

Želimir Dobovišek, Blaž Vajda, Stanislav Pehan, Breda Keglj

ISSN 0350-350X

GOMABN 48, 2, 131-158

Izvorni znanstveni rad/Original scientific paper

UDK. 621.436-634.5 : 544.16 : 621.891 : 539.375.6

UTJECAJ SVOJSTAVA GORIVA NA ZNAČAJKE MOTORA I TRIBOLOŠKI PARAMETRI

Sažetak

U radu se razmatra korištenje mineralnog dizelskog goriva, čistog biodizelskog goriva, te njegovih mješavina i utjecaj svojstava goriva na značajke motora s ciljem smanjenja štetnih emisija. Za eksperimente je korišten autobusni dizelov motor, te čisto biodizelsko gorivo proizvedeno iz repičina ulja i nekoliko njegovih mješavina s mineralnim dizelskim gorivom. Gustoća, viskoznost, površinska napetost i brzina zvuka ispitivanih goriva određivane su eksperimentalno i vrijednosti su uspoređivane s istima od mineralnog dizelskog goriva. Dobivene rezultate smo upotrijebili za analizu najvažnijih značajki motora i triboloških parametara.

Uvod

Ključni čimbenici razvoja dizelovog motora su uvjetovani njegovim radnim osobinama, ekonomičnošću i ekologijom. U posljednim su godinama mnoga istraživanja provedena s ciljem da se smanje štetne emisije dizelovih motora. Precizno vođenje ubrizgavanja i procesa izgaranja, te naknadna obrada ispušnih plinova su neki od obećavajućih pristupa. Unatoč značajnim dostignućima, emisije motora će se morati smanjivati i ubuduće, jer pravilnici koji ograničavaju emisiju štetnih tvari postaju sve stroži. Štoviše, neovisnost o uvoznoj nafti postaje sve važnija. Zbog tog razloga, tijekom posljednjih nekoliko godina istraživanja na području dizelovih motora su proširena u sferu alternativnih goriva, koja su obnovljiva, lokalno su na raspolaganju, ekološki su čistija od mineralnog dizelskog goriva i općenito pružaju više načina da se smanje štetne emisije, a da se pri tome drastično ne umanjí snaga motora i poveća potrošnja goriva.

S obzirom na štetne emisije mineralnih goriva alternativno biodizelsko gorivo postaje sve zanimljivije. Biodizel pruža prednosti s obzirom na trenje i opskrbljivanje [1], [2]. Osim toga, ono ne sadrži kancerogene tvari kao poliaromatske ugljikovodike i dušikove poliaromatske ugljikovodike. Pri izgaranju biodizela nastaju komponente ispušnih plinova, koji su manje štetni za ljudsko zdravlje [3]. S druge strane, visoka viskoznost, velika molekularna masa, te niska isparivost i neka druga svojstva biodizelskih goriva, mogu ponekad uzrokovati probleme poput nastajanja naslaga, začepjenja sapnica brizgaljki i nepokretnost klipnih prstena [4]. Ovi problemi postaju

očiti pri niskim temperaturama goriva, koje izazivaju porast viskoznosti biodizela iznad prihvatljive razine [5]. Poznato je da na viskoznost značajno utječe struktura spojeva, duljina lanca, položaj, broj i priroda dvostrukih veza, a također i priroda oksigenata. Općenito ugljikovodici u mineralnom dizelskom gorivu uzrokuju nižu viskoznost od masnih estera koje sadrži biodizel. Isto tako, doprinos masnih kiselina, oleinske, linolne kiseline, itd. ovisi o porijeklu biodizela koji se može proizvoditi iz ulja soje, sjemena repice, suncokreta, masline, kukuruza, itd. Od udjela tih masnih kiselina zavisi utjecaj metilnih estera u biodizelu. Prema tome, viskoznost i druge fizikalno-kemijske osobine se ne razlikuju samo između mineralnog dizela i biodizela već i između biodizelskih goriva različitog porijekla [6], [7], [8], [9]. Te razlike u osobinama goriva mogu prouzrokovati vidljive promjene značajki procesa paljenja, izgaranja i emisije. Pravi rezultati, dapače, mogu značajno varirati, ovisno o motoru koji se koristi, režimu rada i korištenom gorivu [10], [11], [12], [13], [14], [15].

U radu se obrađuju mineralna dizelska goriva, čista biodizelska goriva i njihove mješavine, razmatra se utjecaj svojstava goriva na značajke motora s ciljem da se smanje štetne emisije. Razmatrani motor je autobusni dizelov motor s mehanički upravljanim izravnim ubrizgavanjem goriva i MAN-ovim M postupkom izgaranja. Goriva koja se razmatraju su čisti biodizel iz repičina ulja (B100) i nekoliko njegovih smjesa s mineralnim dizelskim gorivom (D2). U prvom dijelu rada prikazane su gustoća, viskoznost, površinska napetost i brzina širenja zvuka ispitivanih goriva. Zatim je ukratko prikazan eksperimentalni uređaj i postupak. U završnom dijelu je prikazan utjecaj osobina goriva na značajke ubrizgavanja goriva, radne osobine motora i neke tribološke karakteristike.

Osobine ispitivanih goriva

Goriva razmatrana u ovom radu su:

- čisto mineralno dizelsko gorivo D2, koje odgovara EN590,
- čisti biodizel, ovdje označen s B100 i proizveden iz repičnog sjemena u tvornici Pinus, Slovenija po europskom standardu EN14214 i
- njihove mješavine BXX, gdje XX označava vol. % biodizela (tj. B25 se sastoji od 25 % vol. biodizela i 75 % vol. mineralnog dizelskog goriva).

