

Želimir Dobovišek, Niko Samec, Filip Kokalj

ISSN 0350-350X

GOMABN 42, 1, 5 -27

Pregledni rad/Review

UDK 621.434 : 621.436 : 621.43.018.2 : 665.733.5 : 665.753.4.001.6.009

RAZVOJ MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM I KVALITETA GORIVA

Sažetak

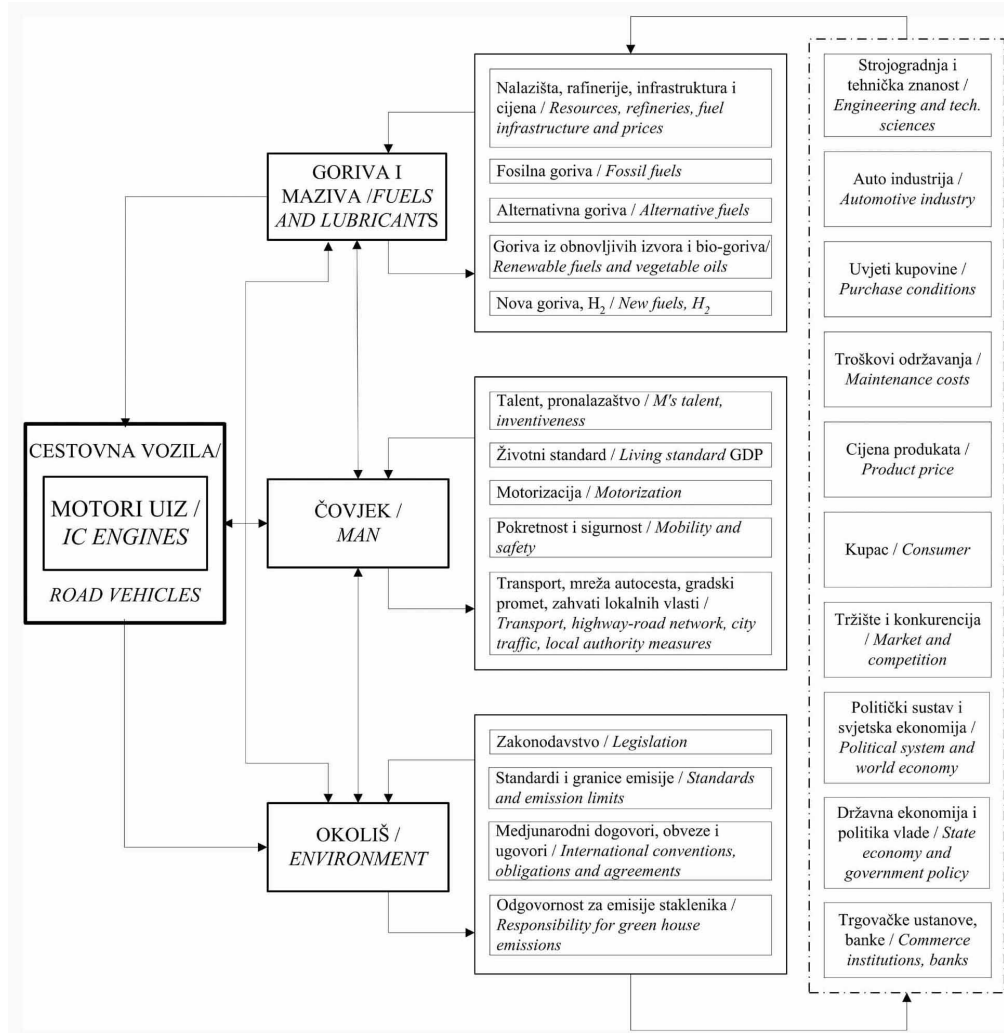
Međusobna ovisnost razvoja motora s unutarnjim izgaranjem i kvalitetom goriva/maziva postojala je sve od rođenja prvog motora. Upravo je prvi motor bio izumljen i konstruiran za korištenje samo određene vrste goriva. To je zahtijevalo neprekidnu i tijesnu suradnju između inženjera, istraživača i drugih eksperata iz obje grane industrije.

U članku je dat prvo kratak pregled razvoja motora s unutarnjim izgaranjem (MUIZ) u toku prošlog stoljeća i navedeni su zahtjevi za performanse motora u bližoj budućnosti. Dalje su analizirana i prodiskutirana neka najvažnija fizička i kemijska svojstva goriva koja određuju kvalitetu goriva za motore: oktanski i cetanski broj, kemijski sastav, prisutnost elementarnog S, N, P i kemijski vezanog N u gorivu, prvenstveno s gledišta njihovog utjecaja na efektivne parametre, radne performanse motora i emisiju polutanata.

1 Uvod

Svojstva goriva i njihova kakvoća imali su dominantnu ulogu u razvoju motora s unutarnjim izgaranjem. U suštini su motori UIZ, s prinudnim paljenjem ili paljenjem sabijanjem smjese gorivo/zrak bili zamišljeni i konstruirani da koriste određenu vrstu goriva, čime je bio definiran termodinamički ciklus pretvorbe energije, efektivni parametri i ostale radne performanse motora/vozila. S druge strane, rafinerije i kompanije za distribuciju i prodaju goriva su našle u sektoru transporta, industriji, kao i u sektoru korištenja motora i vozila za izvancestovne djelatnosti, široko i vrlo isplativo tržište za prodaju svojih produkata (goriva i maziva), što je posljedično zahtijevalo vrlo tijesnu, redovitu i efikasnu suradnju između istraživača, laboratorija, ekonomista i dr. iz obje industrijske grane, motorne i naftne.

Slika 1: Shematski prikaz čimbenika koji su uticali na razvoj motora i transportnih vozila
 Figure 1: A schematic presentation of factors influencing IC engine/transport vehicle development



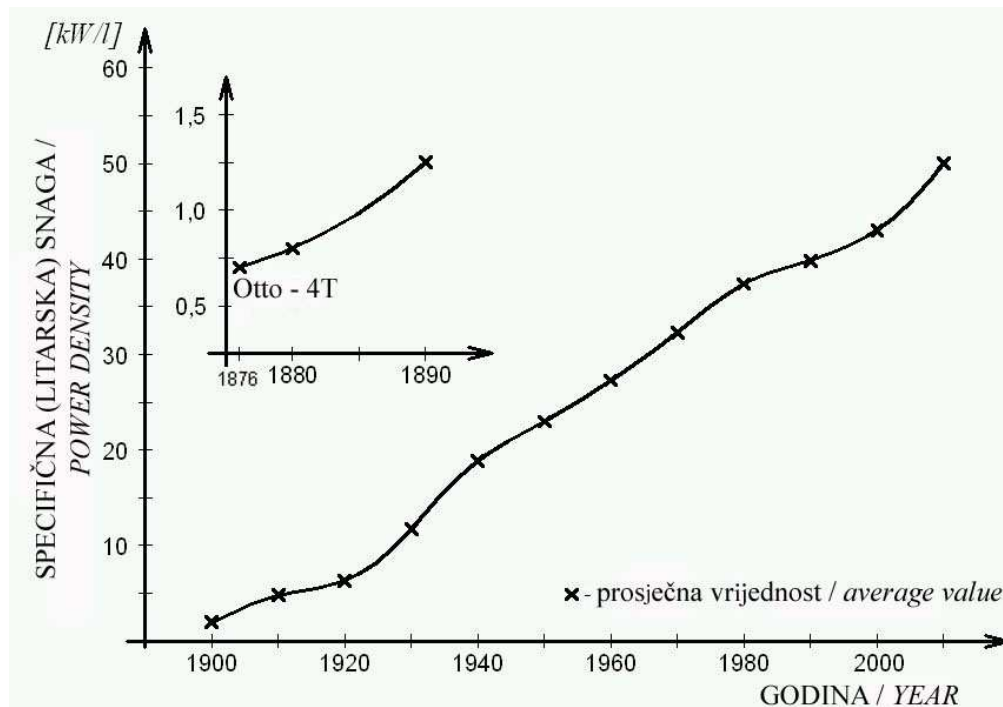
Velik broj vrlo različitih čimbenika utjecao je na tehnički razvoj, proizvodnju, uporabu i primjenu motora s unutrašnjim izgaranjem i transportnih vozila, a time i na kvalitetu motornih goriva. Između njih smo izabrali tri kao najvažnja, što prikazuje slika 1:

- čovjek sa svojim aktivnostima, željama i zahtjevima,
- društvena zajednica i zaštita okoliša s odredbama, standardima i zakonskom regulativom
- goriva s neprekinutim usavršavanjem širokog spektra fizičko-kemijskih svojstava i podizanjem kvalitete prerade, s mogućnošću korištenja velikih količina po pristupačnoj cijeni, pogodnoj za masovno korištenje prijevoza.

Slika 2 pokazuje trend povećanja specifične (odnosno litarske) snage motora od 1876. godine dalje, tj. od pronalaska benzinskog ili Otto – motora.

Slika 2: Trend povećanja gustoće snage benzinskih motora vozila UIZ u toku 1876.-2000. [1]*

Figure 2: Trend of growth of vehicular IC engine power density during 1876-2000 [1]*



* Brojevi u zagradama označuju literaturu na kraju članka / Numbers in parentheses designate references at the end of the paper

Kao što slijedi iz trenda povećanja litarske snage motora za osobne automobile, pratimo u toku 20. stoljeća ogroman porast efektivnog stupnja iskorištenja, smanjenja mase i dr., što potvrđuje uspoređenje prosječnih vrijednosti nekih energetskih parametara motora na početku i kraju 20. stoljeća.

Tablica 1: Uspoređenje nekoliko karakteristika MUIZ (prosječne vrijednosti) za osobna benzinska vozila

Table 1: A comparison of performance data of reference vehicular gasoline engine

Karakteristika / <i>Characteristic</i>	MUIZ na kraju / <i>The reference engine at the end of</i>	
	19. stoljeća / <i>the 19th century</i>	20. stoljeća / <i>the 20th century</i>
specifična snaga / <i>power density</i> [kW/l]	2	47
specifična masa / <i>specific weight</i> [kg/kW]	5	1
stupanj iskorištenja / <i>brake overall efficiency</i> [%]	20	35
brzina vrtnje / <i>RPM</i>	700	5500
broj cilindara / <i>number of cylinders</i>	1 - 3	1 - 8

Sadašnja konvencionalna motorna goriva se pojavljaju u širokom spektru, bilo kao benzini, dizelska goriva ili benzini s oksigenatima kao dodacima, alternativna goriva kao metan (CNG) ili propan (LPG), čisti metanol, etanol, bio goriva. Vodik se isto tako koristi danas, ali još u ograničenim količinama. Međutim, masovno korištenje vozila s gorivnim člancima na vodik kao pogonskim agregatom može se očekivati tek pri kraju drugog desetljeća

Cilj rada je prikazati i raspraviti ovisnost između kakvoće goriva i performanci motora s unutarnjim izgaranjem, uzimajući u obzir zahtjeve za zaštitu okoliša i zahtjeve modernog društva.

2 Opći pregled razvoja motora s unutarnjim izgaranjem

Motora s unutarnjim izgaranjem i motorizirana vozila su najutjecajnije tehnološko otkriće našeg vremena. Oni su doslovno promijenili naš život, način razmišljanja, bavljenja i uživanja. Ta grana industrije je, zajedno sa cestovnim transportom, vrlo brzo postala važan čimbenik u gospodarstvu države, napretku pučanstva, te prema tome bitno utječe na blagostanje nacije.

Da bi pravilno ocijenili i raspravili zahtjeve koji se postavljaju na kvalitetu goriva, koja se koriste u suvremenim motorima vozila, ukazat ćemo ukratko na bitne značajke koje određuju sadašnji i budući razvoj motora:

1. državna regulativa, pogotovo ona koja se odnosi na emisije i ekonomičnost potrošnje goriva;
2. zahtjevi tržišta, pogotovo troškovi proizvodnje i cijena finalnog produkta;
3. povećanje i poboljšanje svih parametara performance motora;
4. emisija CO₂ uključujući razvoj motora s "nultom" emisijom;
5. propisi koji se odnose na isparavanje goriva;
6. emisija buke motora/vozila
7. problemi vezani s recikliranjem vozila/motora, goriva/maziva.

3 Goriva

Teoretsko razmatranje realnog ciklusa motora s ottovim procesom, daje izraz za snagu na jedan litar stapajnog volumena u sljedećem konačnom obliku:

$$P_l = \frac{P_e}{V_h} = p_e \cdot N = \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n-1}}\right) \cdot \eta_g \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \frac{1}{\Phi_a} \cdot N \quad (1)$$

gdje označava:

P_l – litarska snaga (gustina snage), kW/l,

V_h – stapajni volumen, l,

p_e – efektivni tlak, bar,

N – brzina vrtnje,

ϵ – stupanj kompresije,

n – eksponent politrope,

η_g – stupanj savršenosti ciklusa,

η_v – stupanj punjenja,

ρ_k – gustoća svježeg punjenja,

Φ_a – pretičak zraka,

iz kojeg slijedi, da je upravo utjecaj stupnja kompresije (SK) najdominantniji. Porast stupnja kompresije definira iskoristivost goriva i ekonomičnost motora i on se, kako slijedi iz slike 3, sve vrijeme postupno povećavao. Porast je ovisio o konstrukciji motora, kvaliteti materijala, tehnologiji izrade, osobinama goriva i maziva.

3.1 Oktanski broj

Benzin je kompleksna smjesa ugljikovodika, čije se fizičke i kemijske osobine mijenjaju u širokom rasponu. Osobine benzina se normalno uravnotežuju tako, da zadovoljavaju performance motora u širokom području radnih uvjeta, kao što su promjene klime, nadmorske visine, temperature, načina vožnje, promjene sustava za gorivo, temperature motora i tlaka.

