

Dževad Bibić, Ivan Filipović, Breda Kegl, Boran Pikula

ISSN 0350-350X

GOMABN 48, 3, 333-350

Izvorni znanstveni rad/Original scientific paper

UDK 621.436-634.5 : 621.436.068.3 : 621.436.038

UTJECAJ BIOGORIVA NA SASTAV ISPUŠNIH PLINOVA DIZELOVIH MOTORA

Sažetak

Uvođenje u opticaj goriva porijeklom iz obnovljivih izvora energije, bilo kao dodatak konvencionalnim gorivima bilo kao čista goriva, ima opravdanje s aspekta tendencija uštede konvencionalnih goriva i smanjenja globalne emisije CO₂. Međutim, ovisno o vrsti obnovljivog izvora od kojih su dobivena goriva, treba očekivati i različitu emisiju onečišćujućih tvari u odnosu na konvencionalna goriva. Opća teoretska razmatranja također ukazuju da primjena goriva iz obnovljivih izvora energije posjeduje potencijal i za smanjenje emisije reguliranih onečišćujućih tvari.

U okviru rada razmatrana je uporaba biodizela, kao vrste goriva iz obnovljivog izvora, s aspekta emisije reguliranih emisija ispušnih plinova dizelovih motora s unutarnjim izgaranjem namijenjenih teretnim vozilima. Ispitivanja obuhvaćaju procedure koje odgovaraju europskim normama, odnosno tzv. European Stationary Cycle (ESC ciklus) koje se obvezno koriste pri homologiranju motora s unutarnjim izgaranjem. Na osnovi rezultata ispitivanja i odgovarajućih kalkulacija usporedno su prikazane emisije onečišćujućih tvari za slučaj korištenja bio i konvencionalnog goriva u motoru s unutarnjim izgaranjem s jednakim osnovnim parametrima, te je uz odgovarajuću argumentaciju ukazano na važnost optimizacije rada motora, prije svega kuta ubrizgavanja goriva, u ovisnosti o primjenjivanom gorivu.

1. Uvod

Brojne studije pokazuju da ulja organskog porijekla, kao repice, soje, suncokreta i dr. predstavljaju različita alternativna goriva za dizelove motore. Ona su obnovljiva, netoksična, biorazgradljiva, s nižim emisijama čestica i višim cetanskim brojem pri usporedbi s dizelskim gorivom. Čista ulja imaju veliku viskoznost, te se kao takva ne mogu upotrijebiti u motoru, nego se određenim procesima prevode u tzv. biogoriva.

Mnogo je činjenica koje idu u prilog korištenju biogoriva kao alternative fosilnim gorivima, a važne povijesne činjenice s obzirom na opskrbu energijom u Europskoj uniji (EU) su sljedeće:

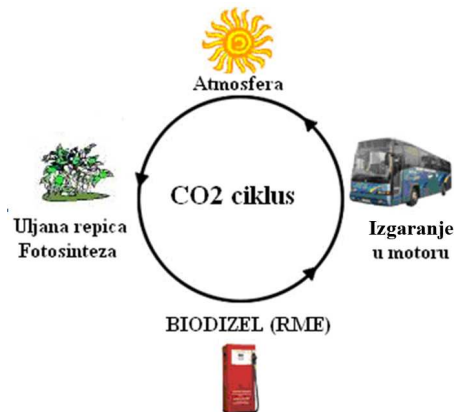
- industrijska ovisnost Europe temeljena je na fosilnim izvorima,

- energetska ovisnost o uvozu je 50 %, uz visoku osjetljivost s obzirom na nestabilnu političku situaciju u zemljama u kojima se nalaze glavni izvori fosilnih goriva,
- veliko nagomilavanje stakleničkih plinova zbog emisije fosilnih goriva u razdoblju više od 100 godina čime se povećava globalno onečišćenje – postoji konsenzus o postojanju klimatskih promjena kao rezultat prethodnog [1].

Neke od činjenica koje su danas značajne s obzirom na opskrbu energijom u Europi:

- zalihe fosilnih goriva se sve više smanjuju i sigurno je da će se jednog dana iscrpiti,
- dramatičan je porast cijene fosilnih goriva,
- obnovljivi izvori u ukupnoj energetskoj potrošnji u Europi sudjeluju sa samo: 5,61 % u 2004. godini (5,5 % u 2003. godini.) [1].