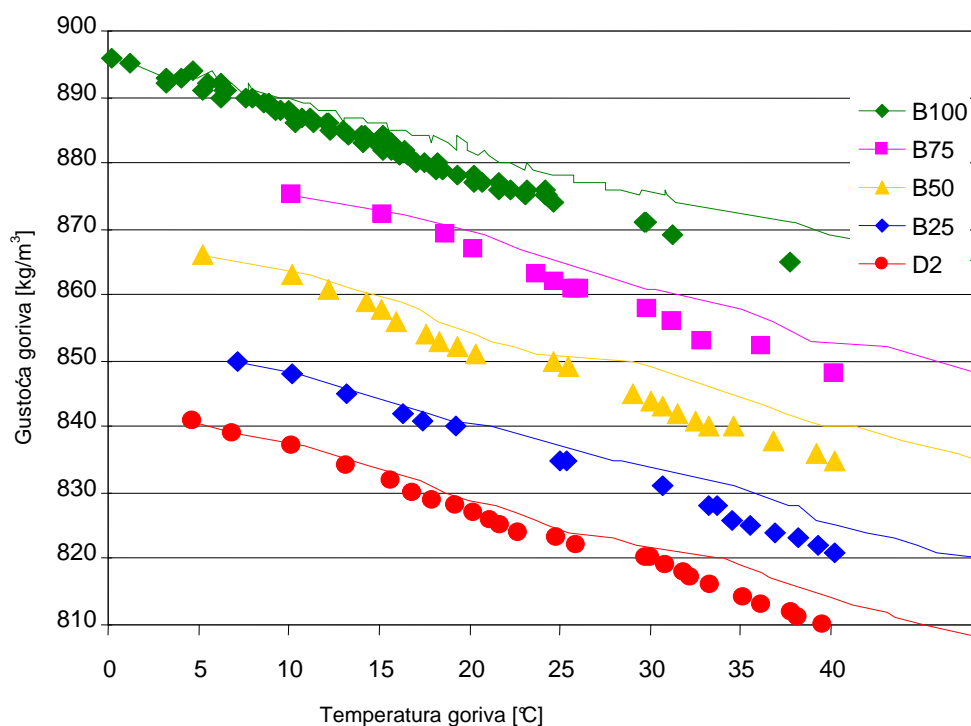
Nekoliko podataka o biogorivu Pinus zajedno s odgovarajućim vrijednostima standarda EN14214 sažeto je u tablici 1. Nijedno ispitivano gorivo nije sadržavalo aditive za zimske uvjete. Podaci o još nekim osobinama goriva D2 i B100 su prikazani u tablici 2.

Osobine goriva imaju zamjetljiv učinak na značajke motora. Zbog toga smo najvažnije osobine ispitivanih goriva odredili eksperimentalno. Gustoću goriva smo mjerili mjeračem gustoće DMA35PAAR. Gustoća goriva izmjerena tijekom naših eksperimenata pri tlaku okoliša, prikazana je na slici 1. Može se primijetiti da gustoća goriva raste s povećanjem sadržaja B100 i smanjenjem temperature.

Dinamičku viskoznost goriva smo mjerili kod dvije različite temperature, slika 2. Rezultati pokazuju da viskoznost raste gotovo progresivno sa snižavanjem temperature i povećavanjem sadržaja biodizela u gorivu.

Tablica 1: Značajke biodizelskog goriva

Osobina goriva	Biodizel – Pinus	Europski standard za biodizel EN 14214
Cetanski broj	> 51	> 51
Sadržaj estera (% m/m)	96.9	> 96.5
Sadržaj sumpura (mg/kg)	< 10	< 10
Ostatak ugljika na 10 % destilacijskom ostatku (%m/m)	< 0.3	< 0.3
Sadržaj vode (mg/kg) / Water content (mg/kg)	208	< 500
Oksidacijska stabilnost, 110 °C (sati)	14.8	> 6
Neutralizacijski broj (mg of KOH/g)	0.24	< 0.50
Jodni broj (g of I ₂ /100 g)	117	< 120
Metilni ester linolenske kiseline (% m/m)	8.5	< 12
Sadržaj metanola (% m/m)	0.01	< 0.20



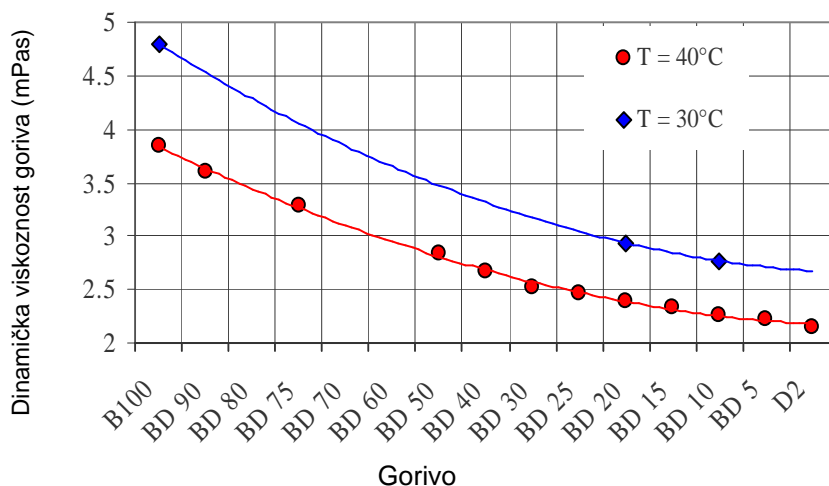
Slika 1: Ovisnost gustoće goriva o temperaturi i sadržaju biodizela

Površinsku napetost smo određivali za razna goriva pri različitim temperaturama, slika 3. Rezultati prikazuju da površinska napetost goriva linearno raste sniženjem temperature i povećanjem sadržaja biodizela u gorivu.

