

Dr. JASNA GOLUBIĆ  
Mr. NADA ŠTRUMBERGER  
Fakultet prometnih znanosti  
Zagreb, Vukelićeva 4

Sigurnost i ekologija prometa

Pregledni članak

UDK: 629.113.5 : 504.06

Primljeno: 25. 10. 1993.

Prihvaćeno: 16. 11. 1993.

## SMANJENJE ŠTETNOSTI ISPUŠNIH PLINOVA DIZELSKOG MOTORA

### SAŽETAK

U radu su predočene neke mogućnosti smanjenja štetnosti ispušnih plinova dizelskih motora. Za pročišćivanje ispušnih plinova mogu se ugraditi prečistači (filteri), i to keramički prečistač za smanjenje čestica čađe i vodeni prečistač za plinove. Osim prečistača, ugrađuje se oksidacijski katalizator (OXI - kat). Testirani su hibridni sustavi na golfovima, a to je kombinacija motora s unutarnjim izgaranjem i na električni pogon. Takvo je vozilo nazvano "eko-golf".

Kao alternativno gorivo koristi se mješavina dizelskoga goriva i n-butanola u volumskom omjeru 60:40, te smanjuje emisija  $NO_x$  oko 8%, a čestica do 36%.

Sve granične vrijednosti komponenata ispušnog plina dizelskog motora dane su u testu ECE R49.

### 1. UVOD

Razvoj industrije nužno je uvjetovao i razvoj transporta i transportnih sredstava pri čemu važnu ulogu ima dizelski motor. Takav motor koristi plinsko ulje kao gorivo. Danas se traže goriva znatno bolje kvalitete, a na to su utjecali novi propisi o zaštiti čovjekova okoliša, koji znatno mijenjaju specifikaciju o kvaliteti uporabljenih goriva [1].

Dizelski motori u osobnim automobilima uvelike štete okolini u nekim europskim zemljama. Emisija neizgorenih ugljikovodika i ugljik(II)oksida iz dizelskog motora svedena je na najmanju moguću mjeru, a kontrolira se ispuštanje ovih onečišćivača zraka:

- dušični oksidi,
- krute čestice (koje povremeno mogu biti emitirane u prekomjernim količinama),
- organski spojevi i
- sumporni oksidi (od uporabe goriva kontaminiranog sumporom).

Tablica 1. Nova ograničenja za emisiju ispušnih plinova u Europi

Radni volumen ( $cm^3$ )	CO (g/test)	HC+ $NO_x$ (g/test)	$NO_x$ (g/test)	Neizgorene čestice	Datum primjene
Dizelski motor	45	15	6	1,1	1.10.1990. novi modeli
1400	(54)	(19)	(7,5)	(1,4)	1.10.1991. stari modeli
Dizelski motor	30	8	-	1,1	1.10.1991. novi modeli
1400 2100	(36)	(10)	-	(1,4)	1.10.1993. stari modeli
Dizelski motor	30	8	-	1,1	1.10.1988. novi modeli
2100	(36)	(10)	-	(1,4)	1.10.1989. stari modeli

Smanjenje emisije vozila na dizelski pogon postiže se:

- modifikacijom goriva smanjenjem sadržaja sumpora,
- poboljšanjem potpunosti izgaranja, za neke komponente ispušnog plina, te
- specifičnim podešavanjem motora.

Iznosi li sadržaj sumpora u gorivu 0,3 do 0,4 težinskih postotaka i daje u današnjih motora sulfat i vodu, njihov je udio od oko 0,04 do 0,006 g/HPk. Smanjenjem sadržaja sumpora na 0,05 težinskih postotaka, smanjuje se udio sulfata i vode na oko 0,010 do 0,015 g/HPk - prema propisima u Kaliforniji.

Optimalizacija stvaranja smjese i adaptacija sustava vodenja ispušnih plinova, koji su regulirani mikroprocesorima, mogu biti u svezi s jednim oksidacijskim katalizatorom (konverterom) i time se postiže znatno smanjenje emisije [4].

