

Eksperimentalno istraživanje ekoloških pokazatelja i procesa sagorevanja dizel motora za slučaj primene biodizela i bioetanola

Željko Đurić¹, Vladimir Vukašinović², Dušan Gordić², Ivan Grujić², Nadica Stojanović²

¹ Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, V. Stepe Stepanovic 71, 78000 Banja Luka, BiH

² University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Sestre Janjic 6, 34000, Kragujevac, Serbia

Rezime - Biogoriva imaju sve veći značaj, jer ne utiču na bilans ugljen-dioksida (CO₂). Biodizel i bioethanol se smatraju gorivima budućnosti zbog pozitivnih efekata njihove primene sa ekološkog aspekta. U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja ekoloških pokazatelja i procesa sagorevanja dizel motora za slučaj primene biodizela i bioetanola kao alternativnih goriva. Cilj istraživanja je poređenje koncentracija štetnih gasovitih produkata sagorevanja u emisiji izduvnih gasova dizel motora, za slučaj primene konvencionalnog dizel goriva, biodizela ili bioetanola. Za potrebe istraživanja korišćen je modifikovan eksperimentalni dizel motor, kako bi se u istom motoru mogli realizovati dizel i oto ciklus. Tokom sagorevanja dizel goriva ili biodizela motor radi po dizel ciklusu, a tokom sagorevanja bioetanola motor radi po oto ciklusu. U radu su prikazani rezultati za 75% i 100 % opterećenja. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se pun potencijal biodizela i bioetanola, u pogledu smanjenja štetne emisije gasovitih produkata sagorevanja, ne može iskoristiti ako se ova biogoriva koriste kao čista goriva, već ih je bolje koristiti kao aditive za konvencionalna goriva.

Ključne reči - biogoriva, biodizel, bioethanol, ekološke karakteristike, sagorevanje

I UVOD

Strateška tema auto i naftne industrije je stalno usklađivanje osobina vozila, motora i goriva. Nekoliko prioriteta u oblasti goriva se smatra posebno značajnim, a to je:

- poboljšanje kvaliteta svih konvencionalnih goriva,
- smanjenje potrošnje goriva kod oto i dizel motora,
- razvoj perspektivnih alternativnih goriva do nivoa da oni postanu zamena za konvencionalna goriva.

Da bi alternativno motorno gorivo bilo prihvaćeno kao komercijalno, neophodno je da zadovolji nekoliko osnovnih kriterijuma:

- da su poznate i procenjene rezerve izvora (sirovine) za dobijanje goriva zadovoljavajuće, te relativno lake i dostupne za eksploataciju,
- da je postupak prerade goriva relativno jednostavan i jeftin,
- da je gorivo pogodno za distribuciju, manipulaciju i da je postojano pri skladištenju,
- da ima mali negativan uticaj na životnu sredinu u toku proizvodnje i upotrebe na vozilu,

- da primena alternativnog goriva ne smanjuje pouzdanost pojedinih sistema i motora kao celine, niti da smanjuje radni vek motora,
- da je alternativno gorivo kompatibilno sa motornim uljem,
- da je cena goriva povoljna itd.

Kriterijum, koji se sve češće može naći među napred pobrojanim, je da alternativno gorivo potiče iz obnovljivog izvora.

Danas se uglavnom govori o dve grupe alternativnih goriva i to:

- alternativna goriva fosilnog porekla i
- alternativna goriva dobijena iz biomase (biogoriva).

Direktivom Evropskog parlamenta 2009/28/EZ, propisano je da je svaka država članica Evropske unije obavezna pobrinuti se za to da udeo energije iz obnovljivih izvora u svim vidovima transporta 2020. godine iznosi najmanje 10 % krajnje potrošnje energije u transportnom sektoru, [1]. Udeo energije iz obnovljivih izvora u transportnom sektoru u Evropskoj uniji iznosio je u 2022. godini 9,6 %, [2].

Za razliku od goriva fosilnog porekla (konvencionalnih i alternativnih), biogoriva se proizvode od postojećeg biološkog materijala i spadaju u obnovljive izvore energije. Biogoriva se danas smatraju perspektivnim alternativnim gorivima, i obično se namešavaju sa konvencionalnim gorivima i tako koriste za pogon motora SUS. Njihovom primenom postiže se manja zavisnost od sirove nafte i veća energetska sigurnost. U zavisnosti od načina primene, moguće je ostvariti i povoljnije ekološke pokazatelje u odnosu na slučaj kada se primenjuju čista konvencionalna goriva, pogotovo u pogledu koncentracije nekih od komponenti u sirovoj emisiji izduvnih gasova. Da bi se ostvarili postavljeni ekološki ciljevi u drumskom transportu u EU, računa se i na sintetička goriva dobijena iz obnovljivih izvora, [3].