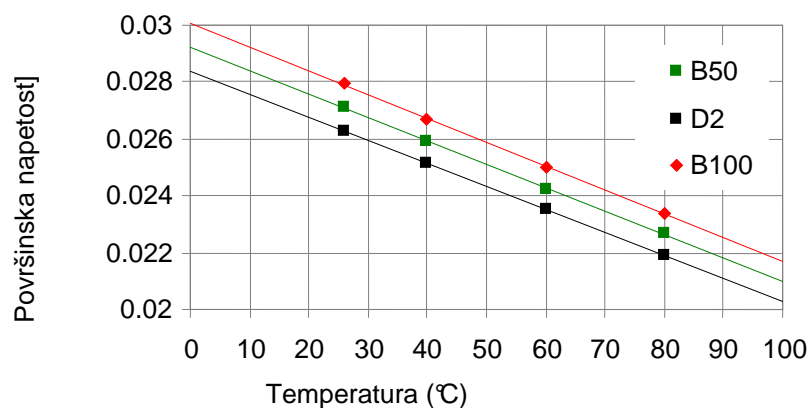
Mjerenje brzine zvuka temelji se na principu širenja vala u cijevi pod visokim tlakom, slika 4. Cijev je bila opremljena s dva piezo-električna senzora tlaka, postavljena na oba kraja cijevi. Brzina zvuka je mjerena na nekoliko tlakova do 400 bara korištenjem različitih goriva. Slika 5 prikazuje ovisnost brzine zvuka o udjelu biodizela u dizelskom gorivu na temperaturi goriva od 20 °C. Može se primijetiti da pri uvećanom tlaku i sadržaju biodizela, raste također i brzina zvuka. Slično zapažanje vrijedi i za modul elastičnosti svih ispitivanih goriva.

Tablica 2: Značajka dizelskog goriva i biodizela

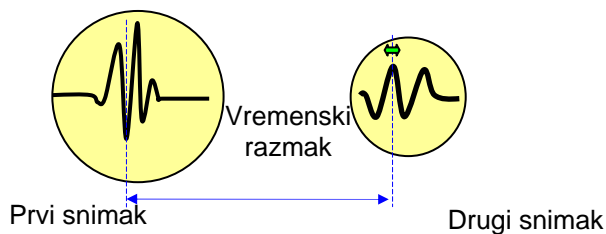
Gorivo	D2	B100
Kinematička viskoznost @ 30 °C (mm ² /s)	3.34	5.51
Površinska napetost @ 30 °C (N/m)	0.0255	0.028
Donja ogrjevna vrijednost (kJ/kg)	43.800	38.177
Cetanski broj	45-55	> 51



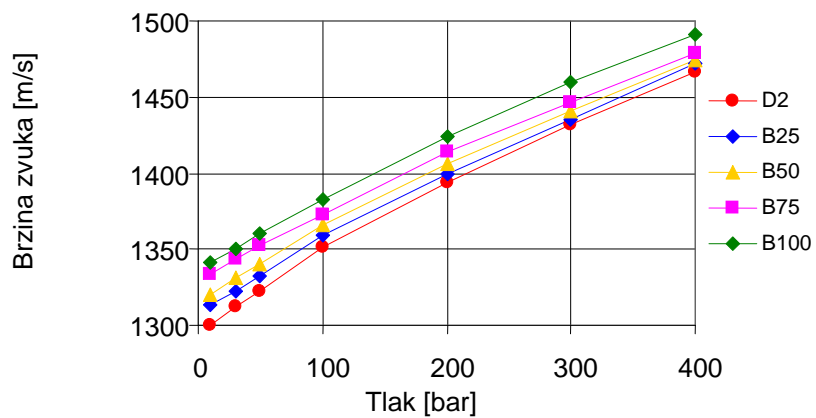
Slika 2: Utjecaj biodizela u dizelskom gorivu i temperature goriva na dinamičku viskoznost



Slika 3: Utjecaj temperature i sastava goriva na površinsku napetost



Slika 4: Princip mjerenja brzine zvuka



Slika 5: Ovisnost brzine zvuka o tlaku i sadržaju biodizela u gorivu

Temeljem iznesenog moguće je uočiti da se osobine goriva značajno razlikuju. To znači da će sadržaj biodizela u gorivu imati signifikantan utjecaj na procese izgaranja i posljedično na emisiju motora i druge tribološke značajke. Zbog tog razloga poduzeli smo niz istraživanja.

Eksperimentalni uređaj i postupci

Prikazane su dvije kategorije analize za izučavanje:

- utjecaj osobine goriva na značajke motora kod raznih radnih uvjeta i
- utjecaj osobine goriva na tribološke značajke, pogotovo na hrapavost površine klipa pumpe i igle brizgaljke, poslije određenog vremena korištenja biodizela.

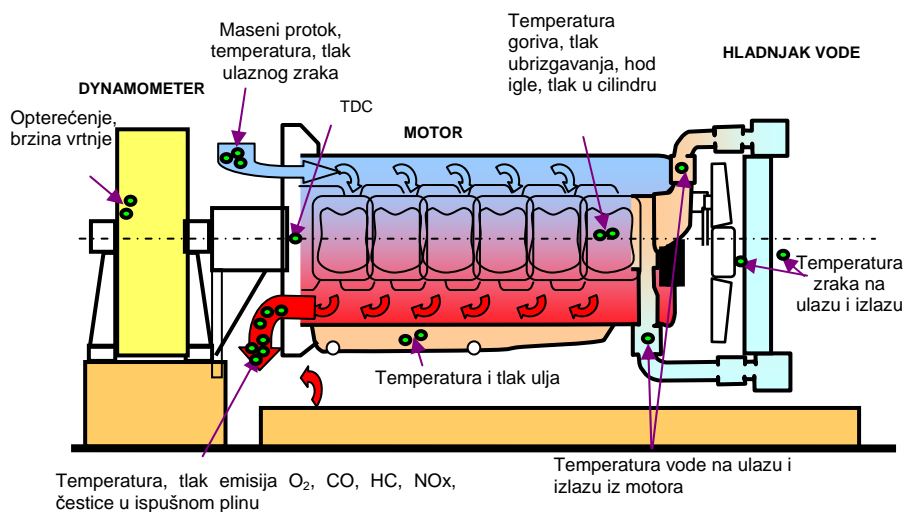
Značajke motora su bile ispitivane autobusnim dizelovim motorom. Osnovni podaci o motoru su navedeni u tablici 3. Motor je prošao generalni remont poslije 500000 kilometara rada. Pomoću sustava za obradu podataka mjereni su trenutačni tlak u cijevi visoka tlaka, trenutačni tlak u cilindru, temperatura goriva okolnog zraka, ulaznog zraka, vode za hlađenje na ulazu i izlazu iz motora, ulja i temperatura ispušnih plinova.