Europska unija je usvojila strategiju predstavljanja i razvoja biodizela kao alternativnog goriva u prometnom sektoru. Europa je svoju strategiju usmjerila na prometni sektor, s obzirom da na njega otpada više od 30 % ukupne potrošnje energije u Europskoj uniji i u stalnom je porastu. Od toga otpada 98 % na fosilna goriva. Prema posljednjim podacima, ako se ništa ne učini da se promijeni trend porasta prometa, može se očekivati da emisija CO₂ iz prometa poraste i do 50 % u odnosu na emisiju iz 1990. god. Od ovoga iznosa na sektor cestovnog prometa otpada 84 % emisije CO₂. Zato je strategija EU za uvođenje obnovljivih izvora energije koji emitiraju manje CO₂ usmjerena na promet. Biodizel je u principu neutralan. Kad biljke rastu, one apsorbiraju CO₂, poslije toga se žanju te se iz njih dobiva biogorivo koje izgara u motorima vozila i oslobađa CO₂, tako da je uspostavljen "idealni" CO₂ krug, slika 1. Međutim, zasad ovaj krug nije baš idealan, jer biodizel oslobađa nešto više CO₂ nego što biljke apsorbiraju.



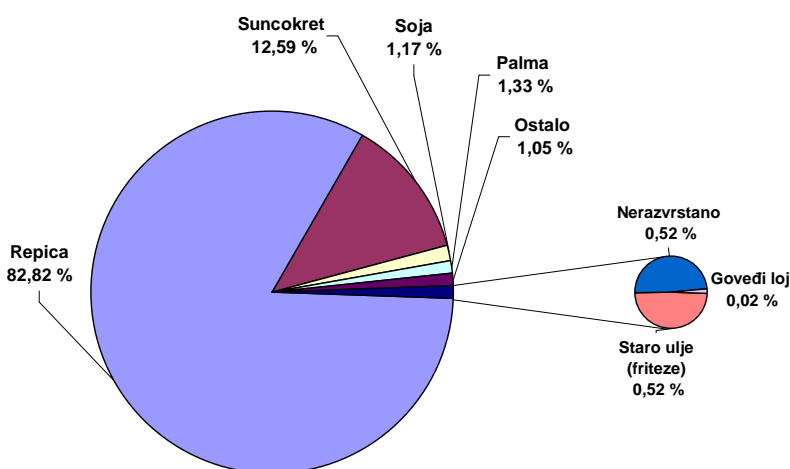
Slika 1: „Idealni“ CO₂ krug [2]

U svim većim gradovima EU veliki naglasak je stavljen na javni prijevoz. Svi gradovi raspolažu velikim voznim parkovima gradskih autobusa, pretežno pokretanih dizelovim motorima. Interes je usmjeren na proizvodnju autobusa pokretanih dizelovim motorom s dobrom ekonomičnošću potrošnje goriva i sa što manje štetnih tvari u ispušnim plinovima. Gorivo dobiveno iz biomase moglo bi pružiti rješenje ove dileme, budući da uzpotencijal za uspostavljanje „idealnog“ CO₂ kruga imaju i potencijal za smanjenje emisije reguliranih onečišćujućih tvari iz ispušnih plinova dizelovih motora.

S obzirom na navedene činjenice, donesena su neka zakonska rješenja vezana uz ovo pitanje. Tako je na razini EU donesena Direktiva 2003/30/EC o biogorivu, kojoj je cilj unapređenje uporabe biogoriva ili drugih obnovljivih izvora u transportu. Između ostalog, ovom direktivom se nalaže slijedeće:

- Države članice moraju do kraja 2005. godine osigurati 2 %, a do kraja 2010. g. 5,75 % minimalnog udjela biogoriva u ukupnom utrošku svih benzinskih i dizelskih goriva, mjereno s obzirom na njihovu energetska vrijednost.
- Biogoriva mogu biti raspoloživa kao:
 - a. čista biogoriva ili s visokom koncentracijom u fosilnom gorivu,
 - b. pomiješana s fosilnim gorivom u skladu s odgovarajućim europskim normama,
 - c. kao tekućine izvedene iz biogoriva, kao što je ETBE (etil-tercijarni-butil-eter), biogorivo dobiveno na bazi bioetanola s najmanje 47 % bio-ETBE [6].

Biogorivo se može dobiti iz biljnih ulja, recikliranog otpadnog jestivog ulja ili životinjske masti. Danas oko 55 % industrije biodizela koristi masti ili ulje bilo kakvog porijekla, uključujući i recikliranu mast za kuhanje, dok se ostatak proizvodnje odnosi na biljna ulja. Biljno ulje se opet dobiva iz različitih izvora, od kojih su najzastupljeniji: repica, suncokret, soja, palma i dr.



