



## KARAKTERISTIKE BUDUĆIH MOTORNIH ULJA ZA MOTORE NISKIH EMISIJA

Radinko GLIGORIJEVIĆ, Jeremija JEVTIĆ, Đuro BORAK,  
IMR-INSTITUT, 11090 Beograd, P. Dimitrija 7, Srbija

### Rezime

U protekle dve decenije motorna industrija je bila pod stalnim pritiskom smanjenja štetnih emisija i emisije CO<sub>2</sub> koje utiču na životnu sredinu. Istovremeno korisnici motorh vozila teže ka što manjim troškovima. Sve to zahteva razvoj novih motornih ulja koja mogu obezbediti bolju ekonomiju goriva i duži period zamene, što je posebno važno kod teških dizel motora.

Ovi izazovi mogu biti dostignuti primenom adekvatnih motornih tehnologija i kvalitetnijih goriva i ulja. Sa tog aspekta rad daje jedan pogled na trend razvoja motornih ulja koji ide u pravcu korišćenja nižih viskoznih gradacija, nižeg sadržaja sumpora, fosfora, sulfatnog pepela i manje isparljivost, čime se postiže smanjenje potrošnje goriva i smanjenje emisije, osobito NO<sub>x</sub> i čestica.

**Ključne reči:** motorno ulje, emisija, motor

## FUTURE LUBRICANTS CHARACTERISTICS OF LOW EMISSION ENGINES

### Summary

Over the past two decades the motor industry has progressively been faced with the constant challenge to reduce CO<sub>2</sub> and hazardous emissions that affect the environmental. At the same time, fleet customers demand reduced operating costs. This necessitates the development of engine oils which can provide maximum fuel economy and extended oil drains, which still maintain engine durability. This is particularly important in heavy-duty diesel engine.

In this content the paper gives an overview of development trend of engine oils which go to in directions of low viscosity, with low content sulfur, phosphor, sulfur ash and low volatility, resulting in reduction emission, especially NO<sub>x</sub> and particulate, and increase of fuel efficiency.

**Keywords:** engine oils, emissions, engines

### 1. UVOD

Smanjenje potrošnje goriva je već duži niz godina stalna briga proizvođača motora i vozila, a biće i u narednim godinama. Motorno ulje doprinosi smanjenju potrošnje goriva, a time i smanjenju emisije CO<sub>2</sub> i drugih štetnih emisija.

Dakle, pored svih drugih zahteva od motornih ulja se traži smanjenje emisije CO<sub>2</sub> štetnih

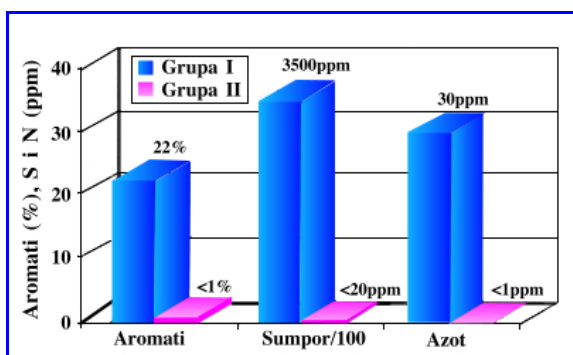
emisija u izduvnim gasovima, pre svih emisije NO<sub>x</sub> i emisije čestica i eliminaciju njihovog štetnog uticaja na katalitičke konvertore i senzore u izduvnom sistemu.

Konvencionalna mineralna bazna ulja se najčešće dele prema stepenu zasićenja, sadržaju sumpora i viskozitetnog indeksa i prema API svrstavaju u 4 grupe (tab.1).

**Tabela 1.** API kategorizacija baznih ulja

Grupa	Sadržaj S-a (%)	Zasićenje (%)	V.I.	Noack %
I	> 0.03	< 90	80-120	30
II	≤ 0.03	≤ 90	80-120	25
III	≤ 0.03	≤ 90	≥ 120	11
IV	Svi Polialfaolefini (PAO)			11
V	Ostala koja nisu uključena u grupe I-IV			<11

Konvencionalna mineralna bazna ulja grupe I imaju prilično visok sadržaj sumpora i aromata (do 25%) i nivo zasićenja preko 75% (sl.1).