### 2. ŠTETNE TVARI ISPUŠNOG PLINA DIZELSKOG MOTORA

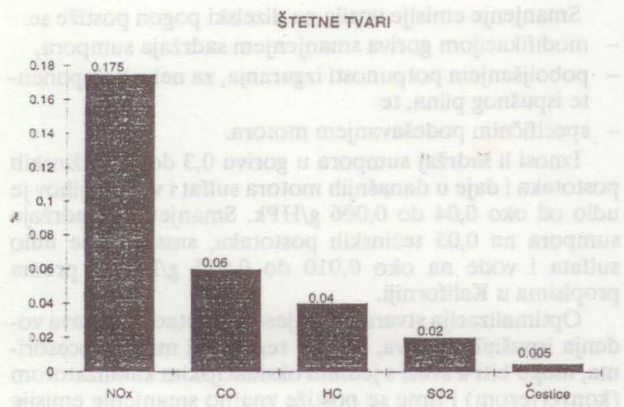
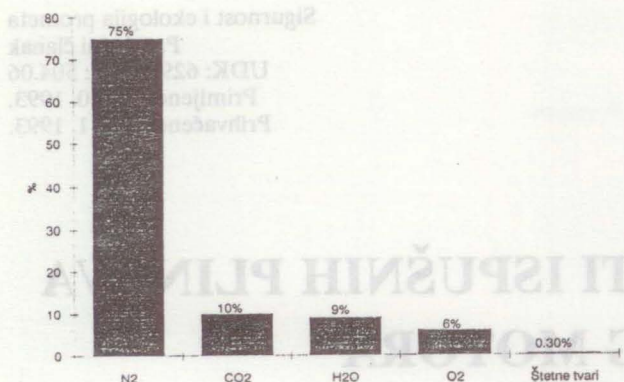
Poznato je da dizelski motori rade s viškom zraka pri punom opterećenju 20 do 30%. Tako ispušni plin motora sadrži prosječno oko 6% kisika i 75% dušika, iz zraka za izgaranje, 10% ugljik(IV)oksida i 9% vode, kao proizvod potpunog izgaranja.

Sadržaj štetnih tvari ispušnog plina dizelskog motora u ugljik(II)oksida i ugljikovodika u redu je veličine kao i u Ottova motora s katalizatorom. U emisiji  $NO_x$  niža je vrijednost u dizelskih motora nego u Ottova motora bez katalizatora.

Istraživanja su pokazala da je u dizelskom motoru, zbog uvjeta gorenja, emisija  $NO_x$  pet do deset puta niža nego u Ottovu motoru. U njih se postiže znatno smanjenje emisije  $NO_x$  uvođenjem visokotlačnog uštrcavanja goriva s programiranom elektroničkom regulacijom uz malu potrošnju ulja i filterom za čestice.



UKUPNI ISPUŠNI PLINOVI



Slika 1. Sastav ispušnog plina dizelskog motora

U dizelskom motoru ne može se primijeniti katalitički konverter, zbog viška zraka, nego se koristi oksidacijski konverter (OXI kat) i sustav s povratnim vođenjem ispušnog plina.

Pri izgaranju u dizelskom motoru stvara se čađa, kao vrsta "crnih pahuljica" iz ugljika, na čijoj su gornjoj površini čvrsto nataloženi ugljikovodici, i to kondenzirani, koji potječu od neizgorivih ugljika iz motornih ulja [3].

2.1. Dim i čađa - problemi dizelskog motora

Dim i čađa nedvojbeno čine najozbiljnije probleme u dizelskom motoru.

Dim se danas tretira s gledišta ometanja vidljivosti na prometnicama, čime se smanjuje sigurnost u vožnji. Opasnost od dima nije toliko u njegovu ometanju vidljivosti i disanja i zbog njegova mirisa, koliko u svojstvu da na sebe veže druge toksične tvari. Tu pripadaju sumporni i dušični oksidi i cijeli niz ugljikovodika, među kojima i benzo(a)piren - karcinogena tvar.