Slika 2: Sirovine za proizvodnju biodizela [2]

U Europi je glavna sirovina za proizvodnju biodizela uljena repica, dok je u Americi to suncokret što je povezano s raspoloživim prirodnim resursima pojedinih geografskih područja. Ulja suncokreta i repice su visokokvalitetna i najjednostavnija za proces proizvodnje biodizela. Na slici 2 je prikazana zastupljenost pojedinih sirovina za proizvodnju biodizela u postocima, u svjetskim razmjerima.

Osnova mogućnosti primjene svih izvora za proizvodnju biodizela jest da oni u nekom obliku sadrže mast. Ulja su samo masti koje su u tekućem stanju na sobnoj temperaturi. Ove masti su triacilgliceridi (često nazvani samo trigliceridi) koji se sastoje od atoma ugljika, vodika i kisika spojeni zajedno i raspoređeni u specifičan oblik. Sjemenke soje sadrže oko 20 % ulja, uljana repica koja je glavni izvor biodizela u Europi sadrži 49 % ulja.

U nastavku je predstavljen dio rezultata rada autora u oblasti primjene biodizela kao goriva za teške motore s unutarnjim izgaranjem koje se pretežno susreću u brojnim gradskim autobusima. Predstavljena je emisija reguliranih tvari iz ispušnih plinova pri primjeni dizelskog i biodizelskog goriva.

2. Zakonska ograničenja emisije onečišćujućih tvari i ispitni ciklusi

Regulative za emisije štetnih tvari za teška dizelova vozila uvedene su prvi puta direktivom 88/77/EEC, s kasnijim brojnim dopunama. U 2005. godini ova je direktiva dorađena i potvrđena direktivom 2005/55/EC. Ovi standardi se odnose na teške kamione i gradske autobuse. Direktivom su obuhvaćena sva motorna vozila čija ukupna masa prelazi 3500 kg. U tablici 1 dat je pregled normi emisije s datumima njihove implementacije.

Tablica 1: Europske norme emisije teških teretnih vozila s dizelovim motorom, [g/kWh] (dim [m⁻¹]) [3,4,5]

norma	datum i kategorija	test ciklus	CO	HC	NO _x	čestice (PM)	DIM
Euro I	1992, <85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612	
	1992, >85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36	
Euro II	1996. 10		4,0	1,1	7,0	0,25	
	1998. 10		4,0	1,1	7,0	0,15	
Euro III	1999. 10 EEV samo	ESC i ELR	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15
	2000. 10	ESC i ELR	2,1	0,66	5,0	0,10 0,13*	0,8
Euro IV	2005. 10		1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro V	2008. 10		1,5	0,46	2,0	0,02	0,5

* za motore s radnom zapreminom manjom od 0,75 dm³ po cilindru i n_{nom}>3000 min⁻¹
EEV (Extra low emission vehicles) - vozila s izrazito malom emisijom

Norme emisije za teška vozila s dizelovim ili plinskim motorima koji se ispituju prema ETC test ciklusu, sumirani su u tablici 2.

Tablica 2: Norme emisije za dizelove i plinske motore, ETC ciklus, [g/kWh] [3, 4, 5]

norma	datum i kategorija	test ciklus	CO	NMHC nemetanski ugjikovodici	CH ₄ ^A	NO _x	čestice (PM) ^B
Euro III	1999.10, EEV samo	ETC	3,0	0,4	0,65	2,0	0,02
	2000.10	ETC	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16 0,21 ^C
Euro IV	2005.10		4,0	0,55	1,1	3,5	0,03
Euro V	2008.10		4,0	0,55	1,1	2,0	0,03

A - samo za plinske motore
 B - nije primjenjivo za plinske motore za godine 2000. i 2005.
 C - za motore s radnom zapreminom manjom od 0.75 dm³ po cilindru i $n_{nom} > 3000 \text{ min}^{-1}$

Promjene u ispitnim ciklusima motora su uvedene s Euro III normom, čime je raniji stacionarni ispitni ciklus ECE R-49 zamijenjen s dva nova ciklusa: stacionarnim ciklusom ESC (European Stationary Cycle) i ELR (European Load Response) testom. Dimna vrijednost se mjeri ELR ciklusom. Prilikom certifikacije novog tipa vozila moraju se primijeniti sljedeći zahtjevi u pogledu test ciklusa:

- Konvencionalni dizelovi motori mogu se ispitati preko ESC ili ELR ciklusa.
- Dizelovi motori s naknadnim tretmanom ispušnih plinova ispituju se putem dva ispitna ciklusa: ESC ili ELR i ETC ciklusom.
- Plinski motori se ispituju putem ETC ciklusa.