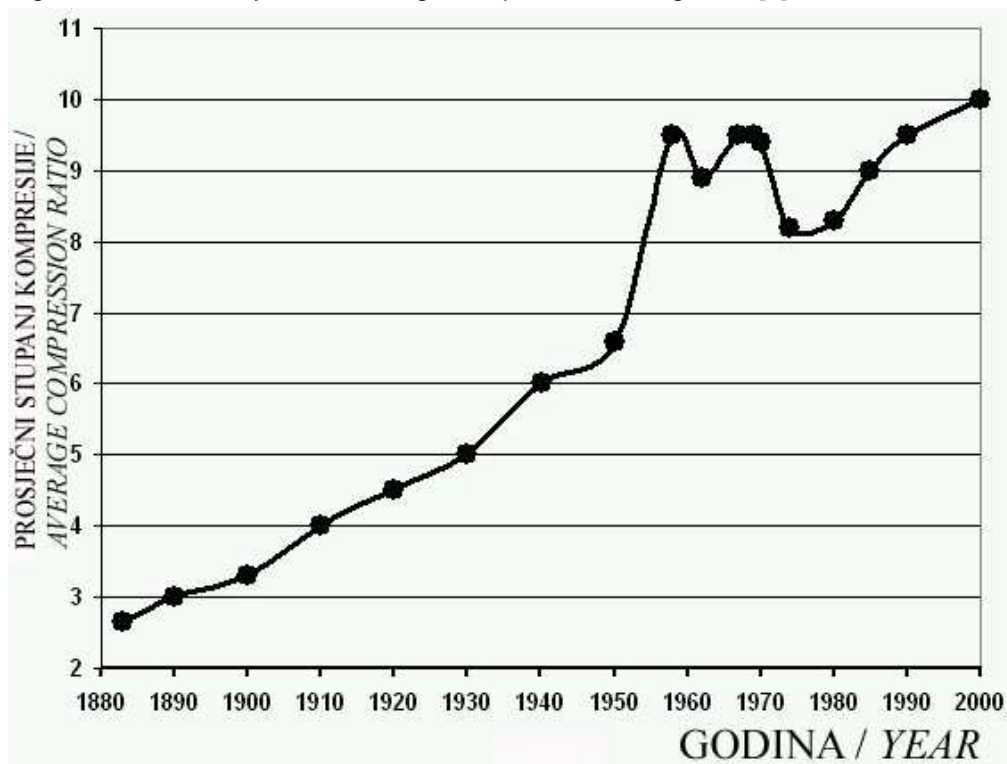
Oktanski broj benzina je jedna od njegovih primarnih osobina i mjera za njegovu sposobnost, da sprječava pojavu lupanja zbog samozapaljenja još neizgorjelog plina

ispred fronta plamena. Primarni čimbenik, koji određuje razinu potrebnog oktanskog broja je konstrukcija motora odnosno stupanj kompresije.

U sredini dvadesetih godina (kad je stupanj kompresije postao veći od četiri) pojava udarnog izgaranja postala je ozbiljan problem. Sveobuhvatna istraživanja su dovela, osim do saznanja o novim idejama u konstrukciji motora, i do zahtjeva za kvalitetom goriva za motore s unutarnjim izgaranjem s paljenjem gorive smjese iskrom. Pronašli su novu skalu, po kojoj su gorivu određivali oktanski broj, kao standardno mjerilo karakteristike benzina.

Slika 3: Prikaz porasta stupnja kompresije [2]

Figure 3: Time history of the average compression ratio growth [2]



Na slici 3 može se uočiti porast stupnja kompresije između 1920. do približno 1963. godine i stagnacija između 1960. do početka 1970. Lagani pad stupnjakompresije primjećuje se nakon 1972. godine, kada počinje napuštanje olovnog tetra etila kao aditiva benzinu, da bi se mogao koristiti u automobilima katalizator za kontrolu emisije.

3.2 Cetanski broj (CB)

Cetanski broj nije temeljna, pa čak ni nezavisna osobina goriva, jer ovisi od nekoliko drugih osobina goriva. Ipak između CB i zakašnjenja paljenja (ZP) postoji međusobna veza, koja bolje odražava fizičko-kemijske osobine goriva. CB je mjerilo za paljivost, kvalitetu goriva za samopaljenje u dizelovim motorima. CB je kompleksna funkcija većeg broja fizičkih i kemijskih osobina goriva. I CB i ZP su bili područje intenzivnih analitičkih i eksperimentalnih istraživanja. Iz pregleda većeg broja literaturnih izvora [7, 8, 9] može se predložiti sljedeća zavisnost CB:

$$CB = F(AP, DIST, DE, VIS, n\text{-par}, ISO\text{-par}, aro, S, \dots) \quad (2)$$

gdje označava:

AP - anilinska točka,
 DIST - temperature destilacije, °C,
 DE - gustoća,
 VIS - viskoznost, mm/s²
 par - parafini (normalni i izo-),
 aro - aromati,
 S - sumpor.

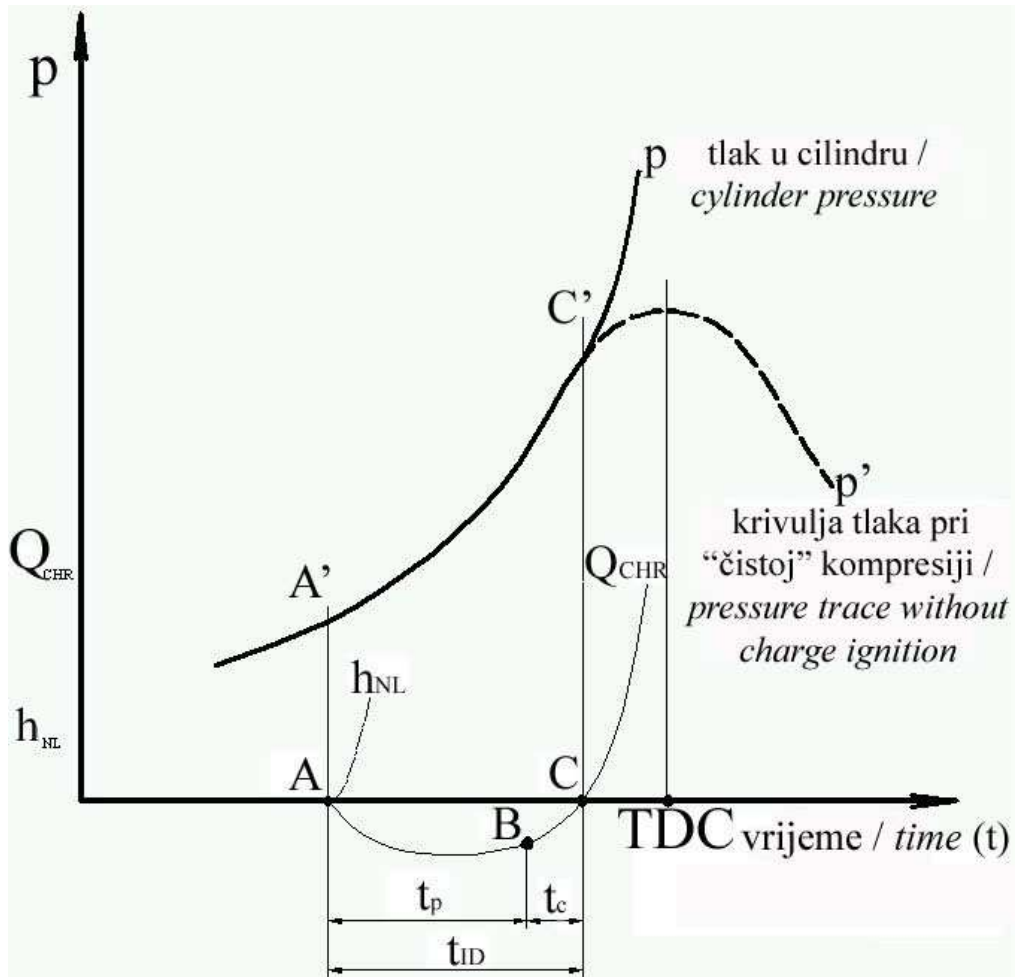
Definicija CB je grafički predstavljena na slici 4.

Gradijent porasta tlaka dp/dt je poznat kao mjera udarnog rada dizelovog motora i primarni izvor buke. Na njega najviše utječe trajanje ZP, vremenski tok ubrizgavanja, način stvaranja smjese, konstrukcija prostora izgaranja. Moguće je zaključiti, da gradijent porasta tlaka definira kvalitetu dizelskog goriva, karakteristiku izgaranja i u značajnoj mjeri stupanj termodinamičkih i emisijskih značajki motora.