Tablica 3: Podaci o motoru i sistemu za ubrizgavanje

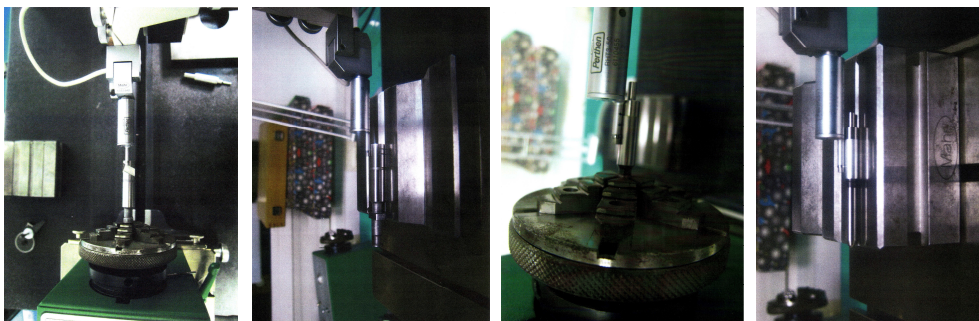
Model motora	MAN D 2566 MUM
Tip motora	4 taktni, 6 cilindrični, linijski, vodom hlađeni
Radna zapremina	11 413 cm ³
Stupanj kompresije	17.5 : 1
Promijer i hod stapa	125 mm x 155 mm
Maksimalna snaga	162 kW kod 2200 rpm
Način ubrizgavanja goriva	Izravno ubrizgavanje, (MAN) M-postupak izgaranja
Pumpa za ubrizgavanje goriva	Bosch PES 6A 95D 410 LS 2542
Klip pumpe (promjer x hod)	9.5 mm x 8 mm
Cijev za gorivo (dužina x promjer)	1024 mm x 1.8 mm
Sapnica (broj x promjer otvora sapnice)	1 x 0.68 mm
Hod igle (najveći)	0.3 mm
Tlak otvaranja igle	175 bar

Shematski prikaz uređaja za ispitivanje motora je prikazan na slici 6. Uređaj ima elektro kočnicu Zollner A350AL, 300kW, mjerac protoka zraka RMG, sustav za mjerenje potrošnje goriva AVL, analizator UHC Ratfisch, kemoluminiscentni analizator NO_x Thermoelektron, O₂ analizator Programm electronic, CO analizator Maihak, mjerac čestica (emisija čestica) AVL.

Tribološke značajke, pogotovo površinska hrapavost klipa pumpe i igle sapnice nakon određenog vremena uporabe, mjerene su s dizelskim gorivom i biodizelom na uređaju Perthen, koji se sastoji od mehaničkog davača RHT 3/6 i rotirajuće glave PVRV3-100. Površinska hrapavost klipa pumpe i igle sapnice određivane su na dva načina, u kružnom i uzdužnom pravcu, slika 7.



