rys. 8. Stężenia CO za i przed reaktorem Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz wartość konwersji przy temperaturze pracy reaktora wynoszącej 318°C  
Fig. 8. CO concentrations before and after reactor Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and conversion value at the reactor temperature 318°C



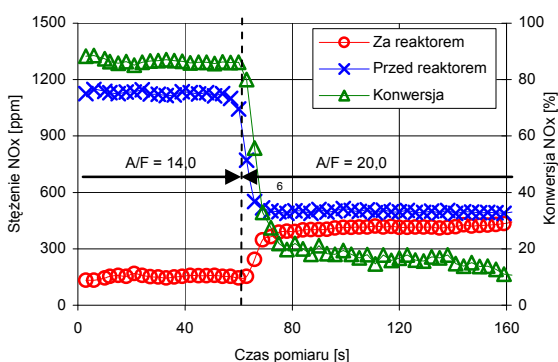
Rys. 9. Stężenia CO za i przed reaktorem Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz wartość konwersji przy temperaturze pracy reaktora wynoszącej 269°C  
Fig. 9. CO concentrations before and after reactor Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and conversion value at the reactor temperature 269°C



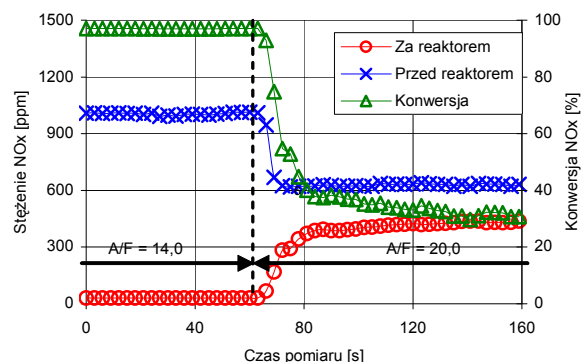
Rys. 10. Stężenia HC za i przed reaktorem Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz wartość konwersji przy temperaturze pracy reaktora wynoszącej 318°C  
Fig. 10. HC concentrations before and after reactor Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and conversion value at the reactor temperature 318°C



Rys. 11. Stężenia HC za i przed reaktorem Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz wartość konwersji przy temperaturze pracy reaktora wynoszącej 269°C  
Fig. 11. HC concentrations before and after reactor Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and conversion value at the reactor temperature 269°C



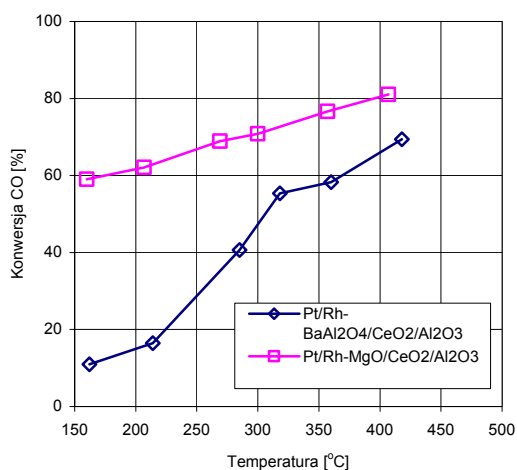
Rys. 12. Stężenia NO<sub>x</sub> za i przed reaktorem Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz wartość konwersji przy temperaturze pracy reaktora wynoszącej 318°C  
Fig. 12. NO<sub>x</sub> concentrations before and after reactor Pt/Rh-BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and conversion value at the reactor temperature 318°C



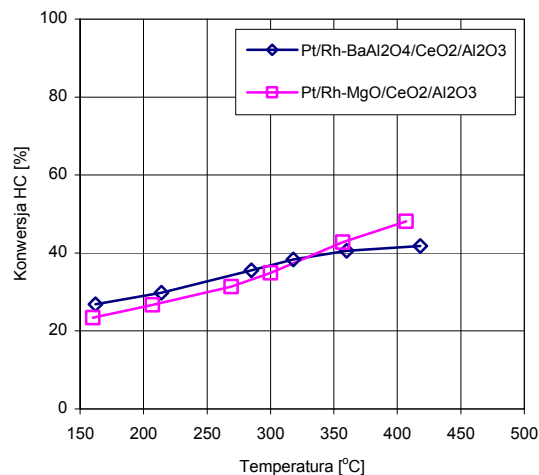
Rys. 13. Stężenia NO<sub>x</sub> za i przed reaktorem Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz wartość konwersji przy temperaturze pracy reaktora wynoszącej 269°C  
Fig. 13. NO<sub>x</sub> concentrations before and after reactor Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and conversion value at the reactor temperature 269°C