Drugi mogući pravac, u pogledu alternative konvencionalnom pogonu, je elektrifikacija drumskog transporta i to u vidu primene hibridno-električnog i/ili električnog pogona, bilo u varijanti električnih vozila pogonjenih gorivim ćelijama ili vozila sa mrežnim punjenjem baterija. Pri tome, kada se govori o električnim vozilima sa mrežnim punjenjem baterija, uvek treba imati u vidu da se pun potencijal ovog pogona, sa ekološkog aspekta, može ostvariti samo ako se električna energija dobija iz obnovljivih izvora, [4].

II BIODIZEL I BIOETANOL KAO POGONSKA GORIVA

Emisija izduvnih gasova motornih vozila danas je veoma aktuelna problematika, koja značajno utiče na pravce daljeg

razvoja motora SUS i usavršavanja konvencionalnih motornih goriva i maziva. Mnogobrojnim studijama i izveštajima instituta i drugih organizacija, na evropskom i svjetskom nivou, potvrđen je negativan uticaj upotrebe goriva fosilnog porekla na životnu sredinu i zdravlje ljudi. S obzirom da su konvencionalna goriva za pogon motornih vozila ugljovodonična goriva, pri njihovom sagorevanju u realnim uslovima, pored ugljen-dioksida (CO_2) i vode (H_2O), nastaju i produkti nepotpunog sagorevanja, kao što su ugljen-monoksid (CO), nesagoreli ugljovodonici (HC), azotovi oksidi (NO_x), čestice, te razni policiklični aromatski ugljovodonici (engl. *polycyclic aromatic hydrocarbons* - PAH) i ostale isparljive organske komponente (engl. *volatile organic compound* - VOC).

Emisija CO_2 po jedinici hemijske energije za različita goriva ili izvore energije data je u tabeli 1.

Tabela 1. Emisija CO_2 po jedinici hemijske energije za različita goriva ili izvore energije, [5]

Vrsta goriva/Izvor energije	Količina CO_2 [$\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{MJ}$]
Motorni benzin	93
Dizel gorivo	99
Prirodni gas	74
Tečni naftni gas	86
Etanol ¹	34-73
Biodizel	45-73
Vodonik ²	100-200
Električna energija ³	90-160
¹ zavisi od sirovine od koje potiče biomasa i primenjenog procesa proizvodnje	
² dobijen parnim reformingom prirodnog gasa (niže vrednosti) ili elektrolizom (više vrednosti)	
³ zavisi od načina dobijanja električne energije	

Biogoriva se dobijaju iz biomase. Poslednjih nekoliko godina govori se o dve generacije biogoriva i to [6,7]: tradicionalna biogoriva (biogoriva prve generacije) i nova generacija biogoriva.

Propisivanjem graničnih vrednosti za globalnu emisiju gasova sa efektom staklene bašte biogoriva imaju sve veći značaj, jer ne utiču na bilans CO_2 , pa se količine nastale njihovim sagorevanjem izuzimaju iz dogovorenih kvota.

Bioetanol i biodizel (esteri masnih kiselina) već imaju komercijalnu primenu. Koriste se u standardizovanim mešavinama sa konvencionalnim gorivima, a mogu se koristiti i kao čiste komponente. Proizvodne tehnologije za dobijanje biogoriva su razvijene, međutim, ograničenost sirovinskih resursa i visoka cena su faktori koji sprečavaju njihovu masovnu upotrebu.

II-1 Biodizel

Karakteristike biodizela, koji se kao motorno gorivo može koristiti u dizel motorima, precizno su definisane standardom EN14214. Ako proizvedeni biodizel ima karakteristike propisane standardom EN14214, onda je ono veoma blisko po osobinama dizel gorivu fosilnog porekla i predstavlja veoma kvalitetno gorivo za dizel motore. U svetu su aktuelna i istraživanja opravdanosti primene biodizela za proizvodnju vodonika koji bi

se koristio u gorivima ćelijama za pogon motornih vozila. Analiza efikasnosti transformacije energije biodizel-vodonik-električna energija-mehanička energija data je u [8], gde je urađena i procena troškova proizvodnje kWh električne energije iz biodizela i uporedna analiza sa vozilom koje je pogonjeno dizel motorom i elektromotorom napajanim iz baterija.