Slika 6: Probni stol za ispitivanje motora



a) Klip crpke-kružno

b) Klip crpke-longitudinalno

c) Iгла-kružno

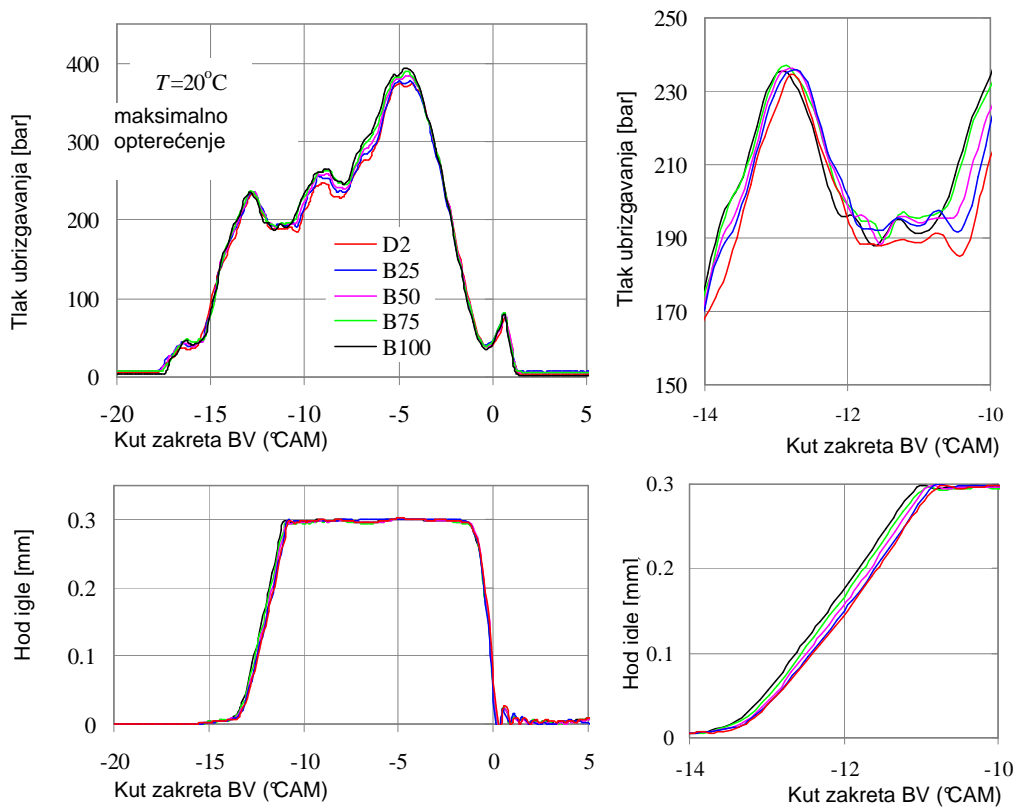
d) Iгла-longitudinalno

Slika 7: Uređaj za tribološka istraživanja

Da bismo odredili razliku u hrapavosti klipa crpke i igle sapnice pri uporabi dizelskog goriva i biodizela određivani su na stijenkama klipa crpke i igle sapnice sljedeći parametri hrapavosti: prosjek aritmetičke hrapavosti R_a , prosjek kvadratne hrapavosti R_q , maksimalna visina vršak-udubljenje R_y , i prosjek visine vršak-udubljenje R_z .

Učinak osobina goriva na značajke motora

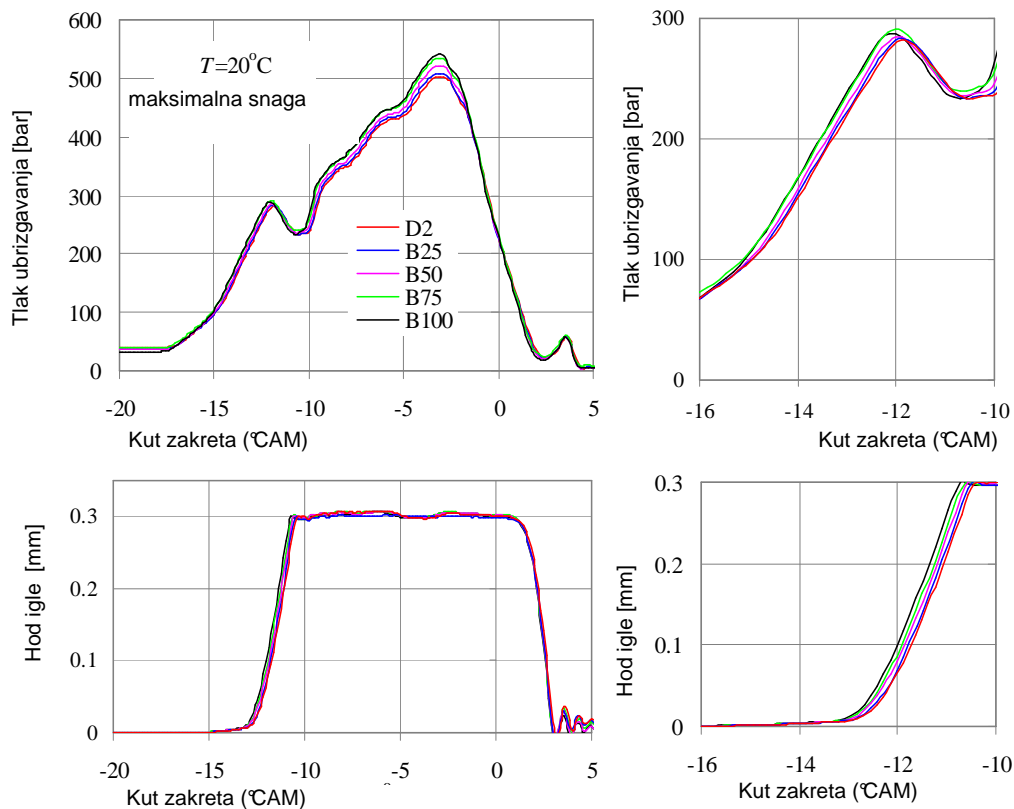
Ispitivanje smo izvodili s dizelskim gorivom D2, čistim biodizelom B100 i mješavinama B25, B50 i B75, pod raznim radnim uvjetima, pri temperaturi goriva od 20 °C i nepromijenjenim kutom po četka ubrizgavanja goriva. Eksperimentalne rezultate pri maksimalnom opterećenju prikazuje slika 8.



Slika 8: Utjecaj na tlak ubrizgavanja i hod igle; maksimalni moment motora

Dijagrami pokazuju da maksimalni tlak ubrizgavanja raste sa sadržajem biodizela u gorivu, te da je najveća razlika oko 40 bara. Porastom brzine vrtnje pumpe pri punom opterećenju utjecaj sadržaja biodizela postaje očigledniji, slika 9. Početak ubrizgavanja se odmiče od GMT i maksimalni tlak ubrizgavanja je u porastu s povećanjem sadržaja biodizela u gorivu. Razlika u viskoznosti i posljedično modula elastičnosti goriva, koja utječu na brzinu zvuka su odgovorni za nastalu razliku u kutu početka ubrizgavanja; slika 8, 9.

