

Boran Pikula, Breda Kegl, Ivan Filipović, Aleš Hribernik

ISSN 0350-350X

GOMABN 46, 5, 386-402

Izvorni znanstveni rad

UDK 665.3.094.942 : 665.753.4 : 621.436.038.3 : 532.525

ENERGETSKI GUBICI U BRIZGALJCI

Sažetak

Sve stroži zahtjevi glede smanjenih emisija zagađujućih tvari od motornih vozila u cestovnom prometu dovode do zahtjeva za stalnim unapređenjem tehničkih rješenja na motoru, te zahtjeva za korištenjem alternativnih goriva. Primjena alternativnih goriva kod dizelovih motora može biti raznovrsna što dovodi do zaključka o nužnosti kvalitetnog poznavanja značajki goriva i njihovog utjecaja na karakteristike ubrizgavanja. Analizom primjene različitih alternativnih goriva uočeno je da se osnovni pokazatelji procesa ubrizgavanja kao što su: tlak ubrizgavanja, trajanje procesa ubrizgavanja, količina ubrizganog goriva, itd. mijenjaju, što značajno utječe na proces izgaranja u dizelovom motoru. Zbog toga je nužno da se za optimalni proces izgaranja u dizelovom motoru podese sustav za ubrizgavanje goriva.

Posebno interesantno mjesto u sustavu za ubrizgavanje goriva je brizgaljka, gdje se vrši pretvorba potencijalne u kinetičku energiju, uz prisutnost značajnih energetskih gubitaka. Stoga je posebna pažnja posvećena obradi eksperimentalnih rezultata karakteristika ubrizgavanja i nabrojanih osnovnih pokazatelja procesa ubrizgavanja. Nakon provedene analize pristupilo se definiranju energetskih gubitaka u brizgaljci što će biti prezentirano u radu.

1. Uvod

Jedno od obilježja dvadesetog stoljeća je apsolutna dominacija nafte, odnosno njezinih derivata, kao izvora pogonske energije za vozila i mehanizaciju. Primat među energentima nafta je zaslužila zahvaljujući svojoj visokoj ogrjevnoj moći, znatnoj rasprostranjenosti nalazišta i relativno jednostavnoj eksploataciji i manipulaciji. Također, nafta je pogodna za različite vidove prerade, pa se iz nje može dobiti široka paleta goriva za vrlo različite namjene, što je od posebnog

značaja za primjenu u motorima s unutarnjim izgaranjem, koji su osobito zahtjevni glede kvaliteta pogonskog goriva.

Osim ograničenih zaliha fosilnih goriva, druga vrlo bitna značajka današnje energetske situacije, odnosno proizvodnje i korištenja energije iz fosilnih goriva, vezana je za ekološke probleme. Naime, izgaranje fosilnih goriva ozbiljno zagađuje okoliš, a kada je riječ o prometu i prijevozu, odnosno o svim vrstama vozila koja pogone motori s unutarnjim izgaranjem, može se tvrditi da su velikim tehnološkim unapređenjima u značajnoj mjeri riješeni problemi emisija glavnih zagađujućih tvari, kao što su ugljikovodici, teški metali, čestice čađe i dr. Ipak, ostao je neriješen problem emisije ugljičnog dioksida, koji zagađuje okoliš doprinoseći stvaranju efekta staklenika. To zapravo i nije moguće potpuno riješiti uz primjenu fosilnih goriva, jer toplinska energija iz njih potječe od izgaranja ugljika. Emisija ugljičnog dioksida je, dakle, neizbježan pratilac svih procesa izgaranja fosilnih goriva.

Smanjivanje emisije glavnih zagađujućih tvari u ispušnim plinovima od motornih vozila se postiglo uporabom suvremenih tehnoloških sustava na motoru, prije svega sustavu za ubrizgavanje goriva ali i sustavu za naknadu obradu ispušnih plinova. Tako se kod motornih vozila u posljednjem desetljeću susreću različiti sustavi koji su omogućili zadovoljavanje europskih normi po pitanju emisija ispušnih plinova, poznatih kao Euro 1, Euro 2, Euro 3 i Euro 4.