Iako je po svojim karakteristikama vrlo sličan dizel gorivu fosilnog porekla, biodizel ima sledeće specifičnosti [6]:

- biodizel je obnovljivo, neotrovno i biorazgradivo gorivo, koje ima skoro dvostruko veće vrednosti biorazgradivosti u vodi i zemlji u odnosu na dizel gorivo fosilnog porekla,
- biodizel ne sadrži sumpor ili se sumpor pojavljuje u zanemarljivo malim količinama (0-0,0024 ppm), a ni aromatske ugljovodonike, pa se oni ne pojavljuju u emisiji izduvnih gasova,
- u odnosu na dizel gorivo fosilnog porekla, pogotovo ona sa niskim sadržajem sumpora, biodizel ima dobra maziva svojstva,
- starenjem biodizela i njegovom oksidacijom može da nastane veliki broj kiselina i da poraste viskozitet, a mogu se formirati i aglomerati i sedimenti koji začepljuju filter, brizgaljke i druge elemente sistema za napajanje gorivom.
- higroskopian je, pa pri skladištenju biodizela treba preduzeti dodatne mere za zaštitu od vlage.

Biodizel se obično koristi u smeši sa konvencionalnim dizel gorivom. Ukoliko procentualni udeo biodizela u smeši iznosi do 7 % (v/v), to predstavlja aditiviranje dizel goriva.

Efekti primene biodizela u pogledu izduvne emisije motora zavise od više faktora i to: od sirovina iz kojih je dobijen biodizel, procentualnog učešća biodizela u smeši, konstrukcionih karakteristika motora i režima rada motora.

U [9] je ispitivan uticaj primene biodizela, dobijenog iz različitih sirovina, čistog i u smeši sa dizel gorivom, na proces sagorevanja, radne karakteristike i emisiju izduvnih gasova motora (četvorotaktni dizel motor sa vazдушnim hlađenjem i direktnim ubrizgavanjem goriva (DMB - LDA 450)). Za slučaj primene čistog biodizela, u odnosu na slučaj primene čistog dizel goriva, pri broju obrtaja 1600 o/min i opterećenja od 50%, 75% i 100% pokazalo se da je koncentracija NO_x veća, emisija čestica i CO manja, a emisija HC ima promenljiv karakter zavisno od vrste goriva/smeše i radnog režima i nema određen trend.

Karakteristike sagorevanja i ekološke karakteristike atmosferskog dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem, pogonjenog različitim mešavinama biodizela i dizel goriva (B0, B30, B50, B80 i B100), ispitivane su u [10]. Sa aspekta koncentracije štetnih produkata sagorevanja ustanovljeno je da:

- koncentracija CO za slučaj primene čistog biodizela ili mešavina biodizela i dizel goriva, na malim i srednjim opterećenjima, veoma je bliska koncentraciji CO za slučaj primene čistog dizel goriva. Razlika u koncentraciji CO izražena je na visokim opterećenjima i veća je za čisto dizel gorivo,
- koncentracija HC nema određen trend promene sa povećanjem koncentracije biodizela u dizel gorivu, a apsolutne vrednosti koncentracije HC su male,
- koncentracija NO_x neznatno je veća za slučaj primene

biodizela ili mešavina u odnosu na slučaj primene čistog dizel goriva, ali maksimalna razlika nije veća od 100 ppm,

- koncentracija čestica je neznatno veća na malim i srednjim opterećenjima za slučaj primene biodizela ili mešavina nego za slučaj primene čistog dizel goriva, a značajno je manja na visokim opterećenjima.