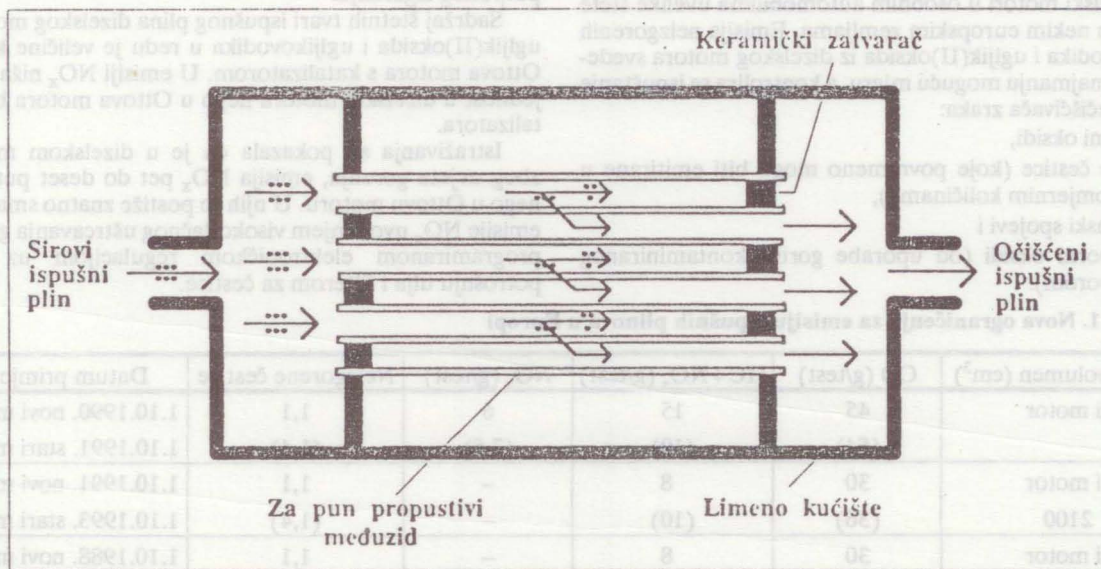
Hladan dim nastaje pri startanju motora i pri malom opterećenju. Sadrži pretežito neizgorive komponente pri niskoj temperaturi u prostoru za izgaranje. Veličina kapljica je otprilike 1-1,5 mikrona, što uvjetuje bijelu boju dima.

Topli dim nastaje pri nepotpunom izgaranju, a pri visokoj temperaturi i punom opterećenju sastoji se od djelića čestica veličine 0,3 - 1 mikron.

U SAD-u postoje strogi propisi o emisiji štetnih plinova motora radi očuvanja čovjekova okoliša. Tako je, npr., postignuto da se u modelima vozila proizvedenima nakon 1982. godine (recikliranjem plina i poboljšanjem procesa izgaranja) snizi razina emisije krutih čestica na svega 0,12 g/km, a NO<sub>x</sub> na 0,62 g/km [5].

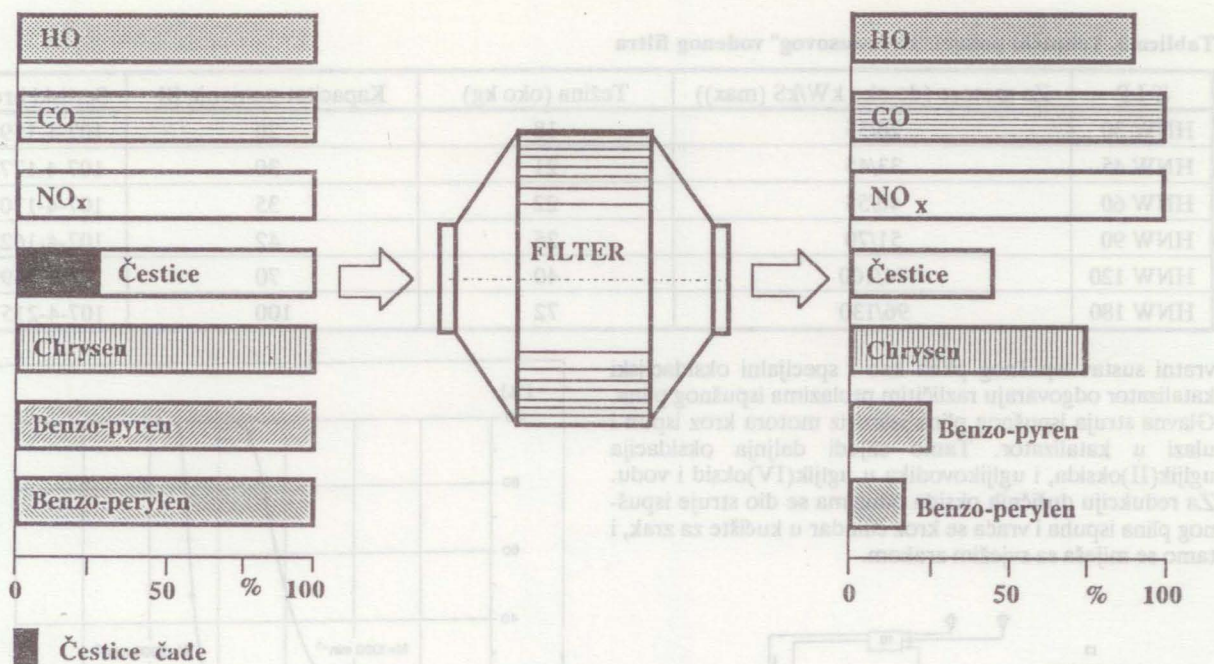
Tim se propisima za dizelske motore proizvođači automobila teško prilagođuju, no oni koji se prilagode imaju dobru prodaju na tržištu. Tako je američki Mercedes (Mercedes Benz of North America - MBNA) smanjio emisiju štetnih plinova dizelskog motora ugradbom keramičkog prečišćivača (filtra) za čađu, koji se nalazi u kućištu od nerđajućeg čelika i koji je montiran ispred ispušnog lonca. Veliki broj tankih cjevčica u obliku saća "ulazi" u prečišćivač. Vrući ispušni plinovi moraju proći kroz prečišćivač prije nego iziđu iz ispušnih cijevi, a u samom prečišćivaču ulaze kroz jednu cjevčicu a izlaze kroz susjednu.