Sa stajališta ocjene efektivnosti parametara motora sa samopaljenjem smjese, važnije od CB je vrijeme zakašnjenja paljenja (ZP), prikazano na slici 4, intervalom između točaka AC. To je prema definiciji vremenski interval između trenutaka početka ubrizgavanja goriva (A) i početka efektivnog oslobađanja topline (C), odnosno na liniji tlaka između točaka (A') in (C').

Procesi u toku ZP su teoretski podijeljeni u dvije faze, fizičko ZP (AB slika 4) i kemijsko ZP (BC). Konceptualno fizičko ZP uključuje procese raspršivanja, grijanja, isparavanja ubrizganog goriva i miješanje para goriva sa zrakom i značajno ovisi o fizičkim svojstvima goriva. Kemijsko ZP je temeljno svojstvo goriva, uvjetovano kemijskim sastavom i obuhvaća vrijeme potrebno da se završe reaktivno spore pretplamene kemijske reakcije.[6]

Načelni redosljed utjecaja pojedinačnih ugljikovih komponenti u dizelskom gorivu na ZP (odnosno CB) prikazan je na slici 5.

Slika 4: Prikaz zakašnjenja paljenja (t_{ID})Figure 4: Presentation of ignition delay (t_{ID})

h_{NL} – hod igle brizgaljke / injector needle lift, Q_{CHR} – krivulja kumulativnog oslobađanja topline / cumulative heat release, t_{ID} – ukupno vrijeme ZP / total ID time, t_p – fizičko ZP / physical ID, t_c – kemijsko ZP / chemical ID, GMT / TDC ($t_c/t_p=1/7$ approx.)

Slika 5: Shematski prikaz veličine utjecaja C-H frakcija u dizelskom gorivu na ZP
 Figure 5: Schematic presentation of influence of fuel HC composition on ID duration



Osobine zapaljivosti benzina, alkohola, prirodnog plina upravo su suprotne dizelskom gorivu, tj. visoki OB označava nizak CB i gorivo se neće zapaliti samo tlačenjem te se zato ne može direktno koristiti u dizelovom motoru.

Iz rezultata nedavnih istraživanja kvalitete dizelskog goriva [10] slijedi da je utvrđena značajna razlika između cetanskog broja i cetanskog indeksa u državama gdje se dizelsko gorivo proizvodi po specifikaciji EN 590, slika 6. Trend krivulje CB za 1998. i 2000. godinu ukazuje na efikasno i brzo prilagođavanje rafinerija zahtjevima modernih dizelovih motora i vladinim propisima.

3.3 Utjecaj sastava (strukture) goriva

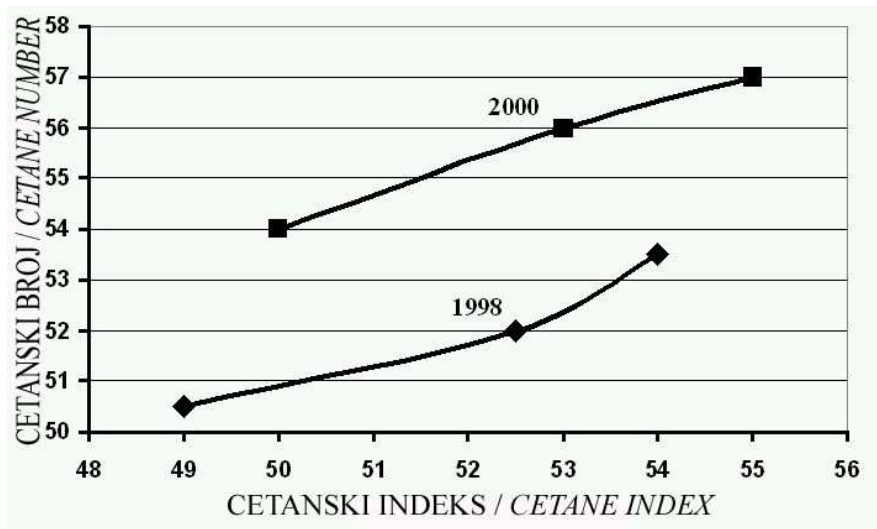
Tijekom posljednjih trideset godina prošlog stoljeća sastav goriva je postao izrazito važan parametar kvalitete goriva zbog utjecaja:

- na kemijski mehanizam i kinetiku procesa paljenja,
- na aktivacijsku energiju goriva u početnim fazama izgaranja,
- na razinu koncentracija i sastav polutanata u produktima izgaranja,

- na puteve i iskoristivost procesa naknadne obrade produkata izgaranja,
- na postojanost uređaja (opreme) za naknadnu obradu ispušnih plinova,
- na stvaranje naslaga na otvorima brizgaljki za ubrizgavanje goriva, na zidovima komore u cilindru motora i paljenjem iskrom,
- na isparivost goriva i emisiju para ugljikovodika.

Slika 6: Usporedba općih trendova CB – CI (cetanski indeks) za europske države koje proizvode dizelsko gorivo po specifikaciji EN 590: 2000

Figure 6: Comparison of average trends of cetane index versus cetane number for European countries producing diesel fuel to EN 590:2000 specification



Ukratko ćemo se osvrnuti na neke utjecaje pojedinačnih komponenti na kvalitetu motornih goriva.

Povećavanjem sadržaja aromata smanjuje se CB, ZP se produžuje, a gustoća, viskoznost, temperatura destilacije T50 i konačna temperatura isparavanja su u porastu.

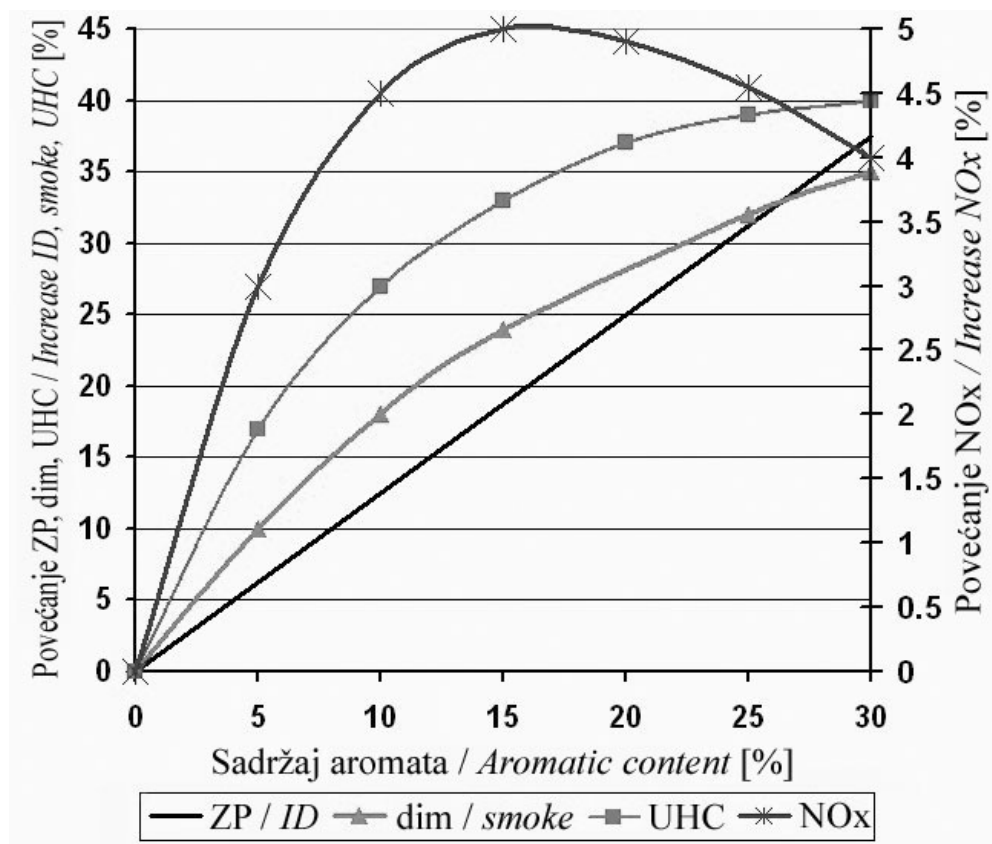
Statistička analiza emisija ispuha ukazuje da najjači utjecaj na emisiju čestica ima gustoća goriva, a zatim slijede maseni omjer C/H, temperatura T50 i viskoznost.