U [11] je ispitivana specifična efektivna potrošnja goriva i emisija izduvnih gasova za slučaj primene mešavina biodizela dobijenog od lanenog ulja i dizel goriva u dizel motoru (B0, B20, B30, B40 i B100). Koncentracija CO i HC je povoljnija za slučaj primene svake od mešavina nego za slučaj primene čistog dizel goriva. Koncentracija NO_x je približno ista, ali je ipak malo povoljnija za slučaj primene mešavina biodizela i dizel goriva nego za slučaj primene čistog dizel goriva. Koncentracija čestica je takođe povoljnija za slučaj primene mešavina nego za slučaj primene čistog dizel goriva. Istraživanja koja su rađena na dvotaktnom broskom motoru, za slučaj primene konvencionalnog dizel goriva i mešavina konvencionalnog dizel goriva i biodizela (B7, B20 i B25), pokazala su da se primenom mešavine postiže manja emisija CO, CO₂, NO_x i sumpordioksida (SO₂) u odnosu na slučaj kada se koristi konvencionalno dizel gorivo, [12]. U [13] su istraživani efikasnost i ekološke karakteristike jednocilindričnog, vazduhom hlađenog dizel motora za slučaj primene konvencionalnog dizel goriva, mešavina konvencionalnog dizel goriva i biodizela (B80 i B60) i mešavina konvencionalnog dizel goriva i ulja jatrophe (J10). Ustanovljeno je da se sa povećanjem količine biodizela u mešavini sa konvencionalnim dizel gorivom smanjuje koncentracija CO i HC, dok se koncentracija NO_x povećava. Primenom mešavina J10 postiže se manja koncentracija CO, HC, NO_x i čestica u odnosu na slučaj kada se primenjuje dizel gorivo, a razlika u koncentracijama se povećava sa povećanjem pritiska ubrizgavanja J10.

II-2 Bioetanol

Etanol (etil alkohol) je alkohol koji je moguće dobiti iz petrohemijskih sirovina (hemijskom sintezom) i iz biomase (fermentacijom). Etanol dobijen iz biomase spada u tečna biogoriva i poznat je pod nazivom bioetanol. Evropski komitet za standardizaciju normom EN 15376 propisuje karakteristike etanola kao motornog goriva.

Alkoholna goriva se smatraju perspektivnom delimičnom zamenom za konvencionalna motorna goriva, pogotovo za motorni benzin i to iz sledećih razloga [14]:

- imaju relativno dobru toplotnu moć i brzinu sagorevanja,
- imaju dobru otpornost prema detonantnom sagorevanju,
- pogodna su za distribuciju i manipulaciju,
- lako obrazuju smešu sa vazduhom,
- moguć rad sa siromašnijom smešom, što uz potpunije sagorevanje daje ekološki povoljniju emisiju izduvnih gasova i dobar stepen korisnosti energetske transformacije.

Etanol se može namešavati sa konvencionalnim gorivima u odgovarajućem procentu ili koristiti kao čisti etanol. Po svojim karakteristikama etanol je pogodniji za namešavanje sa bezolovnim motornim benzinom nego sa dizel gorivom. U mešavinama s benzinom upotrebljava se bezvodni etanol

minimalne čistoće od 99,5% do 99,8 %.

Primenom bioetanola u mešavini sa motornim benzinom može se postići povoljnija emisija izduvnih gasova, pre svega zbog potpunijeg sagorevanja prouzrokovanog sadržajem kiseonika u gorivu, [15].

Što se tiče primene bioetanola u dizel motorima, čist bioetanol, zbog niskog cetanskog broja, ne primenjuje se u konvencionalnim dizel motorima. Zbog toga, ako se bioetanol koristi u dizel motorima, koristi se u vidu mešavina dizel goriva i bioetanola. Dodavanjem bioetanola dizel gorivu dobija se mešavina koja u odnosu na primenjeno dizel gorivo ima, [15]:

- manji cetanski broj,
- manju toplotnu moć,
- manje aromatskih ugljovodonika,
- manju kinematsku viskoznost,
- izmenjenu karakteristiku destilacije.

Primenom bioetanola u mešavini sa dizel gorivom može se postići povoljnija emisija izduvnih gasova dizel motora, što se i pokazalo u [16], za dva različita koncepta mešanja bioetanola i dizel goriva. U nekim slučajevima izduvna emisija će biti slična ili čak nepovoljnija [17], što opet zavisi od koncentracije bioetanola u dizel gorivu, konstrukcionih karakteristika motora, režima rada motora itd. U [17] su ispitivani efikasnost i ekološke karakteristike dizel motora sa različitim mešavinama bioetanola i dizel goriva (E0, E10, E20, E30, E40), za različite stepene sabijanja ($\epsilon=17,5$; $\epsilon=18,5$ i $\epsilon=19,5$).