Keramička struktura prečišćivača zadržava čestice čađe da se pritom prečišćivač ne začepe. Keramički materijal "Cordierite" obložen je katalitičkim slojem vanadijeva oksida, na kojemu izgaraju čestice čađe na temperaturi višoj od 633 K (360°C). Dakle, čađa ostaje u keramičkim porama, gdje izgara, pa se na taj način prečišćivač sam čisti. Prečišćivač je nazvan "Trapoxidiser", a ima i nedostataka: teži oko 1,5



Slika 2. Prikaz izgradnje monolitnog prečišćivača





Slika 3. Djelovanje prečišćavača s keramičkim monolitom na ispušne plinove dizelskog motora

kg, duljine je 15 cm i promjera 14 cm, a motor u koji je ugrađen gubi na snazi oko 4,3%. Najvažnije se ipak postiže, jer dizelski motor bez prečišćavača za čađu izbacuje 0,55 grama čađe na svakih 1,6 km vožnje. Strogi propisi u SAD-u dopuštaju 0,2 grama čađe po 1,6 km [6].

Tablica 2. Koncentracija onečišćenja zraka u nekim američkim gradovima

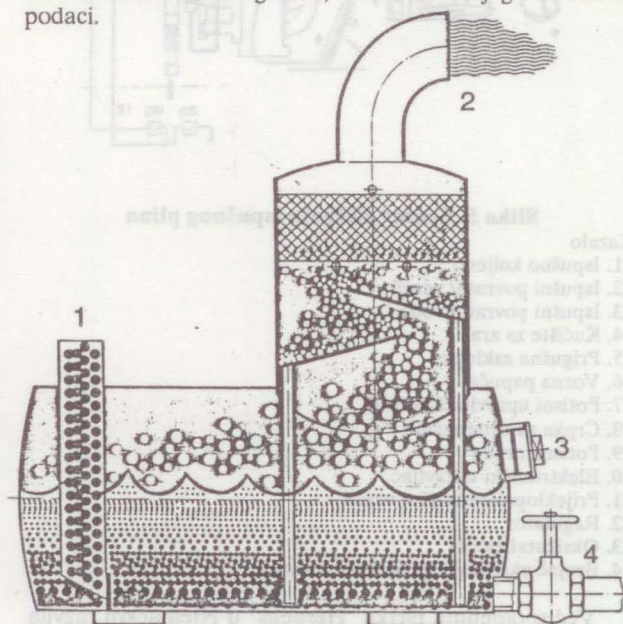
Štetne tvari	Prosječna vrijednost
ugljik(IV)oksid, CO <sub>2</sub>	< 0,04 ppm
dušik(II)oksid, NO	5,0 do 10,0 ppm
dušik(IV)oksid, NO <sub>2</sub>	0,1 do 0,23 ppm
aldehidi	0,04 do 0,18 ppm
sumpor(IV)oksid, SO <sub>2</sub>	0,06 do 0,25 ppm
kloridi	0,02 do 0,037 ppm
amonijeve soli	0,018 do 0,04 ppm
fluoridi	0,003 do 0,018 ppm
prašina u zraku (<2 μ)	0,26 do 0,87 mg/m <sup>3</sup>
aluminij	4,0 do 8,6 y/m <sup>3</sup>
željezo	4,4 do 15,1 y/m <sup>3</sup>
olovo	0,6 do 4,5 y/m <sup>3</sup>

ppm = parts per million = cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
y = 10<sup>6</sup>g