Slika 1. Karakteristike ulja grupe I i II prema API

Sa sl.1 vidi se da grupa II ima drastično manji sadržaj aromata (1%) u odnosu na grupu I.

Sve rigorozniji zahtevi u pogledu radnih uslova i smanjenju emisije doveli su do ekspanzije sintetičkih motornih ulja, čije prednosti u odnosu na mineralna ulja su :

- veoma dobre reološke karakteristike kako na niskim tako i na visokim temperaturama,
- ispunjavaju dva kontradiktorna zahteva, nizak viskozitet i malu isparljivost,
- veoma visoka otpornost na prekid uljnog filma,
- bolje antihabajuće i antizaribavajuće osobine,
- dobre dispergantske osobine,
- smanjenje potrošnje goriva i ulja,
- produženje perioda zamene,
- visoka otpornost na oksidaciju,
- dobra biorazgradljivost – tako, sintetička ulja koja sadrže estre su 75% biorazgradiva, dok su mineralna ulja u najboljem slučaju 20% biorazgradiva,
- niska toksičnost i manja količina produkata sagorevanja, tako na pr., navodi se da neka

sintetička ulja daju 10% manje azotovih oksida, 15% manje CO i 10% manje HC.

Tako na primer, sintetičko SAE 0W40 u odnosu na mineralno ulje SAE 15W40, smanjuje emisiju čestica za oko 11% a okside azota oko 5% [1]. Naša ispitivanja [2] pokazuju slične rezultate, s tim što je smanjenje emisije NOx za oko 12%.

Glavni **nedostatak** nekih sintetičkih ulja je njihova **agresivnost** na zaptivke na bazi nitrila i akrila. Drugi nedostatak je još uvek **visoka cena**.

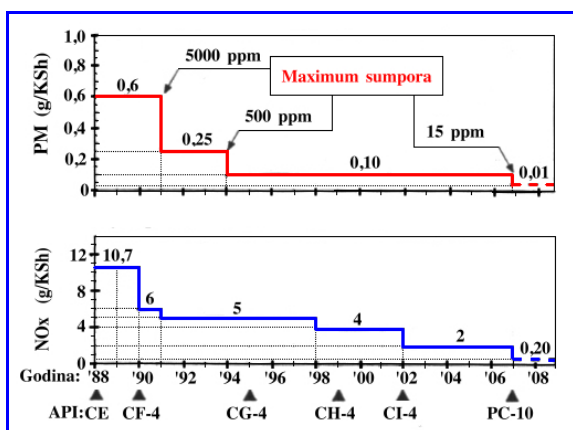
Na osnovu ovog kratkog osvrtu na motorna ulja može se reći da će **glavni trend** u razvoju motornih ulja biti:

- korišćenje nižih viskozitetnih gradacija
- (5W30, 0W30, 0W20) koja smanjuju potrošnju goriva a time i emisije HC, CO, NOx, čestica i CO<sub>2</sub>. Tako na pr., pri korišćenju 5W30 ulja umesto 20W30 može se smanjiti do 3% potrošnja goriva [3]. U **proteklim dekadama trend je bio 20W50 → 15W40 → 10W40**;
- poboljšanje temperaturne (oksidacione) stabilnosti, a to znači smanjenje obrazovanja depozita a time i smanjenje habanja klipnog sklopa i razvodnog mehanizma;
- produženje perioda zamene (50.000 km. za putnička vozila, a >200.000 km. za teške kamione);
- smanjenje isparljivosti, što je veoma bitno zbog smanjenja emisije čestica. Tako na primer, ulje sa isparljivošću 20% ima 60% veću emisiju čestica od ulja čija je isparljivost 10% ;
- visokog indeksa viskoziteta;
- sa niskim sadržajem sumpora (0,2%), sulfatnog pepela (0,5%) i fosfora (0,1%);
- niskih emisija tj. da ne zagađuju zivotnu sredinu i da su bio-razgradiva.