Sadržaj aromata, elementarnog sumpora i dušika u motornom benzinu povećavaju područje frakcijske destilacije i njezin završni dio, odnosno povećava se sadržaj teških oksidiranih lančastih spojeva ugljikovodika, koji su potencijalni prethodnici stvaranja naslaga.

Rezultati nedavnih istraživanja [11] potvrđuju da učinak aromata u gorivu na emisiju ispuha motora nije jednoznačan. Monoaromati (sadržaj između 0 i 27 postotka) korelira dobro s emisijom dima i NO_x u ispuhu. Diaromati u gorivu pomalo povećavaju emisiju ispuha u usporedbi s monoaromatima kod istog sadržaja u gorivu. Kao primjer je na slici 7 prikazan utjecaj aromata u gorivu na emisije ispuha. Očigledno je da je utjecaj aromata na emisiju dima vrlo jak, jer do njega dolazi usprkos povećanju zakašnjenja zapaljenja, što dovodi do toga da se povećava onaj dio količine ubrizganog goriva, koje izgara prethodno već izmiješano sa zrakom.

Slika 7: Utjecaj aromata u gorivu na emisije ispuha i zakašnjenje paljenja CFR motora [11]

Figure 7: Influence of fuel aromatics on CFR engine exhaust emissions and ignition delay [11]

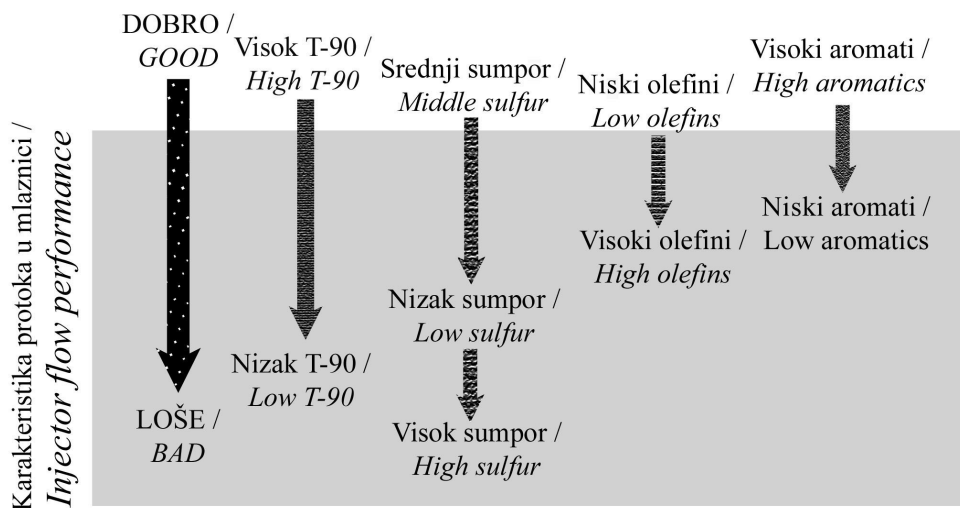


Doprinos aromata emisiji aldehida (formaldehida, acetaldehida, akroleina) analiziran je npr. u literaturi [12]. Na osnovi eksperimentalnih rezultata zaključuje se da je ovisnost između sadržaja aromata u motornom benzinu i emisija aldehida jednoznačna, što nije slučaj kod dizelskog goriva. Izgleda da aromatska struktura (poliaromati) ima vrlo važan utjecaj. Aldehidi u ispuhu se obično primjećuju kada teška dizelska goriva izgaraju pri niskim brzinama vrtnje rada u motorima visokih snaga. Osim sadržaja aromata u gorivu, temperature kemijskih reakcija u toku procesa izgaranja imaju značajan utjecaj. Tvorba aldehida se pojačava pri niskotemperaturnom izgaranju, kada motor radi neopterećen. Konačno, kao primjer je prikazan integralni utjecaj osobina goriva na tvorbu naslaga na vrhu brizgaljke modernog benzinskog motora sa sustavom za direktno ubrizgavanje goriva pod visokim tlakom. Izvršena su bila opsežna istraživanja [13]. Rezultati su sumirani na slici 8 i prikazuju kvalitativni utjecaj osobine goriva na tvorbu naslage.

Slična pojava je primijećena pri izučavanju tvorbe naslage na zidu prostora za izgaranje na motorima s ubrizgavanjem goriva kroz usisne kanale.

Slika 8: Utjecaj sastava goriva na začepljenje brizgaljke za direktno ubrizgavanje benzina pod visokim tlakom [13]

Figure 8: Effect of fuel composition on high pressure gasoline direct injection injector plugging (European 2000 fuel specification) [13]



Dodavanje oksigenata (metanol, etanol, heptanol) benzinu se pokazalo kao vrlo efikasan način za povećavanje oktanskog broja goriva i smanjenje emisija CO i HC. Određeni udio oksigenata u motornom benzinu poboljšava isparivost, ubrzava izgaranje i umanjuje emisiju CO zbog prisutnog kisika i HC u ispuhu motora s

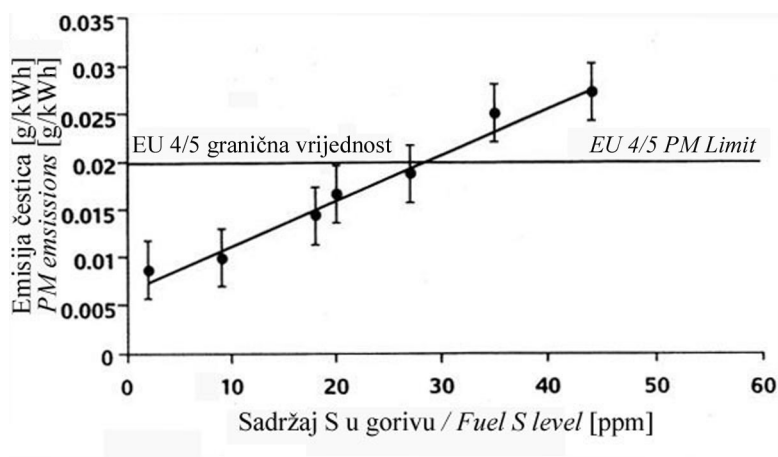
paljenjem iskrom. Dodaci oksigenata dizelskom gorivu uzrokuju smanjenje emisije NO_x i dima (tvrdih čestica), što se djelomično može pojasniti produženjem zakašnjenja paljenja.