Wyniki uzyskane podczas badań prowadzonych na silniku Honda HX 4000 pozwoliły wyznaczyć wartości średniej konwersji CO, HC i NO<sub>x</sub> przy ciągłym spalaniu mieszanki ubogiej oraz przy spalaniu na przemian zmiennej mieszanki bogatej i ubogiej w funkcji temperatury pracy reaktora. Szczególnie ważne z punktu widzenia rzeczywistych zastosowań reaktorów LNT jest drugie z wspomnianych zagadnień, ponieważ pozwala ono w przybliżeniu określić jak dany reaktor zachowywałby się w komercyjnych zastosowaniach.

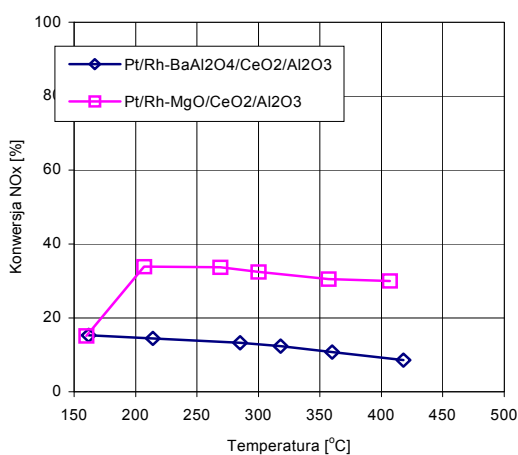
Wyniki obliczeń konwersji dla omówionych przypadków zasilania silnika przedstawione są na rysunkach 14÷19.



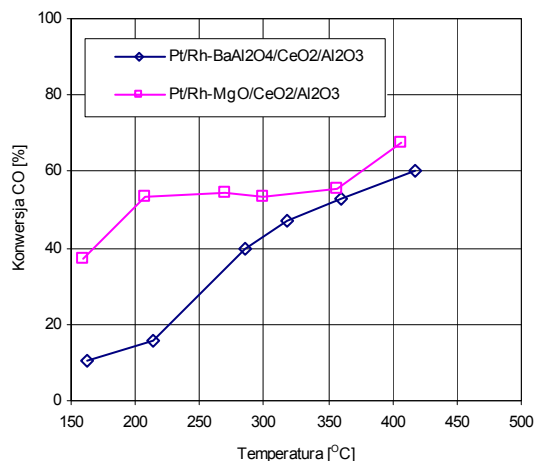
Rys. 14. Zależność średniej konwersji CO od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy ciągłym spalaniu mieszanki ubogiej A/F=20,0  
Fig. 14. Average CO conversion for both reactors in function of temperature under conditions when engine was running low A/F=20,0.



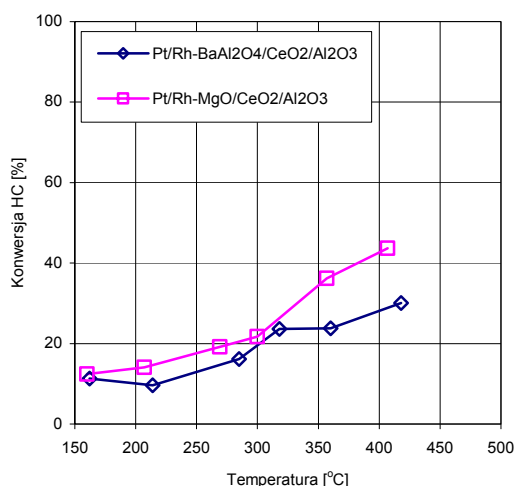
Rys. 15. Zależność średniej konwersji HC od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy ciągłym spalaniu mieszanki ubogiej A/F=20,0  
Fig. 15. Average HC conversion for both reactors in function of temperature under conditions when engine was running low A/F=20,0.