U nastavku će biti objašnjen ESC ispitni ciklus zbog toga što su sva ispitivanja u ovom radu obavljena na tzv. konvencionalnom dizelovom motoru.

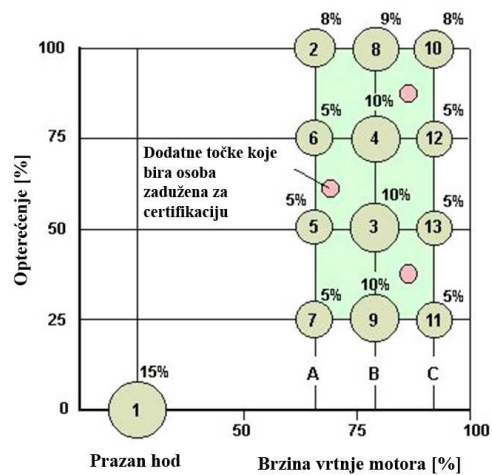
Koncentracija štetnih tvari koja se mjeri kod ispušnih plinova motora uključuje plinovite komponente (CO, HC, NO_x) i čestice. Mjerenja se obavljaju kontinuirano uzimajući uzorke iz sirovih ispušnih plinova. Ispitni ciklus se sastoji od određenog broja radnih režima karakterističnih po točno određenoj brzini okretaja, opterećenju i vremenu zadržavanja u propisanom režimu rada. Radni režimi pokrivaju tipično radno područje motora s unutarnjim izgaranjem namijenjenog za uporabu u teškim teretnim vozilima i autobusima. Tokom zadržavanja motora SUI u svakom radnom režimu, mjere se koncentracije predviđenih komponenti u ispušnim plinovima, protok ispušnih plinova i efektivna snaga, odnosno efektivni moment motora SUI.

ESC ciklus uveden je zajedno sa ETC i ELR ispitnim ciklusima za certifikaciju emisije dizelovih motora koji je na snazi od 2000. godine. Zamijenio je prethodni R49 ispitni ciklus. To je 13-modni stacionarni test kojim se određuje emisija štetnih tvari iz ispuha motora i uspoređuje s dopuštenim.

Motor SUI se montira na probni stol, te pomoću kočnice za ispitivanje motora dovodi u određene radne režime, pri čemu se na svakom pojedinom zadržava točno određeno vrijeme. Promjena brzine vrtnje i opterećenja pri prelazu s jednog radnog režima na drugi treba obaviti u roku od 20 sekundi. Brzina vrtnje i moment motora SUI se moraju držati konstantnim s tolerancijom od $\pm 50 \text{ min}^{-1}$, odnosno $\pm 2 \%$ od maksimalnog momenta u trenutačnom modu. U tablici 3 prikazana su vremena zadržavanja u pojedinim modovima, zahtijevane brzine vrtnje, kao i propisana opterećenja motora. Na slici 3 ilustrirani su težinski faktori pojedinih modova, koji u stvari predstavljaju postotne udjele emisija onečišćujućih tvari iz pojedinih modova u konačnoj, proračunatoj srednjoj vrijednosti emisije zagađujućih tvari iz ispuha motora SUI za čitav ispitni ciklus [3, 4, 5].

Tablica: 3 Karakteristike pojedinih modova ESC ciklusa [3, 4, 5]

Mod	Brzina vrtnje	Opterećenje [%]	Težinski faktor [%]	Trajanje [min]	Mod	Brzina vrtnje	Opterećenje [%]	Težinski faktor [%]	Trajanje [min]
1	Idle	0	15	4	8	B	100	9	2
2	A	100	8	2	9	B	25	10	2
3	B	50	10	2	10	C	100	8	2
4	B	75	10	2	11	C	25	5	2
5	A	50	5	2	12	C	75	5	2
6	A	75	5	2	13	C	50	5	2
7	A	25	5	2					



Slika 3: ESC ciklus s prikazanim karakterističnim modovima [3,4,5]

Emisija se mjeri tokom svakog moda, a zatim se na točno definiran način [3, 4, 5] dobiva srednja vrijednost. Rezultati se izražavaju u [g/kWh] i kao takvi su usporedivi s propisanim vrijednostima.