Drugi smjer u smanjivanju emisija zagađujućih tvari u ispušnim plinovima motornih vozila vodi kroz afirmiranje uporabe alternativnih i, po mogućnosti, obnovljivih izvora energije. Danas se intenzivno traga za novim obnovljivim izvorima energije, a isto tako i za alternativnim gorivima, koja bi se umjesto nafte i njezinih derivata koristila prije svega u motornim vozilima. Trenutačno najaktualnija alternativna goriva su propan-butan u javnosti poznat kao autoplina, metanol, etanol, bioplin i biodizel, metan, tj. prirodni plin. Kao rješenje za daljnju budućnost smatra se vodik koji je po mnogim osobinama daleko najbolje gorivo. Oba puta zahtijevaju opsežna i skupa istraživanja kao i velika ulaganja u proizvodne tehnologije i eksploatacijsku infrastrukturu.

Pored cijelog niza zahtjeva za primjenu određenog alternativnog goriva potrebno je da ono bude što sličnije odgovarajućem konvencionalnom gorivu. Na taj način se smanjuje ulaganje u modifikaciju motora nužno za prelazak na rad s alternativnim gorivom. U skladu s ovim zahtjevom, dosadašnja istraživanja su pokazala da su najperspektivnija alternativna goriva tzv. biogoriva, odnosno goriva dobivena iz biomase. Ova goriva se mogu koristiti u motorima, a ogrjevna moć im je vrlo slična kao i kod odgovarajućih konvencionalnih goriva. Danas se masovno koriste dvije vrste biogoriva: alkoholi i biodizel. Ono što je najvažnije naglasiti za ova goriva jest to da se i alkoholi i biodizel mogu koristiti samostalno ili kao dodatak konvencionalnim gorivima. Zbog svojih povoljnih ekoloških svojstva prilikom uporabe biodizela moguće je postići smanjenu emisiju gotovo svih zagađujućih tvari u ispušnim plinovima, izuzev NO_x kod kojeg se uočava određeno relativno povećanje u odnosu na emisije kod primjene konvencionalnog goriva (do 10 %).

2. Značajke alternativnih goriva

Imajući u vidu dosadašnja saznanja koja su ukratko rezimirana u prethodnom poglavlju može se zaključiti da optimalan izbor danas predstavlja uporaba alternativnih goriva kod kojih se ne zahtijeva bilo kakva modifikacija motora. Međutim, alternativna goriva posjeduju različite značajke koje u mnogome mogu doprinijeti promjeni krajnjih parametara motora, kao što su snaga motora, specifična potrošnja goriva, itd. Poznavajući sve relevantne značajke goriva moguće je izvršiti analizu utjecaja karakterističnih veličina koje određuju sastav goriva na rad motora, a jedan segment spomenute analize je svakako definiranje energetskih gubitaka kroz brizgaljku.

Za provođenje spomenute analize korištene su tri vrste goriva: konvencionalno dizelsko gorivo, označeno kao gorivo 1, alternativno gorivo označeno kao gorivo 3 i mješavina konvencionalnog dizelskog goriva i alternativnog goriva u omjeru 50:50 označenog kao gorivo 2. Osnovne značajke goriva dobivene kao rezultat mjerenja za slučaj korištenja navedenih goriva prikazane su u tablici 1.

Tablica 1: Karakteristične osobine goriva korištenog za analizu

Značajka	Gorivo 1	Gorivo 2	Gorivo 3
Gustoća, kg/m^3 pri temperaturi od 30 °C	817,26	842,76	868,25
Kinematička viskoznost, mm^2/s pri temperaturi od 30 °C	3,2278	4,1645	5,5069
Dinamička viskoznost, $mPas$ pri temperaturi od 30 °C	2,638	3,5087	4,7414

Za goriva čije su značajke prikazane u tablici 1 provedena je analiza utjecaja vrste goriva na karakteristične pokazatelje sustava za ubrizgavanje i motora, koja će biti prezentirana u sljedećem poglavlju.

3. Analiza rezultata istraživanja

3.1 Osnovni pokazatelji

U prethodnom poglavlju su prikazane vrijednosti gustoće i viskoznosti za tri različita goriva. Ove značajke goriva imaju značajan utjecaj na proces ubrizgavanja, a posebice kod uporabe standardnog sustava za dobavu dizelskog goriva. Poznato je da su početak i trajanje ubrizgavanja, količina ubrizganog goriva i kvaliteta raspršivanja goriva u komoru za izgaranje u izravnoj ovisnosti od navedenih značajki goriva. Niža ogrjevna vrijednost alternativnih goriva u odnosu na fosilno dizelsko gorivo uzrokuje gubitak snage motora koji može biti kompenziran većom količinom ubrizganog goriva. Ovu kompenzaciju treba izvesti tako da se zbog dužeg trajanja ubrizgavanja ne odrazi nepovoljno na početak izgaranja. Nadalje, ispitivanja parametara sustava za ubrizgavanje su pokazala da ciklusna dobava goriva, srednja vrijednost karakteristike ubrizgavanja, trajanje ubrizgavanja izraženo kutom