Rys. 16. Zależność średniej konwersji NO<sub>x</sub> od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy ciągłym spalaniu mieszanki ubogiej A/F=20,0  
Fig. 16. Average NO<sub>x</sub> conversion for both reactors in function of temperature under conditions when engine was running low A/F=20,0.

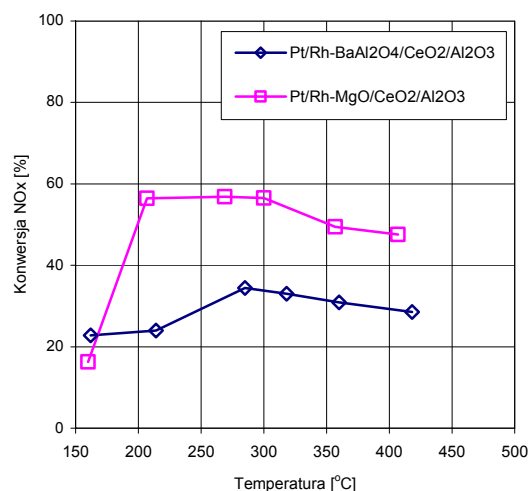


Rys. 17. Zależność średniej konwersji CO od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy spalaniu mieszanki skokowo zmiennej (5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0)  
Fig. 17. Average CO conversion for both reactors in function of temperature under conditions when engine was running by turns rich and low (5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0)



Rys. 18. Zależność średniej konwersji HC od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy spalaniu mieszanki skokowo zmiennej ( $5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0$ )

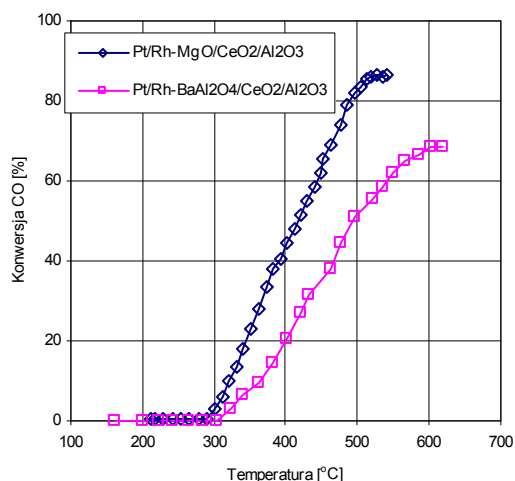
Fig. 18. Average HC conversion for both reactors in function of temperature under conditions when engine was running by turns rich and low ( $5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0$ )



Rys. 19. Zależność średniej konwersji NO<sub>x</sub> od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy spalaniu mieszanki skokowo zmiennej ( $5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0$ )

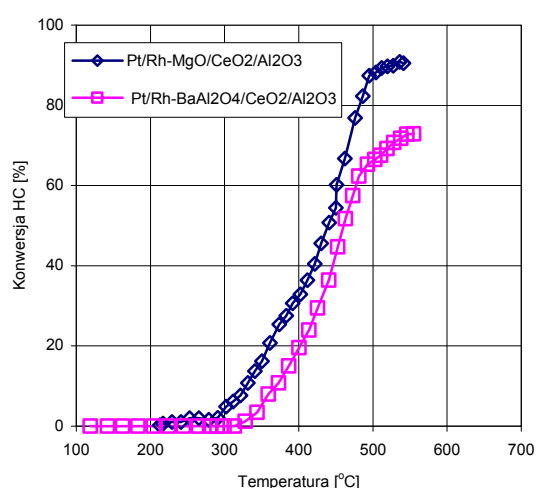
Fig. 19. Average NO<sub>x</sub> conversion for both reactors in function of temperature under conditions when engine was running by turns rich and low ( $5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0$ )

Badania właściwości omawianych reaktorów w warunkach zasilania silnika mieszanką stechiometryczną zostały przeprowadzone na silniku Rover K16. W takim przypadku reaktor LNT zachowuje się jak typowy reaktor trójfunkcyjny. Wartości stężeń tlenu węgla, węglowodorów oraz tlenków azotu za i przed reaktorem posłużyły do wyznaczenia wartości konwersji tych składników spalin w funkcji temperatury pracy reaktora. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunkach 20÷22.