Sva istraživanja i mjerenja provedena u ovom radu odnose se na srednje brzohodni, vodom hlađeni dizelov motor s M postupkom ubrizgavanja, marke MAN tip D2566MUM. Izbor motora marke MAN tip D 2566 MUM za ispitivanje temelji se na činjenici da se on u najvećem broju slučajeva primjenjuje kao pogonski agregat u gradskim i prigradskim autobusima, te samim tim ima značajni udjel u potrošnji goriva i ukupnoj emisiji zagađujućih tvari u urbanim sredinama. U tablici 4 dati su osnovni podaci o motoru, dok su u tablici 5 osnovni podaci o korištenim gorivima [7].

Tablica 4: Osnovni podaci ispitivanog motora

Vrsta motora	6-cilindrični-redni-ležeći-usisni-dizelov motor
Radna zapremina	11,413 dm ³
Promjer klipa	125 mm
Hod klipa	155 mm
Dužina klipnjače	244 mm
Nazivna snaga motora pri brzini vrtnje	160 kW/2200 min ⁻¹
Najveći moment pri brzini vrtnje	775 Nm/1400 min ⁻¹
Stupanj kompresije	18:1

Tablica 5: Osnovne fizikalno kemijske osobine biodizelskog i dizelskog goriva

	Dizel	Biodizel
Gustoća pri 15 °C [kg/m ³]	845	865
Viskoznost pri 40°C [mm ² /s]	2,5	4,3
Ogrijevna vrijednost [MJ/kg]	42,6	37,3
Cetanski broj	46	> 49

Ispitivanja su izvršena u skladu s odredbama ESC ispitnog ciklusa za dva različita statička kuta predubrizgavanja goriva, 21°KV i 23°KV prije GMT, a razlog je što je na temelju prethodnih ispitivanja [6] na istom motoru ustanovljeno da je optimalni režim rada motora s bio-dizelskim gorivom s aspekta emisije ispušnih plinova, ostvarene snage i specifične potrošnje goriva, upravo kut od 21°KV prije GMT. Prema podacima proizvođača motora pri korištenju klasičnog dizelskog goriva optimalni kut predubrizgavanja goriva je 23°KV prije GMT.

Rezultati provedenih ispitivanja sumirani su u tablici 6 gdje se dane vrijednosti reguliranih onečišćujućih tvari kao što su CO, HC i NO_x, za dva različita kuta predubrizgavanja goriva i za dva različita goriva. Očito je da su dobivene vrijednosti za CO i NO_x veće od graničnih vrijednosti navedenih u tablicama 1 i 2, dok se vrijednost emisije HC nalazi u dopuštenim granicama. Razlog tome je u ispitivanom

motoru koji je znatno starije konstrukcije u odnosu na vrijeme kada su propisane granične vrijednosti koje su navedene u tablicama.

Tablica 6: Vrijednosti emisije dobivene po ESC ciklusu [g/kWh]

Kut predubrivanja goriva		CO	HC	NO _x
dizel	21 °KV	2,22	0,2	9,83
	23 °KV	2,36	0,191	8,73
biodizel	21 °KV	2,04	0,186	12,97
	23 °KV	2,177	0,16	15,728

Opravdanost razmatranja ovakvog motora SUI se nalazi u činjenici da se i danas vrlo često primjenjuje kao pogonski agregat u gradskim autobusima. Ako se još tome pridoda da osnovni cilj ovog ispitivanja nije bilo svrstavanje, odnosno kategoriziranje motora SUI u jednu emisijsku grupu, već analiziranje prednosti odnosno nedostataka primjene biogoriva s aspekta regulirane emisije štetnih tvari kod ispušnih plinova, može se reći da ono ima svoje opravdanje.

Rezultati prikazani u tablici 6 jednoznačno ukazuju na to da su vrijednosti emisije ugljičnog monoksida CO pri korištenju biodizela niže za oko 8 %, neizgorjelih ugljikovodika HC za 7-17 %, dok je emisija dušikovih oksida NO_x viša kod primjene biodizelskog nego kod dizelskog goriva i to za 25-45 %. Razlog zbog čega dolazi do ovakvih odnosa emisije pojedinih komponenti u ispušnim plinovima pri korištenju ispitivana dva goriva može se naći u samom mehanizmu njihovog nastanka. Naime, glavni razlog stvaranja CO je nepotpuno izgaranje goriva, tj. nedovoljno miješanje smjese zraka i goriva, te pomanjkanja kisika u zoni reakcije. Budući da molekule biodizela imaju kemijski vezan kisik, izgaranje je potpunije što objašnjava manju vrijednost emisije CO i HC u odnosu na korištenje dizelskog goriva [7].