## 2. DOPRINOS MOTORNOG ULJA EMISIJI MOTORA

Sve rigorozniji zakonski propisi o zaštiti životne sredine, a pre svega o smanjenju emisije NOx i čestica dizel motora, fokusirali su pažnju na smanjenje potrošnje ulja, čiji doprinos ukupnoj emisiji čestica nemože se zanemariti, osobito kada se sadržaj sumpora u gorivu drastično smanjuje : od 2000 ppm do 2000 god., na sada važećem limitu od 350 ppm, do 10 ppm u 2008 god (sl. 2.). Dakle, kako se zakonskim propisima sadržaj NOx i čestica smanjuje tako se i kvalitet ulja povećava, što će reći da je ulje postalo važan konstrukcioni parametar. Uticaj ula na emisiju motora zavisi od

fizičko hemiskih karakteristika ulja od kojih su najvažnije sadržaj sumpora, sulfatnog pepela, aromata i isparljivost.



Slika 2. Povećanje kvaliteta ulja sa smanjenjem granica emisije

Jedan od načina smanjenja izduvnih emisija NO<sub>x</sub> HC i čestica dizel motora je ne samo smanjenje potrošnje goriva već i smanjenje potrošnje ulja. Ispitivanja [4-7] pokazuju da je doprinos ulja ukupnoj emisiji čestica dizel motora značajan.

Čestice u izduvnoj emisiji dizel motora nastaju iz dva izvora:

- sagorevanjem i isparavanjem goriva čiji ukupni doprinos je oko 66% i
- sagorevanjem i isparavanjem ulja čiji ukupni doprinos je oko 34%.

Prema rastvorljivosti frakcije čestica se mogu podeliti na:

- ogranški nerastvorljive (INSOLF) koje čine 61% u ukupnoj masi čestica i
- organski rastvorljive (SOF) čiji udeo u ukupnoj masti čestica je oko 39%.

Doprinos ulja organski ne rastvorljivim frakcijama je oko 5% , što orijentaciono odgovara 0,02 gr/KSh. Znatno veći doprinos ulja je u formiranju organski rastvorljivih čestica i on čini oko 29%, dok je za iste te frakcije udeo goriva oko 10%. Ako se posmatraju samo organski rastvorljive frakcije onda je doprinos ulja preko 70%, tj. znatan.

Na nivo emisije čestica dizel motora utiču fizičko-hemijske karakteristike goriva i ulja, konstruktivne karakteristike motora, radni uslovi motora i potrošnja goriva i ulja. Najvažniji izvori čestica od ulja su:

- ulje na zidovima cilindara motora i
- ulje koje propuštaju vodjice ventila.

Pri radu motora dolazi do prodiranja ulja u cilindar. Deo ulja ne sagori i on takodje doprinosi emisiji čestica. Za smanjenje SOF frakcije u česticama veoma je bitno smanjiti potrošnju ulja u motoru, a ona zavisi i od konstrukcije motora i od radnih uslova i od kvalitetnog nivoa ulja. Tako, potrošnja ulja u savremenim kamionskim dizel motorima kreće se od 6gr/h, pri lakim uslovima rada i niskom broju obrtaja, do 230gr/h, pri punom opterećenju i nominalnom broju obrtaja. U odnosu na potrošnju goriva potrošnja ulja se kreće od 0,1 do 0,4%.

### 3. BUDUĆE FORMULACIJE MOTORNH ULJA

Sadašnji zakonski propisi o emisijama lakih i teških vozila sa benzinskim i dizel motorima su umereni u odnosu na buduće –predložene – Euro IV i Euro V. Tako oštri propisi mogu biti dostignuti primenom novih automobilskih tehnologija i primenom kvalitetnijih goriva i ulja.

Kao što je poznato **benzinski motori** su emisiona ograničenja postizali konstrukcionim modifikacijama, kroz sofisticiranu elektronsku kontrolu i korišćenjem katalitičkih konvertora.

Proizvodjači motora i vozila teže da cena proizvoda bude što manja. Sa te tačke gledišta težnja je da se produži vek katalitičkih konvertora. To otvara pitanje uticaja pojedinih komponenata iz motornog ulja kako na doprinos emisijama motora tako i na trajnost katalitičkih konvertora, što je rezultiralo u nacrtu ILSAC GF-4 specifikacije koja ograničava sadržaje fosfora i sumpora u ulju.