Njemačka tvrtka "Heraeus" proizvodi također jednu vrstu vodenog filtra za dizelske motore, koji se rabi za pročišćavanje (pranje) štetnih ispušnih plinova dizelskog motora. Prednosti "Heraeusova" vodenog filtra ispušnih plinova evidentirane su prije svega u zatvorenom prostoru, tj. u industriji, u viličara, građevinskih strojeva i sl. On je posebno pogodan pri startanju i ubrzanju, pri čemu se postiže znatno bolja kvaliteta ispušnih plinova, jer je njime moguće znatno smanjiti čestice čađe, ulja i ostalih štetnih tvari. Radi na principu da vrući ispušni plinovi ulaze u tekućinu (vodu za njihovo pranje) i snažnim miješanjem u vodi plinovi se hlade i čiste od čađi i ostalih nečistoća.

Svi dijelovi koji dolaze u dodir s tekućinom sastoje se od nerđajućeg čelika ili nekoga drugoga nekorodirajućeg materijala.

Na slici 4. je shematski prikaz strujanja ispušnih plinova u Heraeusova vodenog filtra, a u tablici 3. njegovi tehnički podaci.



Slika 4. Shematski prikaz rada "Heraeusovog" vodenog filtra za dizelske motore  
1-ulazna veza; 2- izlazna veza;  
3 - veza za punjenje; 4 - ispušni ventil

## 2.2. Oksidacijski katalizator (oksidacijski konverter)

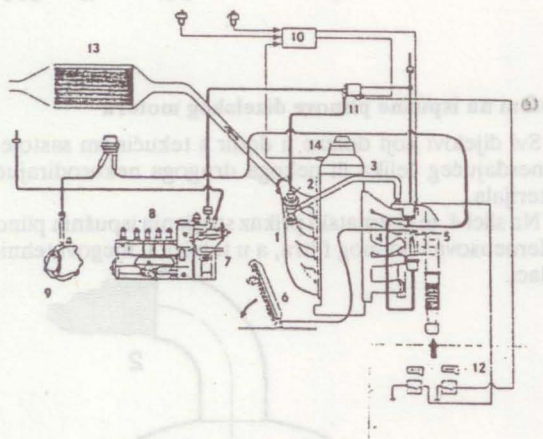
Za smanjenje emisije čestica, ugljik(II)oksida, ugljikovodika i dušičnih oksida održala se naročito varijanta siromašnih štetnih tvari osobnih vozila Mercedes-Benz na dizelski pogon kao optimalna kombinacija iz US-serije. Po-



Tablica 3. Tehnički podaci "Heraeusovog" vodenog filtra

TIP	Za motore (do oko kW/kS (max))	Težina (oko kg)	Kapacitet punjenja [l]	Serijski broj
HNW 30	26/35	18	20	107-4-1593
HNW 45	33/45	21	30	107-4-1770
HNW 60	40/55	22	35	107-4-1702
HNW 90	51/70	25	42	107-4-1622
HNW 120	74/100	40	70	107-4-1690
HNW 180	96/130	72	100	107-4-2157

vratni sustav ispušnog plina kao i specijalni oksidacijski katalizator odgovaraju različitim prolazima ispušnog plina. Glavna struja ispušnog plina izlazi iz motora kroz ispuh i ulazi u katalizator. Tamo slijedi daljnja oksidacija ugljik(II)oksida, i ugljikovodika u ugljik(IV)oksid i vodu. Za redukciju dušičnih oksida oduzima se dio struje ispušnog plina ispuha i vraća se kroz cilindar u kućište za zrak, i tamo se miješa sa svježim zrakom.