okretanja bregaste osovine i tlaka na kraju cijevi visokog tlaka rastu povećanjem udjela alternativnog goriva u smjesi goriva, tj. prema potpunom isključivanju konvencionalnog dizelskog goriva. Pored očekivanog smanjenja emisija zagađujućih tvari u ispušnim plinovima, ali i veće emisije NO_x, optimizacijom kuta predubrizgavanja su kompenzirani svi nedostaci uporabe alternativnog goriva na neprilagođenom sustavu za ubrizgavanje goriva.

3.2 Definiranje energetske gubitaka u brizgaljci

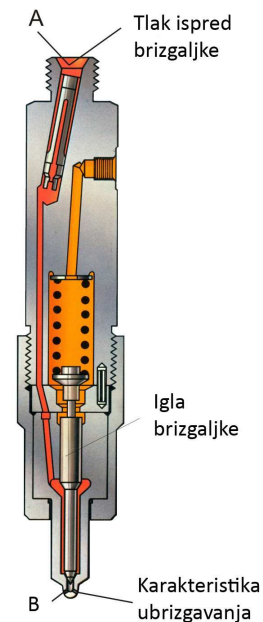
Poseban segment istraživanja bila je analiza energetske gubitaka u brizgaljci. Konstrukcijski izgled brizgaljke prikazan je na slici 1. Naime, s aspekta optimiranja procesa ubrizgavanja najvažniji je sustav za ubrizgavanje koji ima zadatak osigurati kvalitetno raspršivanje mlaza goriva. U tu svrhu potrebno je osigurati visoku potencijalnu energiju goriva (postignutu visokim tlakom prije brizgaljke – položaj A na slici 1) koja se sa što manje gubitaka treba transformirati u visoku kinetičku energiju mlaza goriva (ostvarenu velikom brzinom mlaza goriva – položaj B na slici 1) koji se ubrizgava u radni prostor motora. Upravo spomenuta transformacija potencijalne energije goriva u kinetičku energiju mlaza koja se najčešće definira koeficijentom gubitaka kroz brizgaljku bila je cilj našeg istraživanja.

Slika 1: Presjek brizgaljke s mjestima za mjerenje karakterističnih veličina

Da bi se odgovarajuće moglo pristupiti rješavanju ovog problema nužno je bilo provesti mjerenja tijekom kojih su prikupljene sljedeće informacije:

- hod igle brizgaljke,
- tlak na kraju cijevi visokog tlaka,
- količina ubrizganog goriva,
- signal karakteristike ubrizgavanja,
- početak i trajanje ubrizgavanja,
- temperatura goriva u niskotlačnom spremniku crpke visokog tlaka,
- brzina vrtnje crpke visokog tlaka sustava za ubrizgavanje.

Kao primjer eksperimentalnih rezultata u slučaju punog opterećenja i brzina vrtnje crpke visokog tlaka od 900 o/min, na slici 2 su prikazani karakteristični parametri sustava za ubrizgavanje i to: tlak na ulasku u brizgaljku i obrađeni signal karakteristike ubrizgavanja. Analizirajući krivulju tlaka na ulasku u brizgaljku može se zaključiti da u slučaju uporabe goriva 3 zbog veće gustoće, dinamičke i kinematičke viskoznosti, dolazi do postizanja višeg maksimalnog tlaka u sustavu za ubrizgavanje goriva. Također, zbog spomenutih značajki goriva može se uočiti brži rast tlaka



ispred brizgaljke u slučaju uporabe goriva 3 što dovodi do ranijeg početka ubrizgavanja, ali i nešto dužeg trajanja ubrizgavanja. Trajanje ubrizgavanja u slučaju goriva 3 iznosi 2,68 ms, dok u slučaju goriva 1 trajanje ubrizgavanja iznosi 2,66 ms. Poznavajući tlak u sustavu za ubrizgavanje prije brizgaljke, karakteristiku ubrizgavanja, količinu ubrizganog goriva, hod igle brizgaljke koji definira geometrijski protočni presjek kroz koji gorivo napušta brizgaljku sustava za ubrizgavanje i ubrizgava se u radni prostor, korištenjem izraza (1) za karakteristiku ubrizgavanja:

$$\dot{V}_c = \mu_b A_b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{II} - p_z)} \quad (1)$$