S druge strane, upravo zbog kisika sadržanog u biodizelskom gorivu, te zbog dužeg zadržavanja reagenasa u zoni reakcije pri povećanju kuta predubrivanja goriva, emisija dušikovih oksida NO_x pri primjeni biodizelskog goriva se povećava i u odnosu na kut predubrivanja i u odnosu na dizelsko gorivo.

3. Zaključak

U radu su prikazani rezultati ispitivanja dizelovog motora SUI pri korištenju goriva iz obnovljivog izvora energije uz dva različita statička kuta predubrivanja goriva, temeljem kojih se moglo potvrditi mišljenje i teorijska analiza mnogih autora da biogoriva posjeduju potencijal smanjenja regulirane emisije onečišćujućih tvari iz ispuha motora. Mjerenja i proračun su potvrdili da je pri korištenju biodizelskog goriva emisija CO i HC u odnosu na korištenje dizelskog goriva manja, dok je emisija NO_x nešto veća.

Različite fizikalno kemijske osobine razmatranih goriva uvjetuju da razlike u emisijama postanu još izraženije pri smanjivanju statičkog kuta predubrizgavanja, u korist biodizelskog goriva, a prije svega zbog značajnih razlika u vrijednostima viskoznosti i cetanskog broja.

Primjena alternativnih goriva nije više čin pojedinca i njegovog opredjeljenja za uštede ili svijesti o očuvanju životnog okoliša, već globalna politika i zakonska odrednica. Zbog toga se očekuje vrlo intenzivan rast zanimanja za istraživanje i primjenu alternativnih goriva u motorima SUI, posebno onih iz obnovljivih izvora energije kao što je to biodizelsko gorivo.

Literatura

- [1] Workshop: Benefits of Grain Legumes for European Agriculture and Environment, Reduced production costs for feed and bio-energy Uses, Brussels, Belgium, Maj 2006.
- [2] Final draft Report of the Biofuels Research Advisory Council, Biofuels in the European Union – a Vision for 2030 and Beyond, 2006
- [3] ECE R49 - Uniform provisions Concerning the Approval of Compression Ignition (C.I.) and Natural Gas (NG) Engines as well as Positive-Ignition (P.I.) Engines Fuelled with Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Vehicles Equipped with C.I. and NG Engines and P.I. Engines Fuelled with LPG, with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine, Am. 1, 2002
- [4] ECE R49 - Uniform provisions Concerning the Approval of Compression Ignition (C.I.) and Natural Gas (NG) Engines as well as Positive-Ignition (P.I.) Engines Fuelled with Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Vehicles Equipped with C.I. and NG Engines and P.I. Engines Fuelled with LPG, with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine, Am. 2, 2003
- [5] ECE R49 - Uniform provisions Concerning the Approval of Compression Ignition (C.I.) and Natural Gas (NG) Engines as well as Positive-Ignition (P.I.) Engines Fuelled with Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Vehicles Equipped with C.I. and NG Engines and P.I. Engines Fuelled with LPG, with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine, rev.3 2000
- [6] Kegl B., *Nastavitev motorja MAN D2566MUM pri uporabi biodizelskega goriva, Poročilo za LPP Ljubljana*, Fakulteta za strojništvo Maribor; MOBILIS, CIVITAS II, 6. Evropski Okvirni Program, 2005
- [7] Bibić Dž., *Karakteristike sagorijevanja bio dizela i njegovih mješavina sa fosilnim gorivima u dizel motorima*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Sarajevo, 2007

UDK	ključne riječi	key words
621.436-634	biodizelsko gorivo	biodiesel fuel
621.436.068.3	ispušna emisija dizelovog motora	diesel engine exhaust emission
621.436.038	kut zadržanog ubrizgavanja dizelovog motora	diesel engine injection delay angle

Autori

doc. dr. sc. Dževad Bibić, prof. dr. sc. Ivan Filipović, doc. dr. sc. Boran Pikula
 Mašinski fakultet Sarajevo, Odsjek za motore i vozila, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo,
 Bosna i Hercegovina, e-mail: bibic@mef.unsa.ba,
 izr. prof. dr. sc. Breda Kegl, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor

Primljeno

18.9.2008.

Prihvaćeno

25.2.2009.