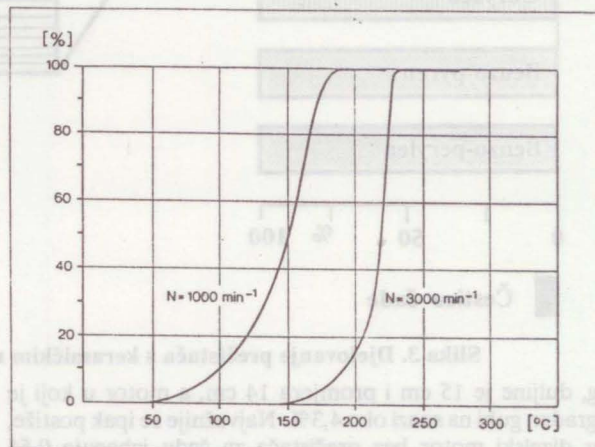
Slika 5. Sustav čišćenja ispušnog plina

Kazalo

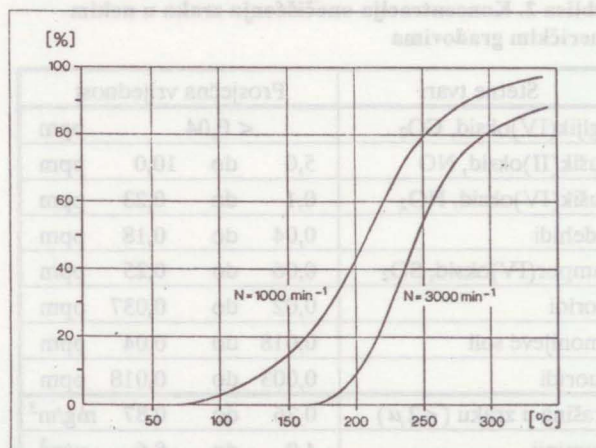
1. Ispušno koljeno
2. Ispušni povratni ventil
3. Ispušni povratni vod
4. Kućište za zrak
5. Prigušna zaklopka
6. Vozna papučica
7. Potisni upravljački ventil
8. Crpka za uštrcavanje
9. Potisna crpka
10. Elektronički upravljač
11. Prijemni električni ventil
12. Regulator
13. Oksikatalizator
14. Brojač okretanja (pokazivač brzine)

Već spomenuta tvrtka "Heraeus" u Njemačkoj razvila je oksidacijski katalizator "Herapur 90 D", koji sve štetne tvari pretvara u neštetne, tj. u ugljik(IV)oksid i vodu. Način pretvorbe pokazan je na dijagramu (sl. 6. i 7), kojim se objašnjava ovisnost katalizatora o temperaturi, te je očividno da su u dizelskih motora i pri nastupajućim nižim temperaturama opet postignute visoke vrijednosti ugljik(II)oksida i ugljikovodika.

Opremanje vozila katalizatorom Herapur 90 D omogućuje nesmetano korištenje dizelskog motora u zatvorenom prostoru, što znači da se i on, kao i "Heraeusov" vodeni filter, primjenjuje u prvom redu na viličarima, u građevinskim strojevima, agregatima za struju, toplanama i slično.



Slika 6. Smanjenje ugljik(II)oksida mjereno na jednom dizelskom motoru 40 kW



Slika 7. Smanjenje ugljikovodika mjereno na jednom dizelskom motoru 40 kW

Prednosti Herapura 90 D su:

- kompaktna izgradnja,
- jednostavna montaža ispod poklopca motora, te
- vrlo mala početna temperatura rada motora.

Volumen  $V_k$  Herapur-katalizatora izračunava se prema izrazu:

$$V_k = \frac{V_k \cdot n}{4000}$$

gdje je:

$V_k$  - zapremina motora [l]

$n$  - broj okretaja (o/min)

Budući da se zaštita okoliša pojavljuje u industriji kao najvažniji čimbenik u konkurentnoj utakmici, sve više se



Tablica 4. Vrijednosti goriva

		Dizelsko gorivo	n-butanol	B-20	B-40
Gustoća (15°C)	kg/dm <sup>3</sup>	0,82-0,86	0,81	0,81-0,85	0,85-0,84
Viskozitet (20°C)	mm <sup>2</sup> /s	2,8	3,6		
Vrelište	°C	175-360	118		
Toplina isparavanja	kJ/kg	251	590	320	390
Spec. toplinski kapaciteti	kJ/kgK	1,96	2,43	2,00	2,14
Toplinska vrijednost	MJ/kg	42,5	33,1	40,6	38,7
Min. potreban zrak	kg/kg	14,5	11,2	13,8	13,2
Udio mase elemenata	C %	86	65	82	77
	H %	14	14	14	14
	O %	0	21	4	9

govori o alternativnim rješenjima za smanjenje emisije onečišćivača iz prometnih sredstava. Takav jedan proizvođač je i tvrtka Volkswagen. Već godinama inženjeri Volkswagena rade na vozilu koje će znatno manje onečišćivati okoliš, tako da testiraju npr. biljno ulje, alkohol, ugljik i električni pogon vozila. "Eko-golf" je takvo vozilo, koje ima dizelski motor s vrlo malim količinama štetnih sastojaka.