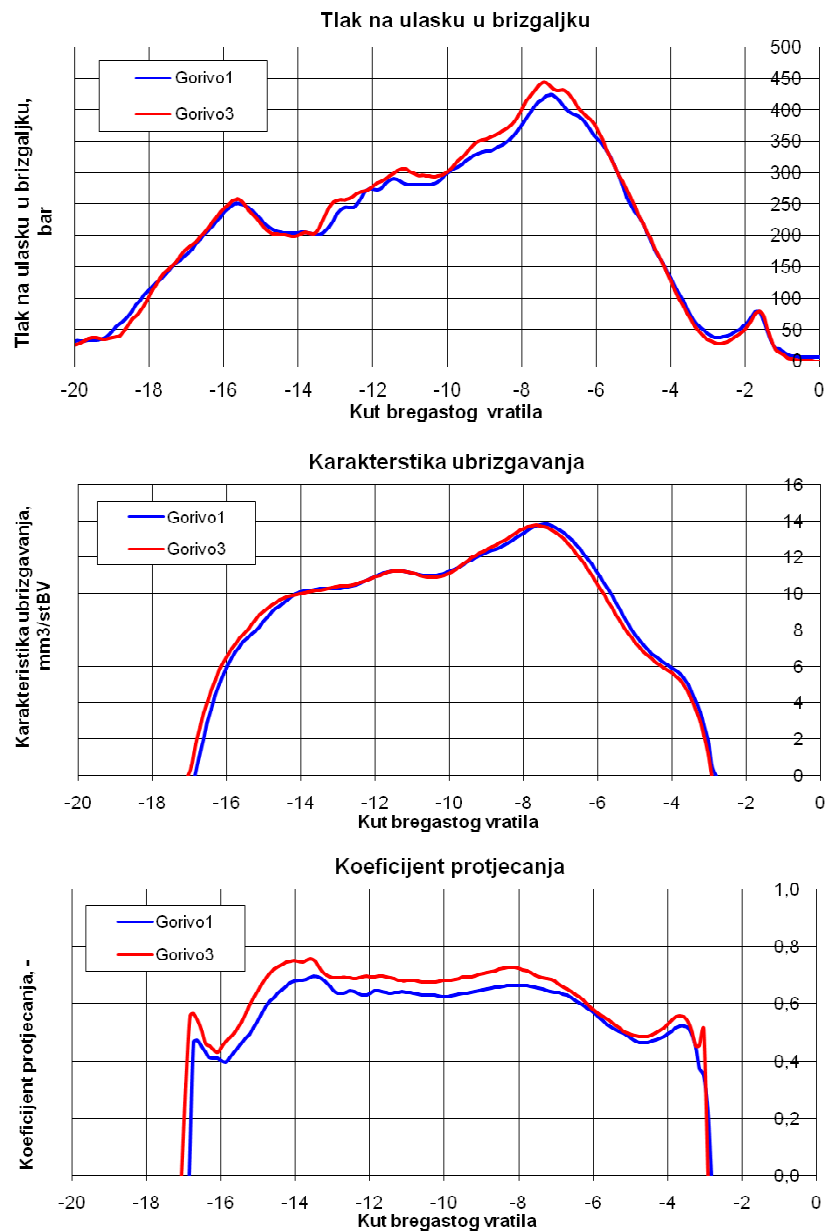
gdje su: $\mu_b A_b$ - efektivni protočni presjek brizgaljke, p_{II} - tlak goriva u sustavu za ubrizgavanje prije brizgaljke i p_z - tlak radnog prostora u koji se ubrizgava gorivo (motor s unutarnjim izgaranjem ili ispitne menzure), može se izračunati koeficijent protjecanja μ_b (ukupan gubitak) koji je prikazan na slici 2 za jedan konkretan režim rada sustava za ubrizgavanje.