Što se tiče **lakih dizel motora** oni su dosadašnja emisiona ograničenja postizali novim tehnološkim modifikacijama uključujući direktno ubrizgavanje, common rail i recirkulaciju izduvnih gasova. Smatra se da buduće propise laki dizel motori neće moći ispuniti bez korišćenja emisionih kontrolnih sistema, uključujući dizel oksidacione katalizatore za NO<sub>x</sub> i filtere za dizel čestice. Ovo znači da su motorna ulja važan konstrukcioni parametar i da buduća ulja moraju imati redukujući uticaj na emisije i emisione kontrolne sistema koji moraju dobro funkcionisati u toku celog veka motora ili u toku predjenih 250.000 – 300.000 km.

Ovi zahtevi će uticati na **formulisanje budućih motornih ulja benzinskih i dizel motora** i ona se odnose pre svega na:

- sadržaj sumpora,
- sadržaj fosfora,
- sadržaj sulfatnog pepela,
- sadržaj aromata,

- isparljivost i
- viskozitet.

U tabeli 2. dat je sadržaj (mas.) sumpora, fosfora, sulfatnog pepela i hlora u nekoliko tipičnih sadašnjih komercijalnih motornih ulja za benzinske i dizel motore putničkih automobila.

**Tabela 2.** Formulacije komercijalno najrasprostranjenijih ulja za benzinske i dizel motore

Tip ulja	S (%)	Sulf. pep. (%)	Cl (ppm)	P (%)
BP Visco 7000	0.33	1.1	199	0.10 limit prema LSAC GF - 2, GF - 3, AP SJ, SL spec.
Castrol SLX	0.32	1.0	<10	
Esso Ultron	0.32	1.4	55	
Mobil 1	0.10	1.1	116	
Shell Helix Ultra	0.26	1.3	11	
Texaco Havoline F3 Energy	0.36	-	-	
Total Quartz 9000	0.54	1.5	260	

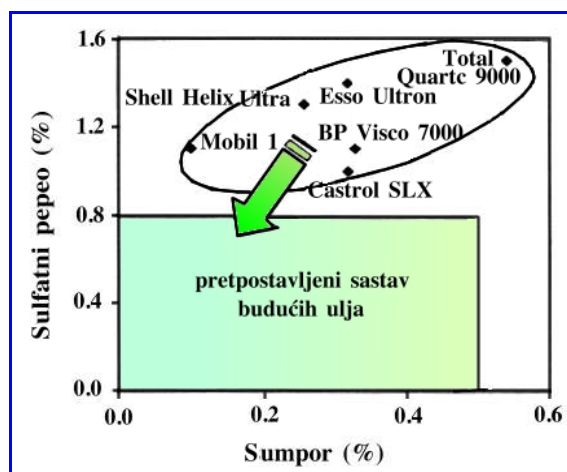
### 3.1 Sumpor u uljima

Poznato je da je sumpor inhibitor performansi katalizatora zbog jače absorpcije, u utakmici sa štetnim gasovima za mesto, na površini katalizatora. Nivo sumpora u gorivu je glavni faktor za buduće formulacije ulja jer kako se nivo sumpora u gorivu smanjuje doprinos sumpora iz ulja postaje uticajniji.

Jasno je da će budući propisi o emisijama motornih vozila imati snažan uticaj na sastav budućih ulja za benzinske i dizel motore putničkih automobila. Slika 3. ilustruje sastav sadašnjih u odnosu na buduća ulja za benzinske i dizel motore putničkih automobila.

Nedavni predlog GF-4 specifikacije predlaže granicu sumpora u ulju od 0,5 %. Međutim ima mišljenja da bi sadržaj sumpora trebalo ograničiti na 0,2 %. Za jedan moderni tipični putnički automobil sa potrošnjom ulja od 40-50 gr /1000 km, koji koristi gorivo sa 30 ppm sumpora, to znači da će učešće sumpora iz ulja biti oko 10% u ukupnom sumporu u izduvnom sistemu. Ulje iz

motora značajno doprinosi izduvnoj emisiji, pre svega, HC, NO<sub>x</sub>, a osobito ukupnoj emisiji čestica.



Slika 3. Sastav sadašnjih tipičnih komercijalnih ulja u odnosu na buduća za benzinske i dizel motore putničkih automobila.

Zbog potencijalno štetnog uticaja čestica na zdravlje ljudi, čestice su u fokusu pažnje stručne javnosti duži niz godina. Što su čestice finije to su po zdravlje štetnije. Osobito su štetne fine (PM<sub>2,5</sub> μm) i ultra fine (PM<sub>0,1</sub> μm) čestice jer prodiru duboko u respiratorni trakt.