Ispušni plin pročišćuje jedan dizelski katalizator, čiji je konstruktor, također, ista tvrtka, a automatika u vozilu omogućuje da već i onako povoljna potrošnja goriva bude smanjena za 1/3, iz čega proizlazi da "eko-golf" troši samo 4 litre goriva na 100 km [9].

Tvrtka Volkswagen zajedno s Tehničkom višom školom u Zürichu testirala je i hibridni sustav pogona na dvadeset golfova. "Hibrid" znači kombinaciju motora s unutarnjim izgaranjem i električnim pogonom. Pri konstantno mirnoj vožnji zadovoljava elektromotor od 7,355 kW, međutim, ako vozač ubrzava, tj. vozi hibrid-golfom većom brzinom od 60 km/h, preuzima pogon dizelski motor s katalizatorom. Vožnja "eko-golfom" je primjer rješenja kako gradove učiniti čistijim, tišim i vrednijim.

Da se dosegne redukcija ispuha štetnih tvari dizelskih motora, te da se smanji emisija štetnih tvari, primjenjuje se smjesa n-butanola i goriva. Uzete su tri vrste:

- uobičajeno gorivo kao usporedni uzorak,
- mješavina od 80 vol. % goriva i 20 vol.% n-butanola (B-20),
- mješavina od 60 vol.% goriva i 40 vol.% n-butanola (B-40).

U tablici 4. su usporedni podaci osnovnih svojstava svih triju goriva.

Pokazalo se da mješavina od 40 vol.% n-butanola u gorivu smanjuje emisiju NO<sub>x</sub> oko 8% a čestice do 36%. Bolji rezultati se dobiju ako vozilo ima konstantnu brzinu vožnje: emisija NO<sub>x</sub> se smanjuje oko 12%, a čestice oko 28%.

Usprkos povećanju emisije ugljikovodika za oko 0,1 g/kWh i ugljik(II)oksida za oko 0,8 g/kWh, mogu se još uvijek održavati granične vrijednosti prema Pravilniku ECE-R 49 (3,5 g/kWh za ugljikovodike i 14 g/kWh za ugljik(II)oksid, ako je mješavina B-20).

Djelomična emisija u dizelskih motora sastoji se od dviju faza: čvrste faze gdje je glavna komponenta čađa i tekuće faze, koju tvore kondenzirani ugljikovodici.

Dodatak n-butanola gorivu i kao uporabljena mješavina pogodna je u naročito opterećenim područjima npr. u gradovima za komunalna vozila, teksi, gradske autobuse kao i ostala vozila [8].

## ZAKLJUČAK

U radu su obrađene štetne tvari ispušnih plinova dizelskih motora kao i neke mjere kojima se može smanjiti onečišćenje zraka. Ugradbom keramičkog prečistača (filtera) montiranog ispred ispušnog lonca smanjuju se čestice čađe. Za pročišćivanje ispušnih plinova dizelskih motora rabi se i vodeni prečistač (filter) tvrtke Heraeus.

Za smanjenje emisije čestica, ugljik(II)oksida, ugljikovodika i dušičnih oksida (NO<sub>x</sub>) primjenjuje se oksidacijski katalizator (OXI-kat) prolaskom kroz njega dolazi do oksidacije ugljik(II)oksida u ugljik(IV)oksid i ugljikovodika u vodu, a za redukciju dušičnih oksida (NO<sub>x</sub>) oduzima se kao dio struje ispušnog plina ispuha i vraća se kroz cilindar u kućište za zrak i tamo se miješa sa svježim zrakom. Jedno od alternativnih rješenja je korištenje mješavine goriva i alkohola, i to n-butanola, u volumskim postocima 80:20 i 60:40 (oznaka B-20 i B-40).

Pokazalo se da se, uporabom mješavina dizelskoga goriva i n-butanola u volumskom omjeru 60:40, smanjuje emisija NO<sub>x</sub> oko 8% , a čestica do 36%. Mješavina je naročito pogodna za korištenje u opterećenim područjima, npr. u gradskom prometu.