3.4 Elementarni S, N i P u gorivu

Sumpor u gorivu ima vrlo jak utjecaj na emisiju čestica i produženje intervala trajnosti uređaja za kontrolu emisije. Štoviše, umanjene emisije sulfata i sumpornih oksida, snižava trošenje i produžava interval zamjene ulja. Sumpor u gorivu nema direktan utjecaj na tvorbu čestica, ipak oksidi sumpora i talog sulfata na česticama povećavaju njihovu emisiju u ispuhu motora.

Slika 9: Prilog sumpora u gorivu emisiji čestica [14]

Figure 9: Contribution of fuel S to PM emission [14]



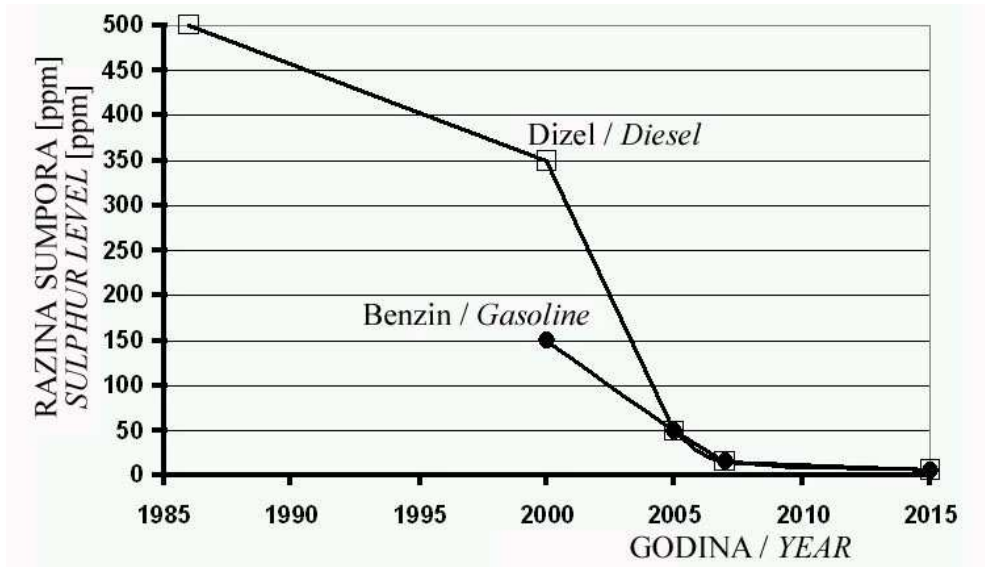
Utjecaj sumpora u gorivu prikazuje slika 9 [14], u kojoj je ucrtana granična vrijednost sadržaja S (30 ppm) koja još omogućuje, da dizelov motor udovolji EU emisijske standarde.

Strogi europski i američki emisijski standardi su tražili stalno, postupno i brzo smanjivanje sadržaja sumpora u gorivima za motore vozila. Štoviše, ovi zahtjevi će postati ubuduće još stroži, što prikazuje slika 10.

Tragovi olova, fosfora, sumpora i drugih otrovnih supstancija u gorivu imaju značajan utjecaj na oštećenje katalizatora i kilometarsku postojanost katalizatora, s obzirom na zahtjev da bi se očuvala njegova funkcionalnost tijekom normalnog korištenja vozila u trajanju do 5 godina ili 80.000 km.

Slika 10: Zahtjevani i preporučeni sadržaj sumpora u dizelskom gorivu i motornom benzinu

Figure 10: Time history of required sulphur levels in diesel and gasoline fuels



3.5 Dušik u gorivu

Kemijski vezan dušik u gorivu tijekom izgaranja konvertira u $\text{NO}_{x,\text{conv}}$ te je pored termalnog NO_x prisutan u ispuhu i tako uvećava emisiju NO_x . Pored udjela dušika u gorivu, na njegovu konverziju utječu uvjeti izgaranja, lokalni omjer zrak/gorivo, intenzitet miješanja reaktanata, temperatura i prisutnost dima (čade) u zoni izgaranja. [15]

4 Zaključci

1. Razvoj motora s unutarnjim izgaranjem za vozila i motora za izvancestovnu uporabu znakovito ovisi o utjecaju:
 - čovjeka i njegovih aktivnosti kao pronalazača, istraživača, inženjera, kupca ili prodavača, vozača i državljanina,
 - okoliša sa zahtjevima za zaštitu prirode, prihvaćanjem zakona, standarda, potrebama prijevoza, gospodarstva, tržišta, ...,

- goriva njihovom kvalitetom, proizvodnjom, infrastrukturom, mogućnošću raspolaganja u velikim količinama i cijenom.
2. Brzi razvoj i masovna proizvodnja motora s unutarnjim izgaranjem i transportnih vozila u proteklom stoljeću je bila značajno ovisna o raspolaganju kvalitetnim gorivima na tržištu, što je za uzvrat zahtijevalo trajnu i vrlo efikasnu suradnju istraživačkih institucija, inženjera svih profila i ostalih visokostručnih kadrova naftne industrije i proizvođača motora i transportnih vozila.
 3. U 21. stoljeće stupamo sa zahtjevima za:
 - nultom emisijom polutanata i raspolaganje čistim gorivima,
 - smanjenom, odnosno vrlo niskom emisijom plinova staklenika, posebno CO₂,
 - niskom potrošnjom goriva,
 - dugotrajnom kilometarskom postojanošću opreme za obradu ispušnih plinova.Svi ti zahtjevi su kritično ugroženi razinom u gorivu prisutnog elementarnog sumpora, fosfora, kemijski vezanog dušika, sadržaja benzena, aromata, aldehida aromatskih kancerogenih spojeva, oksigenata i drugih otrovnih frakcija. Nastojanja da se smanje ti sastojci u gorivu u stalnom su porastu.
 4. Raspolaganje gorivima vrlo visoke kvalitete omogućuje uvođenje novih tehnologija, čime postaje moguće da se "čisti" benzinski i dizelovi motori ugrađuju u transportna vozila, gradske autobuse, lagana dostavna vozila i motore za izvancestovnu uporabu.
 5. Moguće je pretpostaviti da će se čisti vodik koristiti u motornim vozilima 21. stoljeća. Međutim, masovno korištenje vozila s gorivnim člancima kao pogonskim agregatom može se očekivati tek pri kraju drugog desetljeća.

Zahvala:

Autori se zahvaljuju gospodinu Primožu Pogorevcu, dipl.ing. i gospodinu mr.sc. Martinu Volmajeru za pomoć kod pripreme dijagrama.

PROGRESS IN VEHICULAR IC ENGINES AND FUELS QUALITY

Abstract

The interdependence between IC engine development and fuel/lubricant quality has existed, ever since the first engine was born. In fact the first engine was invented and designed for using explicitly only a definite type of fuel. This has required a continuous and strong cooperation between engineers, researchers and other experts of both branches of industries.

In this paper a short review of IC engine development during the last century is presented first, and the requirements on IC engine performance in the near future are listed. In continuation only a few of most important physical and chemical properties determining the quality of vehicular engine fuels have been analyzed and discussed: octane and cetane number, fuel chemical composition, fuel S, N, P and N, mainly from the stand point of their influence on IC engine effective parameters, operating engine performance and pollutant emissions.