Analizirajući rezultate koji se odnose na koeficijent protjecanja prikazan na slici 2, te utjecajne veličine prikazane u izrazu (1) može se zaključiti slijedeće:

- Na početku procesa ubrizgavanja karakterističan je nagli skok koeficijenta protjecanja koji dostiže određeni početni maksimum, a zatim lagani pad koji se može opravdati utjecajem promjenjivog geometrijskog protočnog presjeka pri otvaranju igle brizgaljke.
- Daljnjim podizanjem igle brizgaljke, već pri 1/3 hoda igle brizgaljke, kritični protočni presjek pri istjecanju goriva iz brizgaljke postaje poprečni presjek otvora mlaznice. Ova protočna površina tijekom najvećeg dijela procesa ubrizgavanja predstavlja kritični protočni presjek. S obzirom da se u ovom slučaju radi o konstantnoj protočnoj površini, zanimljivo je uočiti tok koeficijenta protjecanja, koji uglavnom zavisi od hidrodinamičkih uvjeta toka u brizgaljci.
- Na kraju procesa ubrizgavanja, s ciljem efikasnog završetka procesa ubrizgavanja, dolazi do smanjenja koeficijenta protjecanja (povećanja gubitaka) zbog naglog smanjenja tlaka u sustavu za ubrizgavanje neposredno prije brizgaljke. Ova promjena koeficijenta protjecanja može se opisati na potpuno analogan način kao pri podizanju igle brizgaljke na početku procesa ubrizgavanja.

Iako su uočene značajne promjene osobina goriva, kroz gustoću, kinematičku i dinamičku viskoznost, prikaz rezultata na slici 2 dao je mogućnost uočavanja promjene karakterističnih parametara sustava za ubrizgavanje. S ciljem kvalitetnije analize utjecaja koeficijenta protjecanja u funkciji vrste goriva, a samim tim i značajki goriva na slici 3 prikazani su energetske gubici na brizgaljci u funkciji od Re , vrste goriva i brzine vrtnje crpke visokog tlaka sustava za ubrizgavanje goriva.

Slika 2: Tlak na ulasku u brizgaljku, karakteristika ubrizgavanja i koeficijent protjecanja kod punog opterećenja i brzini vrtnje od 900 o/min



Važno je napomenuti da se svi rezultati odnose na slučaj kad je igla brizgaljka maksimalno podignuta, a *Reynoldsov* broj je definiran uporabom izraza (2).

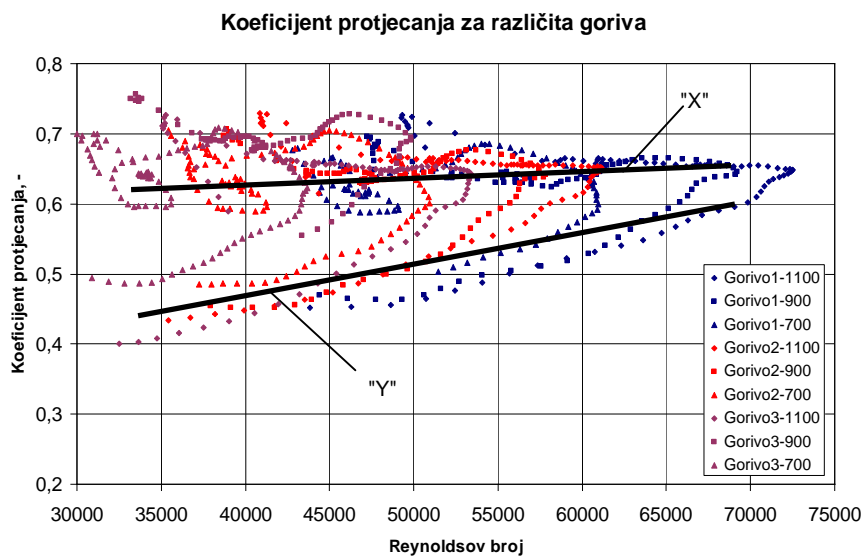
$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} \quad (2)$$

gdje su: ρ – gustoća goriva, μ – dinamička viskoznost, d – promjer mlaznice, w – brzina istjecanja mlaza goriva.

Na osnovi rezultata prikazanih na slici 3 može se uočiti da je tok koeficijenta protjecanja (gubitaka) u funkciji *Reynoldsovog* broja. Posebno je zanimljiv različit karakter u razdoblju porasta brzine protjecanja goriva kroz brizgaljku (krivulja X, slika 3) u odnosu na razdoblje smanjenja brzine protjecanja goriva kroz brizgaljku (krivulja Y, slika 3). Ovo se može tumačiti karakterom strujanja goriva kroz brizgaljku. Tako je omogućeno da se i ostali brzinski režimi usporedno analiziraju. Na slici 3 može se uočiti da se smanjenjem brzine crpke visokog tlaka postiže niži maksimalan tlak u sustavu za ubrizgavanje, neposredno prije brizgaljke. Na ovaj način se u potpunosti mogu definirati energetske gubici u brizgaljci za različite vrste goriva, različite brzinske režime i režime opterećenja.