U [18] je ustanovljeno da se dodavanjem etanola dizel gorivu postiže manja koncentracija čestica, bez značajnije promene koncentracije NO_x, u odnosu na slučaj kada se primenjuje čisto dizel gorivo. Takođe se navodi da sa povećanjem koncentracije etanola u dizel gorivu, nastaje nepotpunije sagorevanje i povećava se koncentracija CO i HC, u odnosu na slučaj kada se primenjuje čisto dizel gorivo.

U više izvora se navodi da koncentracija etanola u smeši sa dizel gorivom ne bi trebalo da bude veća od 20%, kako bi se postigle maksimalne performanse motora, a da se pri tome postigne povoljnija emisija izduvnih gasova u odnosu na slučaj kada se primenjuje čisto dizel gorivo, [19,20].

III EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

Za potrebe ovog rada, ispitivanje ekoloških pokazatelja i procesa sagorevanja rađeno je na jednocilindričnom eksperimentalnom multiprocesnom motoru LDA450, čije su karakteristike date u tabeli 2. Na slici 1. prikazan je uređaj za ispitivanje izduvne emisije AVL DiCom 4000 kojim je merena koncentracija štetnih gasovitih produkata sagorevanja.

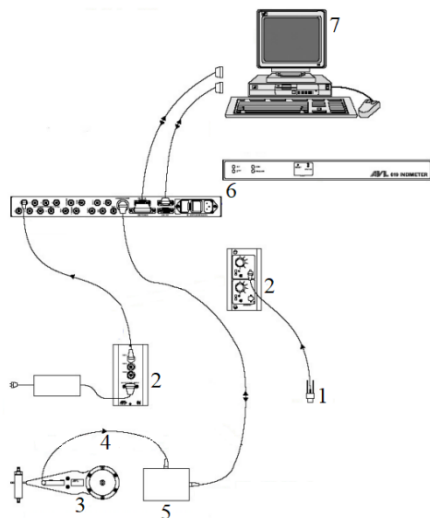
Tabela 2. Karakteristike eksperimentalnog multiprocesnog motora LDA450

Tip	Dizel motor
Prečnik klipa/hod klipa	85/80 mm
Dužina klipnjače	145 mm
Stepen komresije	12,5:1
Maksimalni broj obrtaja	3000 o/min
Maksimalna snaga	10.4 kW



Slika 1. Uređaj za merenje emisije AVL DiCom 4000

Za indiciranje pritiska u cilindru korišćen je merni lanac prikazan na slici 2. Merni lanac se sastoji od analognog i digitalnog dela. Analogni deo sadrži piezoelektrični davač pritiska i pojačavač za kondicioniranje signala. Digitalni deo se sastoji od optičkog markera ugla kolenastog vratila i položaja SMT, optičkog prenosnika kao i multiplikatora signala.



1 - davač pritiska AVL QC32D, 2 - pojačavač signala KISTLER 5007, 3 - marker ugla, 4 - optički prenosnik, 5 - multiplikator signala AVL 365CC, 6 - sistem za akviziciju AVL Indimeter 619, 7 - računar sa softverom za akviziciju

Slika 2. Merni lanac za merenje pritiska u cilindru

IV EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Koncepcijske razlike između konvencionalnog oto i dizel motora uslovljene su osobinama korišćenih goriva. Jedan od mogućih pravaca usavršavanja motora SUS, u pogledu povećanja efikasnosti režima rada sa niskim stepenom iskorišćenja i smanjenja koncentracije toksičnih komponenti u sirovoj emisiji, je kombinovanje oto i dizel radnih procesa. Dizel motori imaju prednosti u pogledu:

- termodinamičkog stepena iskorišćenja (viši stepen kompresije i povoljniji sastav radne materije (viši eksponents politrope)),
- gubitaka na izmenu radne materije (pumpni gubici),
- gubitaka zbog nepotpunog sagorevanja,
- gubitaka usled disocijacije produkata sagorevanja.

Prednosti oto motora su:

- manji mehanički gubici,
- manji gubici usled konačne brzine sagorevanja,
- optimalan položaj težišta sagorevanja.

Dizel motori, na niskim i srednjim opterećenjima, imaju ekonomičniji rad od oto motora i nisku emisiju CO, HC i čestica. Ekonomičnost oto motora raste na višim i visokim opterećenjima, emisija čestica je zanemariva, a sastav sirove gasne izduvne emisije je pogodan za primenu katalitičkih tehnologija.