Rys. 20. Zależność konwersji CO od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy ciągłym spalaniu mieszanki stechiometrycznej  $A/F=14,7$

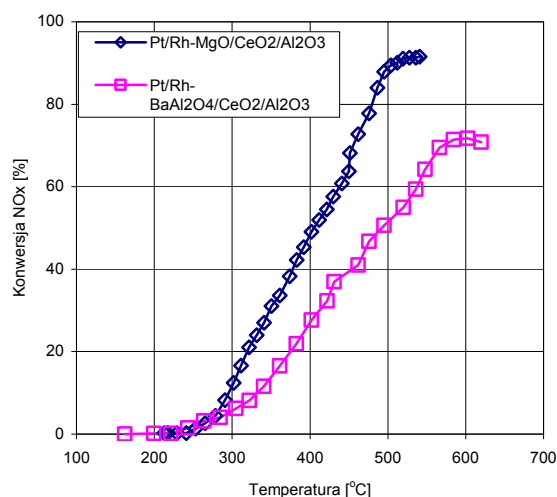
Fig. 20. CO conversion for both reactors in function of temperature at conditions when engine was running stoichiometrical  $A/F=14,7$



Rys. 21. Zależność konwersji HC od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy ciągłym spalaniu mieszanki stechiometrycznej  $A/F=14,7$

Fig. 21. HC conversion for both reactors in function of temperature at conditions when engine was running stoichiometrical  $A/F=14,7$





Rys. 22. Zależność konwersji  $NO_x$  od temperatury dla obu opracowanych reaktorów przy ciągłym spalaniu mieszanki stechiometrycznej  $A/F=14,7$   
 Fig. 22.  $NO_x$  conversion for both reactors in function of temperature at conditions when engine was running stoichiometrical  $A/F=14,7$

## 5. Analiza porównawcza

W celu porównania właściwości katalitycznych obu reaktorów wyznaczono wartości wybranych parametrów charakteryzujących konwersje CO, HC oraz  $NO_x$  dla omawianych warunków zasilania silnika. Otrzymane wyniki przedstawione są w tabelach 1÷3.

gdzie:

- $T_{NO_x, max}$  - temperatura, w której reaktor uzyskiwał najwyższą wartość konwersji  $NO_x$ , przy zasilaniu silnika na przemian zmienną mieszanką bogatą i ubogą,
- $k_{NO_x, max}$  - wartość konwersji  $NO_x$  przy temperaturze pracy reaktora  $T_{NO_x, max}$ ,
- $k_{CO, HC}(T=NO_x, max)$  - wartość konwersji CO i HC dla temperatury, w której uzyskano największą wartość konwersji  $NO_x$ ,
- $k_{CO, HC, NO_x}$  - najwyższe uzyskane wartości konwersji CO, HC i  $NO_x$  przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną,
- $T_{50CO, HC, NO_x}$  – temperatury konwersji 50% trzech analizowanych składników spalin przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną,

Tab. 1. Wartości wybranych parametrów charakteryzujących konwersję stężeń CO, HC i  $NO_x$  oraz wartości charakterystycznych temperatur przy spalaniu mieszanki skokowo zmiennej w cyklu  $5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0$   
 Tab. 1. Values of chosen parameters that describe CO, HC and  $NO_x$  conversion and characteristic temperatures at the conditions when engine was running by turns rich and low in cycle  $5s-A/F=14,0+60s-A/F=20,0$

Oceniany parametr	Reaktor – pułapka $NO_x$	
	Pt/Rh-BaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pt/Rh-MgO/CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$T_{NO_x, max}$ [°C]	285	270
$k_{NO_x, max}$ [%]	35	58
$k_{CO}(T=NO_x, max)$ [%]	40	55
$k_{HC}(T=NO_x, max)$ [%]	15	20

Tab. 2. Wartości wybranych parametrów charakteryzujących konwersję stężeń CO, HC i NO<sub>x</sub> przy ciągłym spalaniu mieszanki ubogiej (A/F = 20,0)Tab. 2. Values of chosen parameters that describe CO, HC and NO<sub>x</sub> conversion at the conditions when engine was running low A/F=20