Kao što je napred navedeno, doprinos ulja ukupnoj emisiji čestica se kreće oko 34 %. Organski rastvorljiva frakcija čestica uglavnom potiče od motornog ulja i može dostići čak 70 %.

Sumpor u motornim uljima potiče uglavnom iz:

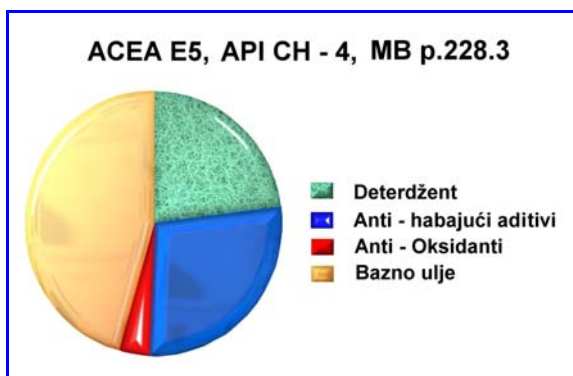
- baznog ulja,
- cinkdialkilditiofosfa (ZnDTP) - anti - habajući aditiv,
- deterdženata na bazi metala,
- neorganskih modifikatora trenja i
- nekih inhibitora.

Slikovit prikaz udela pojedinih izvora sumpora u ulju prikazuje slika 4., a tabela 3. prikazuje procentualni doprinos pojedinih komponenta ulja ukupnom sumporu, u ulju formulacija A i B.

Kao što se vidi iz tabele 2. sadržaj sumpora se u sadašnjim komercijalnim uljima kreće od 0,1 do 0,6 %, dok se iz tabele 3. vidi da su anti-habajući aditivi glavni izvor sumpora.

U tabeli 4. prikazan je sastav jednog budućeg ulja X pri čemu su fiksirani iznos sulfatnog pepela u deterdžentu od 0,73% i fosfora u anti - habajućem aditivu od 0,05%.





Slika 4. Udeo pojedinih izvora sumpora u ulju

**Tabela 3.** Izvori sumpora, sulfatnog pepela i fosfora u motornim uljima

Ulje A : A3 / B3, SJ / CF, 500 / 505, 229.1	S (%)	Sulf. pep. (%)	P (%)
Deterdžent	0,14	0.95	0.0
Anti – habajući aditivi	0.20	0.13	0.10
Bazno ulje	0.41	0.0	0.0
<b>Ukupno</b>	<b>0.75</b>	<b>1.08</b>	<b>0.10</b>
Ulje B: A3 / B3 / B4, SL / CF, 229.3	S (%)	Sulf. pep. (%)	P (%)
Deterdžent	0.14	1.14	0.0
Anti – habajući aditivi	0.19	0.13	0.09
Bazno ulje	0.0	0.0	0.0
<b>Ukupno</b>	<b>0.34</b>	<b>1.27</b>	<b>0.09</b>

**Tabela 4.** Izvori sumpora, sulfatnog pepela i fosfora u budućim motornim uljima

Ulje X	S (%)	Sulf. pep. (%)	P (%)
Deterdžent	0.0 – 0.40	0.73	0.0
Anti – habajući aditivi	0.10	0.07	0.05
Bazno ulje	0.40 – 0.0	0.0	0.0
<b>Ukupno</b>	<b>0.50</b>	<b>0.80</b>	<b>0.05</b>

Dakle, kao što su u proteklim dekadama zakonske regulative o emisijama bile generator novih tehnologija u motornoj industriji i proizvodnji novih kvaliteta goriva i novih kvaliteta motornih ulja tako će i buduće specifikacije motornih ulja biti vodjene budućim emisivnim regulativama.

### 3.2 Sulfatni pepeo u uljima

Kada pepeo koji potiče iz ulja dospe u izduvni sistem on može obrazovati depozite u emisivnim kontrolnim sistemima smanjujući njihovu aktivnost ili čak ih blokirati. Osobito su filteri za dizel čestice osetljivi na sulfatni pepeo.

Kako pokazuje tabela 2. tipične vrednosti sadržaja sulfatnog pepela sadašnjih najpoznatijih komercijalnih evropskih ulja za putničke benzinske i dizel automobile se kreće od 1 do 1,5 %. Tabela 4. prikazuju sadržaj sulfatnog pepela u budućim motornim uljima.