1 Introduction

Fuel properties and their quality have played a dominant role in Internal combustion (IC) engines development. In fact IC engine, either with forced/spark ignition (SI engine) or compression ignition (CI engine) of fuel/air mixture, were invented and designed for the use of a definite kind of fuel, which was defining its thermodynamic energy conversion cycle, effective output parameters and other engine/vehicle operating performances. From the other side refineries and oil-companies have found in road transport sector, industry, and in their off -road engine application sectors, a large and most profitable market to sell their products (fuels and lubricants), what in turn have required a close, permanent and successful cooperation between researchers, laboratories, economists and others of fuel and automobile industries.

A great number of factors have influenced over the years IC engine and transport vehicle development, production, usage and application as shown in Figure 1. Three of them are most important:

- the man with his activity, goals and demands,
- the society and environment with requirements, standards and legislation and
- fuels with their properties, recourses, availability in great quantities and price.

Today's conventional automotive fuels can be broadly categorized as consisting of either gasoline, diesel fuel or gasoline oxygenate blends. Alternative fuels such as methane (CNG) propane (LPG) and neat methanol, ethanol, vegetable oils, H₂ are also used today, but still in a limited extent the large scale use of vehicles with fuel cell power train will probably not happen earlier, than at the end of the second decade. The goal of this paper is to present and discuss the relationship between fuel quality and IC engine performances respecting environmental protection requirements and modern society demands.

2 A general view on IC engine development

Internal combustion (IC) engines and motorised vehicles are the most influential technological inventions of our time. They literally changed our lives, the way of thinking, working and enjoying. This branch of industry together with road transport have become very soon important factors of state economy, people's prosperity and consequently influencing wealth of nation.

A trend of growth of "engine performance quality" expressed here with engine power density (P_e/V_h [kW/l], rated engine power per one litre of displacement volume) and representing engine development during the last century, is shown in Figure 2. Additionally a comparison of selected data of a reference vehicular Otto engine at the threshold of the 20th and the 21st century are shown in Table 1, proving a tremendous progress achieved during the 20th century.

In order to evaluate and discuss properly the requirements imposed on the quality of fuels used in up - to - date vehicular IC engines, essential features governing present and future engine development will be shortly pointed out:

1. government regulation, particularly those regarding emissions and fuel economy,
2. market requirement, concerning manufacturing cost and final product price,
3. demands to increase and improve engine performance parameters,
4. emission of CO₂ connected with development of engines with "zero emission",
5. government directive concerning evaporation losses,
6. vehicle / power train noise emission and
7. problems concerning vehicle / engine fuel/lubricant re-cyclability.

3 Fuels

From the thermodynamic theory of Otto IC engine cycle follows a strong dependence of power density and overall cycle efficiency on engine compression ratio, given in final form:

$$P_l = \frac{P_e}{V_h} = p_e \cdot N = \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n-1}}\right) \cdot \eta_g \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \frac{1}{\Phi_a} \cdot N \quad (1)$$

where designates:

P_l – power density,

V_h – cylinder displacement volume,

P_e – effective (break) engine power,

p_e – break mean effective pressure,

N – RPM,

ε – compression ratio,

n – polytropic exponent,

η_g – degree of engine cycle perfection,

η_v – charging efficiency (volumetric),

ρ_k – fresh charge density,

Φ_a – equivalence air/fuel ratio,

which shows that the compression ratio has predominant effect on P_l . Compression ratio directly influences fuel efficiency and engine economy as well.

3.1 Octane number

Gasoline is a complex mixture of hydrocarbons which vary widely in their physical and chemical properties. The properties of gasoline are normally balanced to give satisfactory engine performance over a wide range of operating conditions, such as variation in climate, altitude, temperature and driving pattern, as well as variation in the fuel system, engine temperature and pressure.

Octane level of gasoline is one of its primary quality and it is a measure of gasoline ability to resist knock (the autoignition of the unburned gas ahead of the flame). The primary factor in determining octane need has been engine design.

Figure 3 shows a steady trend of increase of compression ratio (which is in turn an important factor of engine design). In the mid twenties (when the compression ratio become greater than four) appearance of knock was a serious problem. The extensive investigations have provided besides several new ideas on engine design, also requirements for SI fuel quality, and a scale has been devised in which fuels are assigned an octane number, as a standard measure of a fuel characteristic.

On the figure 3 the compression number history shows an increase from 1920 to about 1963 and stagnation throughout the 1960s and into the early 1970s. A slight drop of compression ratio can be observed after 1972, as the additive tetraethyl lead began to be phased out so that catalytic reactors could be used on automobiles for emission control.

3.2 Cetane number (CN)

Cetane number is not a fundamental property of fuel. It is not even an independent property, since it depends on other properties of fuel. However there exists a relationship between CN and ignition delay (ID), which reflects better physical and chemical properties of fuels. CN is a measure of fuel ability and quality for

spontaneous ignition in compression ignition (CI, diesel) engines. CN is a complex function of several physical and chemical properties of fuel. Both CN and ID have historically been an area of intensive analytical and experimental investigation. From a broad survey of the literature [7,8,9] the following dependence of CN may be suggested:

$$CN = F (AP, DIST, DE, VIS, n\text{-par}, ISO\text{-par}, aro, S) \quad (2)$$

where designates:

AP - aniline point

DIST - distillation temperature

DE - density,

VIS - viscosity,

n-par, iso-par - where par designates paraffins,

aro - aromatics,

S – sulphur.

ID in diesel engine is by definition the time period from the start of fuel injection (point A) to the onset of combustion (point C) resulting in a steep increase of cylinder pressure, point C' in Figure 4. The rate of cylinder pressure increase dp/dt is known as diesel knock and it is a primary source of diesel engine noise and it is mostly influenced by engine combustion chamber design, fuel injection time - history, mixture formation. It may be pointed out that ID characterises diesel fuel quality, combustion characteristics and, to a considerable degree the thermodynamic and emission performance of the engine.

Ignition processes are theoretically divided in physical and chemical delay. Conceptually the physical delay (AB) includes processes as spray atomisation (drop diameter, penetration length) heating and boiling of injected fuel, mixing of fuel vapours with air, and strongly depends on fuel physical properties. The chemical delay (BC) is a fuel fundamental property, influenced by fuel chemical composition and consists of the time required for completion of relatively slow preflame reactions.[6]

The magnitude of effect of several HC – fractions in fuel on ID duration is qualitatively presented in Figure 5.

The ignition properties of gasoline, alcohol, natural gas are virtually the opposite of diesel fuel, i.e.; higher octane fuel exhibits lower cetane number, and can not be ignited by pure compression and used directly in diesel engines.

According to a world-wide fuel quality survey [10], a substantial difference was found between cetane number and cetane index in the countries where diesel fuel is produced to meet EN 590 specification, Figure 6. Trends of CB curves for the years

1998 and 2000 demonstrate an efficient and rapid reaction of refineries to satisfy demands of up-to-date diesel engines government regulations.

3.3 Fuel composition

During the last three decades of the past century, the composition of vehicular fuel has become very important, due to its direct effect:

- on chemical mechanism and kinetics of ignition processes,
- on activation energy in early stages of combustion,
- on concentration levels and composition of pollutants in combustion products,
- on exhaust gas aftertreatment routes and their conversion efficiency,
- on durability of aftertreatment devices,
- on the deposit formation on injector tip and combustion chamber wall in air - assist direct injection spark ignition (DISI) engines.

Increasing the content of aromatics in diesel fuel the cetane number tends to decrease and ID to increase, density, viscosity and final boiling point all tend to increase.

A statistical analysis of exhaust emissions suggested that the greatest influence on smoke (PM) emissions has the fuel density followed by carbon/hydrogen mass ratio, 50 percent distillation temperature (T50) and viscosity.