Oceniany parametr	Reaktor – pułapka NO <sub>x</sub>	
	Pt/Rh- BaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pt/Rh- MgO/CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
k <sub>NO<sub>x</sub>, max</sub> [%]	17	35
k <sub>CO(T=NO<sub>x</sub>, max)</sub> [%]	40	50
k <sub>HC(T=NO<sub>x</sub>, max)</sub> [%]	36	32

Tab. 3. Wartości wybranych parametrów charakteryzujących konwersję stężeń CO, HC i NO<sub>x</sub> oraz temperatury konwersji 50% (T<sub>50</sub>) tych stężeń przy ciągłym spalaniu mieszanki stechiometrycznej (A/F = 14,7)Tab. 1. Values of chosen parameters that describe CO, HC and NO<sub>x</sub> conversion and temperatures of 50% conversion (T<sub>50</sub>) at the conditions when engine was running stechiometrical A/F=14,7

Oceniany parametr	Reaktor – pułapka NO <sub>x</sub>	
	Pt/Rh- BaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pt/Rh- MgO/CeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
k <sub>NO<sub>x</sub></sub> [%]	73	93
T <sub>50NO<sub>x</sub></sub> [°C]	500	400
k <sub>CO</sub> [%]	70	90
T <sub>50CO</sub> [°C]	490	420
k <sub>HC</sub> [%]	75	90
T <sub>50HC</sub> [°C]	460	440

## 6. Wnioski

- Opracowane reaktory-pułapki NO<sub>x</sub> znacznie różnią się swoimi właściwościami katalitycznymi. Wykazano również, że w trakcie zasilania silnika mieszanką bogatą w obu reaktorach występował proces uwalniania i redukcji NO<sub>x</sub>,
- Podczas zasilania silnika mieszanką stechiometryczną oba reaktory zachowywały się jak typowe reaktory trójfunkcyjne
- Najlepszymi parametrami charakteryzuje się reaktor Pt/Rh-MgO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uzyskujący:
  - przy spalaniu mieszanki skokowo zmiennej najwyższą 58% maksymalną, średnią konwersję NO<sub>x</sub> przy temperaturze 270°C, a konwersje stężeń CO i HC odpowiednio 55 i 20% w tej samej temperaturze,
  - przy ciągłym spalaniu mieszanki ubogiej najwyższe konwersje NO<sub>x</sub> i CO (odpowiednio około 35% i 50%) w temperaturze 270 °C przy porównywalnej konwersji stężeń HC,
  - przy ciągłym spalaniu mieszanki stechiometrycznej najwyższe (około 90%) konwersje stężeń wszystkich trzech składników toksycznych w najniższych temperaturach (400-440°C).

## Literatura

- [1] Brogan, M., Brisley, R., Walker, D., Webster, D., Boegner, W., Fekate, N., Kramer, M., Krutzsch, B., Voightlander, D., *Evaluation of NO<sub>x</sub> Storage Catalysts as an Effective System from NO<sub>x</sub> Removal from the Exhaust of Lean Burn Gasoline Engines*, SAE Technical Paper 952490.
- [2] Miyoshi, N., Matsumoto, S., Katoh, K., Tankak, T., Harada, J., Takahashi, N., Yokota, K., Sugiura, M., Kasahara, K., *Development of New Concept Three Way Catalyst for Automotive Lean Burn Engines*, SAE Technical Paper 950809.

- [3] Boegner, W., Kramer, M., Krutzsch, B., Pischinger, S., Voightlander, D., Wenniger, F., Wirbleit, F., Brogan, M., Brisley, R., Webster, D., *Removal of Nitrogen Oxides from the Exhaust of Lean-tune Engine*, Applied Catalysis B Environmental 7. 153-171, 1995.
- [4] Feeley, J., Deeba, M., Farrauto, R., *A catalytic management system for lean burn engines*, Catalysis and Automotive Pollutin Control IV. Studies in surface Science and Catalysis. Vol. 116. 1998 Elsevier Science B,V.
- [5] Hepburn, J., Thanasiu, E., Dobson, D., Watkins, W., *Experimental and Modeling Investigations of NO<sub>x</sub> Trap Performance*, SAE Technical Paper 962051.
- [6] Takeuchi, M., Matsumoto S., *NO<sub>x</sub> Storage Reduction Catalysts for Gasoline Engines*, In Topics in Catalysis; Burch R.: Ed 2004, Vol.28.