Sulfatni pepeo u uljima (tab. 3.) potiče iz:

- deterdženata na bazi metala,
- anti-habajući aditiva (ZnDTP) i
- drugih aditiva na bazi metala.

Deterdženti na bazi metala imaju višestruku ulogu u ulju. Ne samo da čiste metalne površine, već i da obezbede neutralizaciju kiselina iz goriva i spreče proces degradacije ulja, što je veoma bitno i rastući zahtev sa porastom – produžetkom intervala zamene ulja. Tako npr., za novu Vectru, Opel propisuje zamenu ulja na 30.000 km za benzinske motore, a 50.000 km za dizele ili dve godine, izuzev ako se godišnje prelazi manje od 5.000 km, kada se zamena vrši posle 12 meseci.

Prema tome, smanjenje deterdženata na bazi metala nije trivijalni zadatak, mada ima sugestija da bezpepelni disperzanti mogu preuzeti ulogu deterdženata na bazi metala, ali ostaje problematična njihova kompatibilnost sa fluoro – elastomer zaptivkama.

Peugeot S.A. ugrađuje u svoje putničke dizel automobile filtere za čestice i preporučuje da se čiste svakih 80.000 km. Peugeot preporučuje doziranje bezpepelnih baznih aditiva u gorivo za olakšanje regeneracije filtera za čestice. Bazirano na 25 ppm koncentraciji metala u gorivu korišćenje ulja sa 1,1 % sulfatnog pepela i pri potrošnji ulja od 0,15 kg / 1000 km može se izračunati da za predjenih 80.000 km. akumulira se 230gr pepela u filteru.

Ako se predvidi čišćenje filtera na 160.000 km i dozvoli akumulirani pepeo u filteru od 200gr, onda bi prihvatljiv sadržaj sulfatnog pepela bio 0,8 %. Ipak očekuje se da sledeća generacija ACEA specifikacije sulfatni pepeo ograniči na 0,5%. Pošto smanjenje sadržaja sulfatnog pepela znači produženje veka filtera, onda to znači da treba ograničiti i sadržaj pepela u gorivu. S obzirom da je potrošnja goriva hiljadu do dve hiljade puta veća nego potrošnja ulja, to znači da i iznos sulfatnog pepela u gorivu treba da bude toliko puta manji, a to je oko 2 mgr/kg. Očekuje se predlog od 5

mgr/kg. Sadašnje vrednosti u gorivu su 100 mgr/kg.

### 3.3 Fosfor u uljima

Fosfor je indiciran kao uticajni faktor na benzinske katalitičke konventore zbog formiranja staklastih depozita. Mada je štetan uticaj na dizel oksidacione katalizatore manji, specifikacije ulja u USA obraćaju veliku pažnju na nivo fosfora u uljima. Tako na primer fosfor smanjuje efikasnost katalizatora za 15 % do 30 %.

Tipična vrednost sadržaja fosfora u najrasprostranjenijim evropskim vrstama ulja za benzinske i dizel motore putničkih automobila kreće se 0,10 % ( tab. 2.), kako je to i limitirano specifikacijama ILSAC GF-2, GF-3 i API SJ i SL. Za buduća ulja predviđa se limit fosfora od 0,05% , kao što je to i u nacrtu specifikacije ILSAC GF-4. U motornim uljima fosfor potiče iz anti - habajućih i anti - oksidacionih aditiva a osobito iz ZnDTP, koji je veoma važan sastojak ulja za njegovu efikasnost, te njegova zamena nije uopšte trivijalnog karaktera. Glavni sastojci anti-habajućih aditiva bez fosfora se baziraju na sumporu a njihova cena je viša nego ZnDTP a efikasnost ničeg stepena. Modifikatori trenja omogućavaju da se ovi nedostaci prevazidju.

### 3.4 Hlor u uljima

Hlor u uljima nema funkcionalni značaj . On se uglavnom pojavljuje kao katalizator u izvesnim starijim aditivima u procesu proizvodnje. Novije tehnologije ga ne koriste. Ako je hlor vezan u organskim molekulima može u procesu sagorevanja rezultirati u obrazovanju PCB i dioxina. Neki proizvođači automobila propisuju maksimalni sadržaj hlora u svojim preporučenim uljima. Iz tabele 2. se vidi da neka ulja kao Castrol SLX i Shell Helix Ultra sadrže vrlo male količine hlora dok druga Total, BP Visco sadrže znatno veće količine hlora.