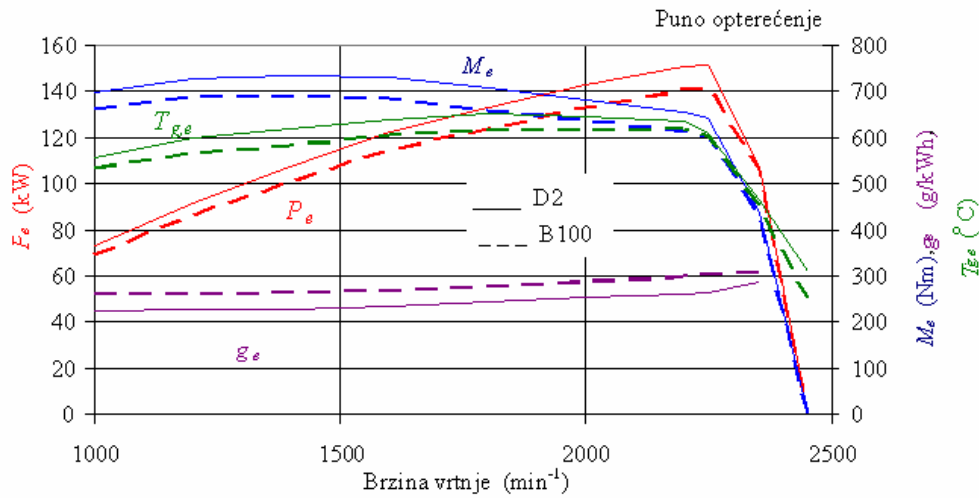
Porast modula elastičnosti uzrokovan povećavanjem udjela biodizela u gorivu, dovodi do bržeg širenja tlačnog vala od pumpe do sapnice i time do ranijeg podizanja igle. Veća viskoznost biodizela dovodi do smanjenog propuštanja u toku procesa ubrizgavanja, do bržeg porasta tlaka, a prema tome do ranijeg početka ubrizgavanja.



Slika 9: Utjecaj goriva na tlak ubrizgavanja i hod igle pri maksimalnoj snazi motora

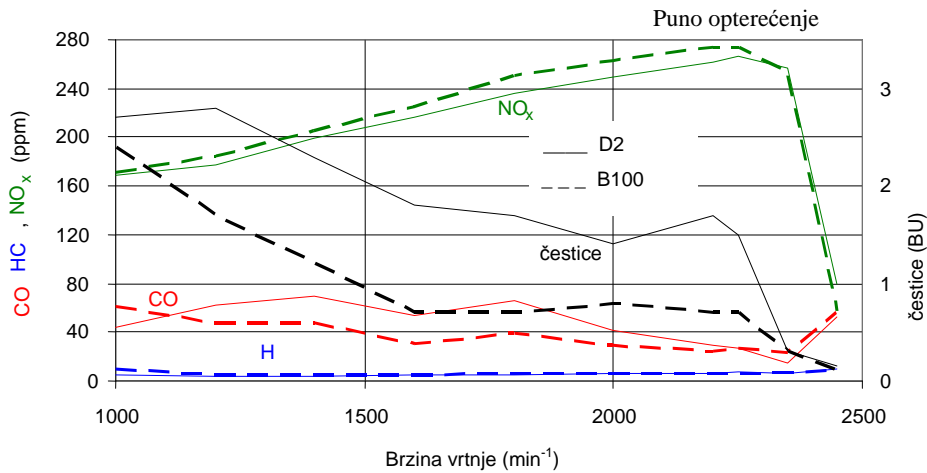
Svojstva goriva kao gustoća, viskoznost, brzina zvuka, modul elastičnosti, cetanski broj, sadržaj kisika i druga, imaju značajan učinak ne samo na početak ubrizgavanja, već i na početak i brzinu izgaranja kinetičkog i difuzijskog plamena, a time i na emisiju i druge radne osobine motora. Utjecaj goriva na značajke motora ispitivali smo pri radu motora uz propisano podešavanje pumpe za D2 dizelsko gorivo.

Usporedba nekoliko značajki motora s gorivom D2 i B100, pod radnim uvjetima punog opterećenja, prikazuje slika 10. Efektivni moment M_e i snaga P_e pri radu motora s B100 smanjuju se za oko 5 %, dok se specifična efektivna potrošnja goriva g_e (za istu masu goriva) povećava za oko 10 % kod svih brzina vrtnje motora. Nasuprot tome, temperature ispušnih plinova $T_{g,e}$ su niže za oko 30 °C, što je vjerojatno uzrokovano nižom donjom ogrjevnom vrijednošću goriva B100.



Slika 10: Utjecaj goriva na radne osobine motora pri punom opterećenju

Usporedbom emisija NO_x , čestica, CO, neizgorelih HC postaje očito, prema slici 11, da je pri punom opterećenju motora koristeći B100 emisija NO_x kod svih radnih brzina motora veća i to s porastom brzine vrtnje. Suprotan se učinak primjećuje glede čestica. Emisije CO i HC su manje primjenom B100 goriva gotovo pri svim brzinama vrtnje motora. Emisija NO_x povećava se pri većim brzinama vrtnje.