Zajedno s Tehničkom višom školom u Zürichu testirani su hibridni sustavi pogona na golfovima. "Hibrid" znači kombinaciju motora s unutarnjim izgaranjem i na električni pogon.

Pri konstantnoj mirnoj vožnji zadovoljava elektromotor od 7,355 kW. Međutim, ako vozač ubrzava, tj. vozi hibrid-golfom brzinom većom od 60 km/h, pogon preuzima dizelski motor s katalizatorom. Vožnja "eko-golfom" je primjer kako naše gradove učiniti čistijim, tišim i vrednijim.

Za industriju dizelskih motora postavljaju se sve strože granične vrijednosti za ugljikovodike, ugljik(II)oksid, te dušične okside (NO<sub>x</sub>) i od 1. srpnja 1992. određene su i limitirane vrijednosti za čestice čađe. Sve te vrijednosti utvrđene su testom ECE R49.

## SUMMARY

### HARMFUL DIESEL ENGINE EXHAUST EMISSIONS REDUCTION

The paper deals with some possibilities of reduction of Diesel engine exhaust emission hazards. For purposes of purification of exhaust emissions, the in-built filters can be provided, like ceramic filters for soot and water filters for gases. The oxidation catalyst may also be provided in addi-



tion to filters. Hybrid systems have been tested in "Golf" automobiles i.e. the combination of internal combustion engine and electric drive. This vehicle has been named "Eco-Golf".

A mixture of Diesel fuel and n-butanol in the ratio of 60:40 has been used as the alternative fuel introducing the reduction of  $NO_x$  by 8% and of particles by 36%.

All limit values of Diesel engine exhaust gas components have been given in ECE R49 test.

LITERATURA

[1] Ford - Automotive Diesel-Fuel, A specification for Europe, Oktober 1985.  
 [2] Concowe report 4/88. Trends in motor vehicle emission and fuel consumption regulations - 1988.

[3] Reglementations "Pollution", direction des études moteurs, april 1989.  
 [4] G. CAR et al.: Dizelska goriva - danas i sutra u rafineriji nafte Rijeka, Goriva i maziva, 1990., 29, 1, 25-39.  
 [5] M. FORTNAGEL, P. MOSER: Die Mercedes-Benz Dieselmotorenbaureihe für Personenkraftwagen mit Abgasdruckführung und Oxidationskatalysator, MTZ, 53, 1992, 1, 14-21.  
 [6] H. GARTHE: Russfiltertechnik für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren, Verkehr und Technik, 1989, 7, 256-262.  
 [7] K. KASMEIER: Der Beitrag der elektronischen Dieselregelung zur Emissionsverringierung und Komfortseigerung, ATZ/MTZ, Sonderheft Motor und Umwelt'92, 20-22.  
 [8] J. BREDENBECK, H. PUCHER: Einsatz von n-Butanol als Kraftstoffkomponente, MTZ, 53, 1992, 2, 74-78.  
 [9] Wir und Unsere Umwelt, Bundesumweltministerium, Bonn, 2, 1992, 16.

U radu su opisane štete i način njihove smanjenja u dizelskim motorima kao i način njihove emisije. Kombinacija unutarnjeg izgaranja i električnog pogona testirana je u "Golf" automobilima. Ovo vozilo je nazvano "Eco-Golf".

Koristila se smjesa dizelskog goriva i n-butanola u omjeru 60:40, što je omogućilo smanjenje emisije  $NO_x$  za 8% i čestica za 36%.

Sve vrijednosti granica emisije komponenti ispušnih plinova dizelskog motora su dane u testu ECE R49.

SUMMARY

HARMFUL DIESEL ENGINE EXHAUST EMISSIONS REDUCTION

The paper deals with some possibilities of reduction of Diesel engine exhaust emission hazards. For purpose of purification of exhaust emissions, the in-built filters can be provided like ceramic filter for soot and water filters for gases. The oxidation catalyst may also be provided in addition.

Govor o smanjenju štetnosti ispušnih plinova dizelskog motora kao i način njihove emisije. Kombinacija unutarnjeg izgaranja i električnog pogona testirana je u "Golf" automobilima. Ovo vozilo je nazvano "Eco-Golf".

Koristila se smjesa dizelskog goriva i n-butanola u omjeru 60:40, što je omogućilo smanjenje emisije  $NO_x$  za 8% i čestica za 36%.

Sve vrijednosti granica emisije komponenti ispušnih plinova dizelskog motora su dane u testu ECE R49.