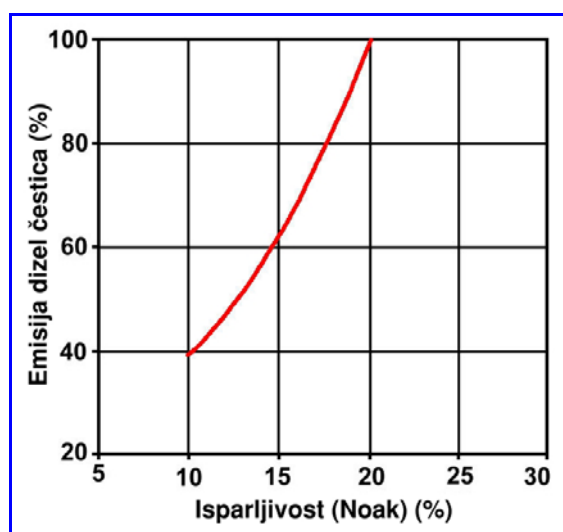
### 3.5 Aromati u uljima

Sa povećanjem sadržaja aromata, osobito policikličnih (PAH), emisije čestica od ulja se povećavaju, jer dolazi do kondenzacije PAH na česticama čadji, a sa starenjem ulja ova pojava se intenzivira. Vrednosti PAH su oko 2 puta veće kod motora sa indirektnim ubrizgavanjem nego kod motora sa direktnim ubrizgavanjem. Dakle, može se reći da aromati u ulju utiču na emisije dizel motora analogno uticaju aromata iz goriva, tj. povećanju emisije NO<sub>x</sub>, HC i čestica.

Aromati su odgovorni za degradaciju ulja usled oksidacije čiji rezultat je pvećanje viskoznosti. Zato poboljšanje oksidacione stabilnosti ulja zahteva smanjenje sadržaja aromata.

### 3.6 Isparljivost ulja

Veoma uticajna karakteristika ulja na emisiju čestica je i isparljivost ulja ili Noack vrednost (sl. 5.). Vidi se, da ulje sa isparljivošću od 15% ima oko 50% veću emisiju čestica nego ulje sa isparljivošću od 5%. Iz tih razloga Porše za svoje automobilske motore propisuje ulja čija isparljivost mora biti ispod 12%.



Slika 5. Uticaj isparljivosti (Noack) ulja na emisiju dizel čestica

## 4. ZAKLJUČCI:

Razvoj motornih ulja kreće se u pravcu korišćenja nisko-emisionih ulja, a to znači ulja nižih viskoznih gradacija sa nižim sadržajem sumpora, fosfora, sulfatnog pepela, i niskom isparljivošću.

Doprinos ulja emisiji motora je značajan zbog toga sve veću primenu nalaze sintetička ulja.

Buduće specifikacije motornih ulja biće uslovljene budućim emisionim propisima.

## LITERATURA:

- [1] Manni, M., i dr. Impact of Fuel and Oil Quality on Deposits, Wear and Emissions from a Light-Duty Diesel engine with EG8, SAE Paper 2000-01- 1913.
- [2] Gligorijević, R., Jevtić, J., The Impact of Lube Oil Characteristics on Emission from Diesel Engine, Nordtrieb 2002, Stockholm 2002.

- [3] Korcek, i dr., Automotive Lubricant for next Millenium, Tribology 2000 plus, Esslingen 2000.
- [4] Luther, R., Cheracteristics of Environmentally Compatible Engine, 13-th Intern. Colloq. Tribology-Lubrication Engineering, Esslingen 2002.
- [5] Hilden, L., Mayer, J.: The Contribution of Engine Oil to Particulate Exhaust Emissions from high Duty Diesel Powered Vehicles, SAE Paper 841395, 1984.,
- [6] Lepperhoff, G., Houben, M., Particulate Emission and Soot Formation Processes by Diesel Engines, IMechE, 10-12, 1990, Chester.
- [7] Cartellieri, W., Herzog, P.: Swirl Supported of Quiescent Combustion for 1990 's Heavy-Duty Diesel Engines – an Analysis.