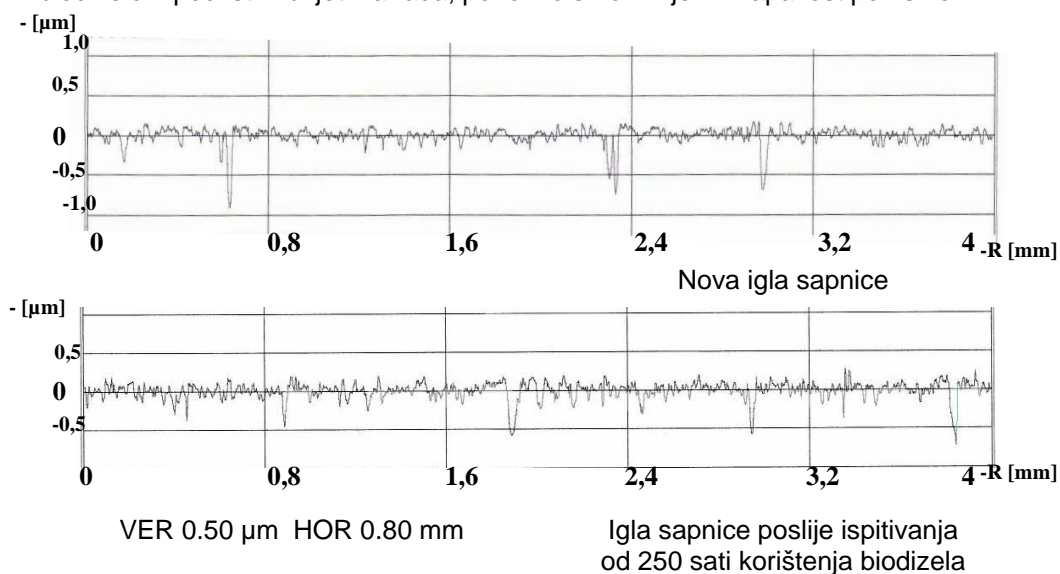


Slika 11: Utjecaj goriva na emisije pri punom opterećenju motora

Ovo se ponajprije događa zbog intenzivnijeg strujanja plinova unutar cilindra pri većim brzinama vrtnje motora, što izaziva bolje miješanje zraka i goriva i skraćivanje intervala zakašnjenja paljenja, uzrokujući povećanje gradijenta tlaka, a prema tome i temperature plinova. Nadalje slijedi, da se porastom brzine vrtnje, emisija CO neznatno smanjuje, dok emisija HC ostaje praktički nepromijenjena. Niže emisije CO, HC i čestica, koje nastaju pri korištenju B100 su vjerojatno prvenstveno zbog činjenice što biodizel sadrži u molekuli više kisika, što povoljno utječe na oksidaciju produkata izgaranja u cilindru motora.

Učinak osobina goriva na tribološke značajke

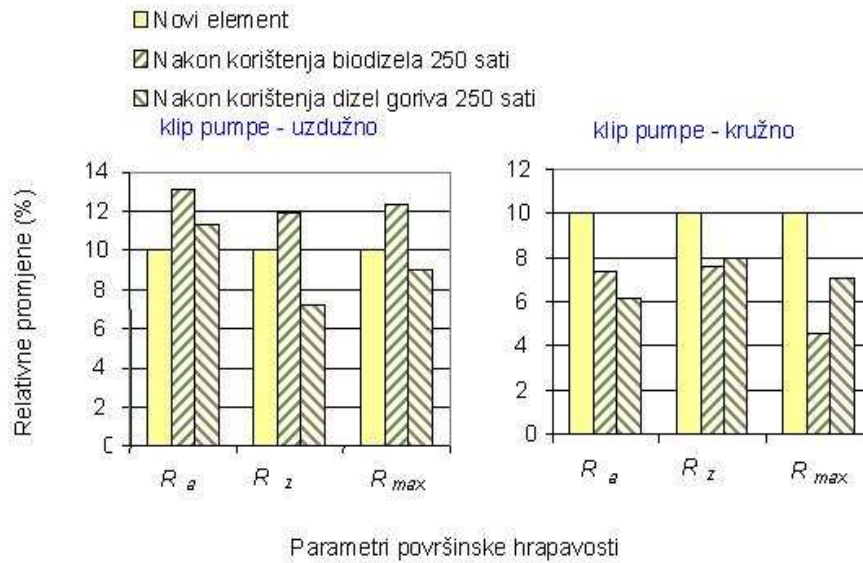
Učinak goriva na tribološke značajke istraživali smo s ciljem da se dobije opći uvid o utjecaju dizelskog i biodizelskog goriva na parametre površinske hrapavosti klipa pumpe i igle sapnice, mjenjenih u uzdužnom pravcu i po opsegu. Najprije smo odredili hrapavost novih dijelova. Nakon 250 sati rada novih dijelova s dizelom i biodizelom pod istim uvjetima rada, ponovno smo izmjerili hrapavost površine.



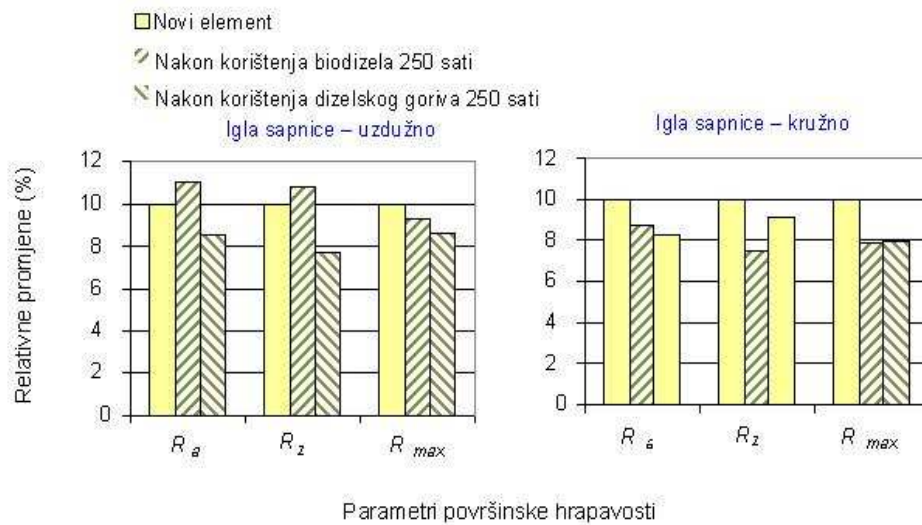
Slika 12: Utjecaj biodizela na površinsku hrapavost igle sapnice

Uporaba dizelskog goriva i biodizela utječe na površinske parametre hrapavosti stijenke klipa pumpe i igle sapnice, slika 13 i 14. Međutim, razlike između utjecaja dizelskog goriva i biodizela nisu posve očite. Moguće je primijetiti da svi parametri hrapavosti na stijenci klipa pumpe mjenjeni u uzdužnom smjeru rastu, ako se upotrebljava biodizel, dok je pri dizelskom gorivu dobiven suprotan učinak, slika 13. S druge strane, svi se parametri površinske hrapavosti mjenjeni u kružnom smjeru smanjuju u svim slučajevima, tj. kada se koristi dizelsko i biodizelsko gorivo. Slične smo rezultate dobili mjerenjem hrapavosti igle sapnice uzdužnim i kružnim smjerom.