Ovi gubici predstavljaju ukupne gubitke u brizgaljci. Posebno zanimljiva je njihova raspodjela uzduž brizgaljke, što se može odrediti kombinacijom eksperimenata i modeliranja procesa strujanja goriva u brizgaljci.

Slika 3: Energetski gubici u brizgaljci u funkciji vrste goriva i brzinskih režima



4. Zaključak

U radu je ukratko prikazan značaj uporabe alternativnih goriva s ciljem smanjenja emisije zagađujućih tvari putem ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem. Posebna pažnja je posvećena onim alternativnim gorivima za čiju uporabu se ne zahtijevaju modifikacije sustava za ubrizgavanje ili motora s unutarnjim izgaranjem. Na osnovi korištenih goriva, definiranih različitim fizikalnim značajkama, provedena su mjerenja koja su ukazala na njihov utjecaj na pokazatelje sustava za ubrizgavanje i motora s unutarnjim izgaranjem.

Za određivanje energetskih gubitaka u brizgaljci i analizi utjecaja različitih goriva, brzinskih režima i režima opterećenja provedena su određena eksperimentalna mjerenja. Nakon obrade eksperimentalnih rezultata, određen je koeficijent protjecanja, a prikazana je i metoda za njegovo određivanje. Pokazan je karakter koeficijenta protjecanja (gubitaka) u konkretnoj brizgaljci za poznate uvjete rada i on može poslužiti konstruktorima brizgaljke da formom pojedinih detalja povećaju koeficijent protjecanja, odnosno smanje gubitke u brizgaljci.

Literatura

1. A. Černež, Ž. Dobovišek: „Napajanje gorivom dizel i oto motora“, Svjetlost Sarajevo, Sarajevo, 1980
2. I. Filipović: „Analiza motornih parametara ubrizgavanja alternativnih goriva“, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Sarajevo, Sarajevo, 24.06.1983.
3. B. Pikula: „Istraživanje parametara savremenih sistema za ubrizgavanje goriva kod dizel motora“, magistarski rad, Mašinski fakultet Sarajevo, Sarajevo, 18.03.2002.
4. M. E. Tat, J. H. Van Gerpen: „Physical Properties and Composition Detection of Biodiesel-diesel Fuel Blends“, ASAE Meeting Presentation, Chicago, Illinois, USA, July 2002.
5. M. E. Tat, J. H. Van Gerpen: „Biodiesel Blend Detection Using a Fuel Composition Sensor“, ASAE Meeting Presentation, Sacramento, 2002.
6. M. E. Tat: „Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines“, doctoral dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, 2003.
7. B. Kegl: „Nastavitev motorja MAN D 2566 MUM pri uporabi biodizelskega goriva“, izvještaj izrađen u okviru projekta MOBILIS-CIVITAS II, Maribor, novembar 2005.
8. M. Volmajer, P. Pogorevc, B. Kegl: „Analiza vpliva uporabe biodizla i mešanica biodizel-plinsko olje na proces vbrizgavanja“, Innovative Automotive Technology, april 2005.
9. P. Pogorevc: „Vpliv biodizelskega goriva na karakteristike vbrizganega curka“, doktorska disertacija, Fakulteta za strojništvo v Mariboru, Maribor, februar 2006.

Autori

mr Boran Pikula, dipl. ing.¹; Izv. Prof. dr Breda Kegl, dipl. ing.²; Red. Prof. dr Ivan Filipović, dipl. ing.¹, Izv. Prof. dr Aleš Hribernik, dipl.ing.²

¹ Mašinski fakultet Sarajevo, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, BIH

² Fakulteta za strojništvo, Univeza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

UDK	ključne riječi	key words
665.3.094.942	biodizelsko gorivo, metilni esteri masnih kiselina	biodiesel fuel, fatty acids methyl ester (FAME)
665.753.4	dizelsko gorivo	diesel fuel
621.436	dizelov motor	diesel engine
621.436.038.3	atomizacija i ubrizgavanje biodizelskog goriva tlakom	biodiesel fuel atomization and fuel injection by pressure
532.525	istjecanje iz sapnica	flow through nozzles

Primljeno: 03.07.2006.