Kada se sagledaju prednosti realizovanja oto i dizel radnog ciklusa u motoru SUS i područja rada pri kojima prednosti jednog i drugog radnog ciklusa dolaze do izražaja, zanimljivo bi bilo sagledati mogućnosti realizovanja oba ciklusa u jednom motoru, multiprocesnom motoru.

Kod multiprocesnog motora, u istom cilindru, u zavisnosti od primenjenog goriva, mogu se realizovati oto ili dizel ciklus. Oto ili dizel ciklus mogu biti realizovani sa konvencionalnim gorivima ili nekim od alternativnih goriva. Alternativna goriva u multiprocesnom motoru mogu biti primenjena samostalno ili u mešavini sa konvencionalnim gorivima.

Rad dizel motora sa gorivima čija je cetanska vrednost veća od 52 moguć je i pri niskim stepenima sabijanja ($\epsilon = 12,1$), [21]. Poznato je da sa smanjenjem stepena sabijanja opada termodinamički stepen iskorišćenja motora, ali opada i sadržaj čestica u emisiji izduvnih gasova.

Istraživanjima u [22] i [23] ustanovljeno je da je za alkohole (metanol i etanol) optimalan stepen sabijanja $\epsilon = (12-13)$.

Ograničavajući faktor za primenu bioetanola u dizel motoru je visoka temperatura samopaljenja, odnosno niska cetanska vrednost goriva. Najmanju zahtevanu temperaturu samoupaljenja ima dizel gorivo, zatim alkoholi, benzin, metan..., [24]. Da bi bilo moguće u istom motoru koristiti dizel gorivo i bioetanol, na osnovnoj varijanti motora bilo je neophodno:

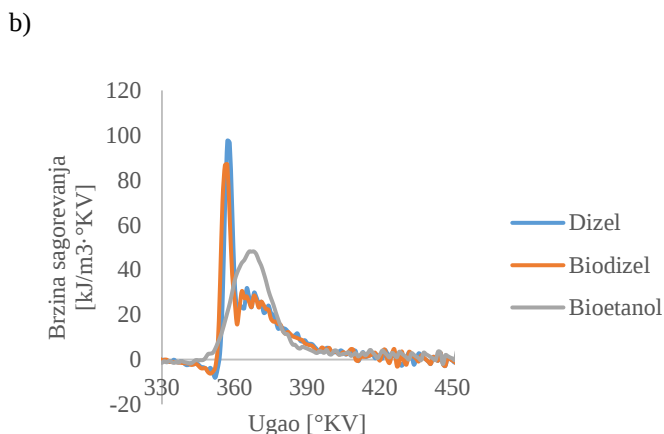
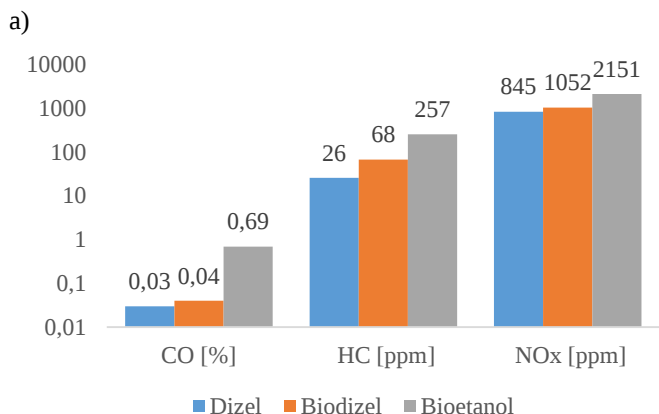
- ugraditi dodatni sistem za napajanje motora,
- ugraditi sistem za palenje smješe, te
- modifikovati prostor za sagorevanje, kako bi se korigovao (smanjio) stepen sabijanja na $\epsilon = 12,5$.

Dakle, cilj istraživanja je da se ustanovi da li multiprocesni motor ima potencijal u pogledu smanjenja koncentracije štetnih gasovitih produkata sagorevanja u sirovoj emisiji izduvnih gasova, ako bi se kao pogonska goriva koristili čist biodizel ili bioetanol. Osim toga, predmet istraživanja je i proces sagorevanja, odnosno diferencijalni zakon sagorevanja i njegov uticaj na produkciju nekih od štetnih gasovitih komponenti u sirovoj emisiji izduvnih gasova. Dobijeni rezultati su poređeni sa rezultatima dobijenim za slučaj primene čistog dizel goriva fosilnog porekla. Koncentracija čestica u emisiji izduvnih gasova nije bila predmet ovog istraživanja.

V REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Koncentracija štetnih produkata sagorevanja u emisiji izduvnih gasova motora usko je povezana sa parametrima procesa sagorevanja. Na slikama od 3 do 8 dati su rezultati eksperimentalnog istraživanja tj. prikaz koncentracije štetnih gasovitih produkata sagorevanja motora i diferencijalnog zakona sagorevanja. Diferencijalni zakon sagorevanja predstavljen je promenom brzine sagorevanja u funkciji položaja kolena kolenastog vratila (ugla kolenastog vratila). Rezultati, prikazani na slikama od 3 do 8, su dobijeni prema standardizovanom testu ispitivanja poznatom kao evropski stacionarni ciklus (engl. European Stationary Cycle - ESC), koji se primenjuje za ispitivanje dizel motora. Prikazani su rezultati za 75% i 100% opterećenja motora, koji odgovaraju efektivnom radu od $w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$ i $w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$ respektivno.

U cilju prikazivanja svih štetnih gasovitih komponenti procesa sagorevanja na jednom dijagramu, a uzimajući u obzir velike razlike u brojnim vrednostima između pojedinih komponenti, korišćena je logaritamska skala, a brojne vrednosti za svaku komponentu date su na samom dijagramu.

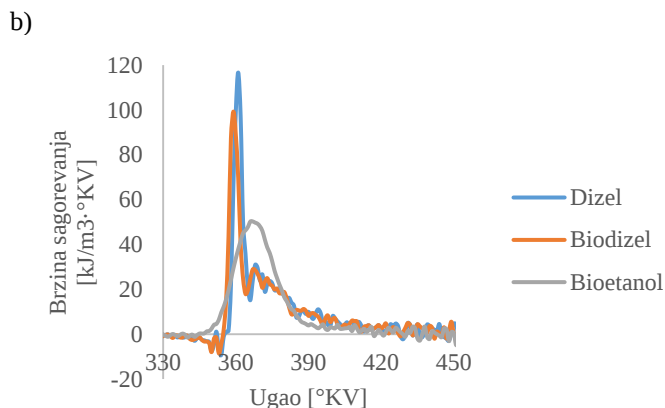
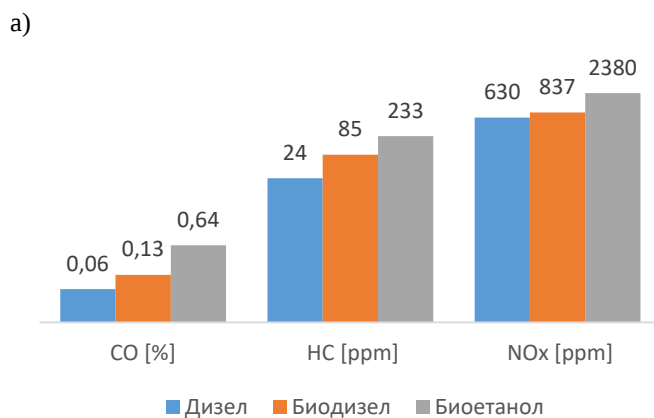


$n = 1960 \text{ o/min}$ - broj obrtaja motora
 $w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$ - jedinični efektivni rad (opterećenje motora 75%)
 $\lambda_D = 2,355$ - koeficijent količine vazduha za dizel gorivo
 $\lambda_{BD} = 2,091$ - koeficijent količine vazduha za biodizel
 $\lambda_{BE} = 0,889$ - koeficijent količine vazduha za bioetanol

Slika 3. (a) Štetni gasoviti produkti sagorevanja i (b) brzina sagorevanja za režim rada motora 1960 o/min i opterećenje 75%

Može se primetiti da je emisija štetnih gasovitih produkata sagorevanja (CO, HC, NO_x) najmanja za slučaj primene konvencionalnog dizel goriva, zatim za primenu biodizela i najveća za slučaj primene bioetanola. Analizirajući diferencijalni zakon sagorevanja, rezultati su krajnje logični, odnosno može se primetiti da je sagorevanje najintenzivnije za slučaj primene konvencionalnog dizel goriva. Intenzivno sagorevanje, ujedno znači i potpunije sagorevanje, što se ogleda u manjoj koncentraciji CO i HC.