Za jednoznačno i eksplicitno definiranje zaključaka o utjecaju vrste goriva na površinsku hrapavost spomenutih dijelova potrebna je obrada još većeg broja eksperimentalnih podataka.



Slika 13: Utjecaj biodizela na površinsku hrapavost klipa pumpe



Slika 14: Utjecaj biodizela na površinsku hrapavost igle sapnice

Zaključci

Predstavljeni su učinci korištenja biodizela na radne značajke motora i na izabrane tribološke parametre MAN-ovog D2566 autobusnog motora s mehaničkom regulacijom izravnog ubrizgavanja goriva i M načinom pripreme smjese. Korišteni biodizel je bio proizveden iz ulja repičnog sjemena. Analizirali smo utjecaj dizelskog i biodizelskog goriva, te njihovih mješavina na značajke motora. Naša pažnja je bila osim toga usmjerena na tribološke pojave, pogotovo na površinsku hrapavost klipa pumpe i igle sapnice. Na temelju analize rezultata dobivenih eksperimentalno, možemo iznijeti sljedeće zaključke:

- Pri korištenju nemodificiranog motora, biodizel ima pozitivni utjecaj na emisije CO i čestica i na temperaturu ispušnih plinova pri radu motora kod punog opterećenja. Emisija HC povećava se samo kod uvjeta rada pri najvećem momentu. Specifična potrošnja goriva se povećava. S obzirom na emisiju NO_x i čestica, može se zaključiti da B100 smanjuje u velikoj mjeri čestice, ali se emisija NO_x povećava za oko 5 % kod svih radnih uvjeta motora.
- Analiza značajki ubrizgavanja goriva ukazuje da se produžava trajanje, ubrzava početak i raste tlak ubrizgavanja pri radnim uvjetima maksimalne snage i maksimalnog opterećenja, ako se udjel biodizela u gorivu povećava. Veća brzina zvuka i veći modul elastičnosti B100 utječu na smanjivanje zakašnjenja, a time i na raniji početak ubrizgavanja.
- Korištenje biodizelskog i dizelskog goriva u trajanju od 250 sati utječe na površinsku hrapavost klipa pumpe i igle sapnice. Izgleda da ne postoji neka značajna razlika utjecaja oba goriva. U buduću će biti potrebno provesti dodatna tribološka ispitivanja da bi se moglo točnije ocijeniti ovaj utjecaj.

Zahvala

Istraživanja su financijski potpomognuta u okviru "European Community's Sixth Framework Programme" za potrebe projekta Civitas II Mobilis.

Literatura

- [1] Dorado, M. P., E. Ballesteros, J. M. Arnal, J. Gomez, F. J. Lopez, Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil, *Fuel* 82 (2003), pp. 1311-1315.
- [2] Senda, J., N. Okui, T. Tsukamoto, H. Fujimoto, On board measurement of engine performance and emissions in diesel vehicle operated with biodiesel fuel, SAE 2004-01-0083, 2004.
- [3] Lin C.Y., H.A. Lin, Diesel engine performance and emission characteristics of biodiesel characteristics of biodiesel produced by the peroxidation process, *Fuel* 85 (2006), pp. 298-305.
- [4] Nabi, N., S. Akhter, M. Z. Shahadat, Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel – biodiesel blends, *Bioresource Technology* 97 (2006), pp. 372-378.
- [5] Kegl, B., Biodiesel usage at low temperature, *Fuel* 87 (2008), pp. 1306-1317.
- [6] Knothe, G., K. R. Steidley, Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and

- related compounds, Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components, *Fuel* 84 (2005), pp. 1059-1065.
- [7] Yamane K., A. Ueta, Y. Shimamoto, Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine, *International Journal of Engine Research* 2 (2001), pp. 249-261.
- [8] Boehman A.L., D. Morris, J. Szybist, The impact of the bulk modulus of diesel fuels on fuel injection timing, *Energy & Fuels* 18 (2004), pp. 1877-1882.
- [9] Krisnangkura K., T. Yimsuwan, R. Pairintra, An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures, *Fuel* 85 (2006), pp. 107-113.
- [10] Kegl, B., Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel, *Fuel* 85 (2006), pp. 2377-2387.
- [11] Kegl B., Experimental investigation of optimal timing of the diesel engine injection pump by using biodiesel fuel, *Energy & Fuels* 20 (2006), pp. 1460-1470.
- [12] Szybist J.P., A.L. Boehman, J.D. Taylor, R.L. McCormick, Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NO_x effect, *Fuel Processing Technology* 86 (2005), pp. 1109-1126.
- [13] Durbin, T. D., Collins, J. R., Norbeck, J. M., Smith, M. R., Effects of biodiesel, biodiesel blends, and a synthetic diesel on emissions from light heavy-duty diesel vehicles. *Environmental Science & Technology* 34 (2000), pp. 349-355.
- [14] Kegl, B., Hribernik, A., Experimental analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. *Energy & fuels*, 20 (2006), pp. 2239-2248.
- [15] Kegl, B., Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. *Bioresource technology* 99, (2008), pp. 863-873.

UDK	ključne riječi	key words
621.436-634.5	biodizelsko gorivo	biodiesel fuel
544.16	ovisnost svojstava o kemijskoj strukturi	dependence of properties on chemical structure
621.891	tribologija (trenje, trošenje, podmazivanje)	tribology (friction, wear and lubrication)
539.375.6	trošenje klipa motora	engine piston wear

Autori

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

Blaž Vajda, dipl. Ing. e-mail: blaz.vajda@uni-mb.si

ass. prof. dr. Stanislav Pehan, e-mail: stanislav.pehan@uni-mb.si

prof. dr. Breda Kegl, e-mail: breda.kegl@uni-mb.si

University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia

Primljeno

5.2.2009.

Prihvaćeno

2.3.2009.