The content of aromatics, sulphur and nitrogen in automotive gasoline increase the fraction distillation range and gasoline tail/or oxygen bearing long - chain heavy hydrocarbons which are also potential deposit precursors. The results of recent investigations [11] confirm that the effect of aromatics in fuel on engine exhaust emission is not unique. The monoaromatics (the content changes between 0 and 27 per cent) correlated highly with exhaust smoke and NO_x emission. Diaromatics in fuel increase slightly exhaust emissions in comparison to monoaromatics of the same content in the fuel. As an example, the effect of aromatic content in the fuel on exhaust emissions is shown in Figure 7. It is evident, that the effect of aromatics on smoke emission increase is very strong, because it occurs despite the increase in ignition delay and, thereby the increased amount of premixed fuel burned.

The contribution of aromatics to aldehyde (Formaldehyd, Acetaldehyd, Acrolein) emission is reported in Reference [12]. It is concluded, based on experimental results, that the relationship between aromatic content in SI fuels and aldehyd emission shows a unique characteristic, what is not the case with CI fuels. It seems that the aromatic structure (polyaromatics) has an important influence. Aldehydes in engine exhaust are usually monitored, when heavy diesel fuels are burned at medium and low RPM in heavy duty CI engines. Besides aromatic content in the fuel, reaction temperatures during combustion process have significant effect. The aldehyde formation is intensified by the low combustion temperatures when engine is operated at idle regimes.

Finally the integrated influence of fuel properties on injector tip deposit formation in a modern SI engine with a high pressure direct injection system is demonstrated as an example. Comprehensive research of this phenomenon has been carried out [13]. The results are summarised in Figure 8, showing qualitatively the effect of each fuel property on deposit formation. A similar phenomenon has been observed in combustion chamber deposit studies of conventional port injection engines.

The addition of oxygenates (methanol, ethanol, heptanol,...) to gasoline has proved to be an effective method in fuel octane enhancement and reduction of engine CO and HC emissions. A certain part of oxygenates in gasoline will improve fuel volatility, enhance combustion and decrease exhaust CO owing to the oxygen available and minimise exhaust HC in SI engine [11]. Oxygenated blends in diesel fuel cause reduction in NO_x and smoke (PM) emissions, which can only partially be explained by increase in ignition delay.

3.4 Fuel S, N and P

Fuel S has a strong influence on particulates (PM) emission and mileage durability performance of exhaust emission control devices. Furthermore, reduced sulphate and sulphur oxides emissions reduce engine wear and less frequent oil changes. Fuel S does not imply a direct effect on PM formation, however S oxides and sulphates sediment on particulates and increase PM emission [14].

The effect of fuel S on PM emission is shown in Figure 9 [14] and the limit of S level (30 ppm) is indicated, required for the diesel engine to satisfy EU emission standards.

Severe (EU, US) emission standards have required a steady, gradual drop of fuel – S level in fuels for vehicular engines. However, these requirements become even more severe for the future, as demonstrated in Figure 10.

Trace of lead, phosphorous, sulphur and other poisoning elements in fuels have a significant impact on the catalyst deterioration and mileage durability i.e. preserving catalyst performance up to 5 years or 80.000 km (both are a matter of farther requirements).

3.5 Chemically bound N

During combustion, chemically bound nitrogen in the fuel is converted into NO_x, and it is present in the engine exhaust besides thermal NO_x (the conversion NO_x, NO_{x,conv}). The concentration of NO_{x,conv} in combustion products depends on fuel - N content, burning conditions, local air/fuel ratio, mixing intensity of reactants, temperature and soot present in the combustion zone. [15]

4. Conclusions

1. Development of Internal combustion engines and transport vehicles and engines for non - road application have been strongly influenced by:
 - man in his activities as inventor, researcher, engineer, purchaser and seller, driver and citizen,
 - environment with nature and human life protection, legislation and standards, transport needs, with world economy and market, country political system and government policy, and
 - fuels by their availability, quality, production, infrastructure.
2. Rapid development and mass production of IC engines and transport vehicles during the past century was highly dependent on the availability of high quality fuels, what in turn required a permanent and close collaboration of refineries and oil companies and their research laboratories with engine/vehicle manufactures and their research institutions.
3. First decade 21st century IC engines and motorised transport vehicles are required to satisfy:
 - "zero" pollutant emission,
 - reduced or very low emissions of green - house gases, specifically CO₂ emission,
 - low specific fuel consumption,
 - high mileage durability performance of exhaust treatment devices.All of these demands are critically affected by trace levels of sulphur, phosphorus, chemically bound nitrogen, levels of benzene, aromatics, aldehydes, aromatic carcinogen compounds, oxygenates and other poisoning fractions. Trends to reduce all these fuel blends are continuously increasing.
4. The availability of extremely high quality fuels means promising, new advanced technologies for clean SI and CI engines become available for all sizes of highway transport vehicles, city buses, cleaner diesel and gasoline passenger cars, light - duty trucks and engines in non - road application.
5. One may suppose that pure H₂ will also be used as fuel in motorised vehicles of the 21st century. However, the large scale use of vehicles with fuel cell power train will probably not happen earlier, than at the end of the second decade.

Acknowledgement

The authors wish to thank Mr. Primož Pogorevc, uni.dipl.ing. and Mr. Martin Volmajer, M. Sc. for their assistance in preparing the diagrams.

Literatura / References:

- [1] Retracing the Puch Track, International Symposium, Proceedings, str. 16 - 23, University of Maribor, 2001;
- [2] International Journal of Vehicle Design, Vol. 2, No 1/2, UK 1986;
- [3] Autotechnology, Volume 1, February 2001, str. 74 - 77, 82;
- [4] Automotive Engineer (UK), February 2002, str. 78 - 80, 82, 83;
- [5] 11th International Symposium Transport and Air Pollution, Proceedings, Graz, June 2002;
- [6] Colin R. Ferguson, Internal Combustion Engines, John Wiley & Sons, 1986, str. 441;
- [7] Y. Q. Xia, R. C. Flanagan, SAE Paper 870591;
- [8] J. R. Needham, D. M. Doyle, SAE Paper 852101;
- [9] Goriva i maziva 25(1986)3, str. 119 - 123;
- [10] Global, Issue 12, April 2001, str. 28 - 33;
- [11] Automotive Engineering, Vol. 214, Part D, str. 779 - 794, 341 - 346;
- [12] MTZ 58(1997)6, str. 318 - 325;
- [13] Autotechnology 5 (October) 2001, str. 62 - 64;
- [14] Goriva i maziva 17(1978)1, str. 3 - 11,
- [15] Goriva i maziva 39(2000)6, str. 357 - 367

Ključne riječi / Key words:

621.434 benzinski motor	gasoline engines
621.436 dizelski motor	diesel engine
621.43.018.2 učinak i radna obilježja motora	engine efficiency and performance
665.733.5 motorni benzin	motor gasoline
665.753.4 dizelsko gorivo	diesel fuel
.001.6 gledište razvoja	development viewpoint
.009 gledište međusobnih odnosa	relations viewpoint

Autori / Authors:

prof. dr. Želimir Dobovišek, dipl. ing., e-mail: zelimir.dobovisek@uni-mb.si

doc. dr. Niko Samec, dipl. ing., e-mail: niko.samec@uni-mb.si

mr.sc. Filip Kokalj, dipl. ing., e-mail: filip.kokalj@uni-mb.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, SI-2000 Maribor, Smetanova 17, Slovenija

Primljeno / Recieved:

06.3.2003.