Veća koncentracija NO_x povezana je sa višom temperaturom u cilindru u toku procesa sagorevanja, koja je posebno izražena za primene bioetanola zbog neophodnosti obogaćenja smeše za uspešan rad motora, a što se ocenjuje na osnovu koeficijenta količine vazduha λ , koji je za slučaj primene bioetanola uvek manji od 1, što je karakteristično za bogatu smešu motora.

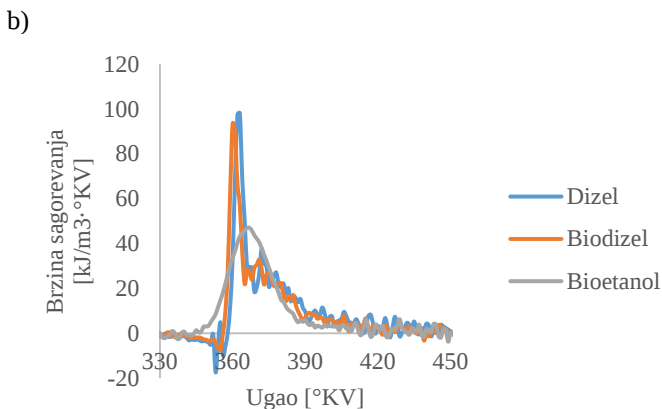
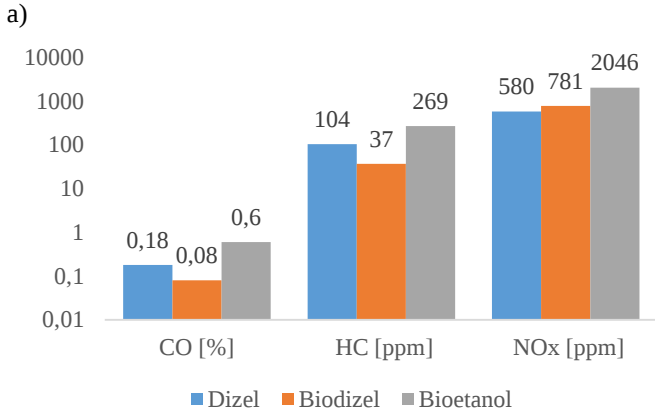


$n = 2320 \text{ o/min}$ - broj obrtaja motora
 $w_e = 0,42 \text{ kJ/dm}^3$ - jedinični efektivni rad (opterećenje motora 75%)
 $\lambda_D = 2,054$ - koeficijent količine vazduha za dizel gorivo
 $\lambda_{BD} = 1,860$ - koeficijent količine vazduha za biodizel
 $\lambda_{BE} = 0,910$ - koeficijent količine vazduha za bioetanol

Slika 4. (a) Štetni gasoviti produkti sagorevanja i (b) brzina sagorevanja za režim rada motora 2320 o/min i opterećenje 75%

Sličan trend rezultata dobijen je i za 75% opterećenja za srednji broj obrtaja, slika 4. Treba napomenuti da bogata smeša, pored povećanja koncentracije NO_x, utiče i na povećanje koncentracije produkata nepotpunog sagorevanja, CO i HC, usled nedovoljne

količine vazduha za potpuno sagorevanje. Veća koncentracija NO_x kod primene biodizela, vezuje se za količinu kiseonika koja se nalazi u gorivu, koja učestvuje u formiranju NO_x . Nešto drugačiji rezultati dobijaju se za slučaj maksimalnog broja obrtaja motora. Tačnije, za slučaj najvećeg broja obrtaja motora, dolazi do smanjenja koncentracije produkata nepotpunog sagorevanja, CO i HC, i to za slučaj primene biodizela, prikazano slikom 5.



$n = 2670$ o/min - broj obrtaja motora
 $w_e = 0,42$ kJ/dm³ - jedinični efektivni rad (opterećenje motora 75%)
 $\lambda_D = 1,909$ - koeficijent količine vazduha za dizel gorivo
 $\lambda_{BD} = 1,821$ - koeficijent količine vazduha za biodizel
 $\lambda_{BE} = 0,909$ - koeficijent količine vazduha za bioetanol

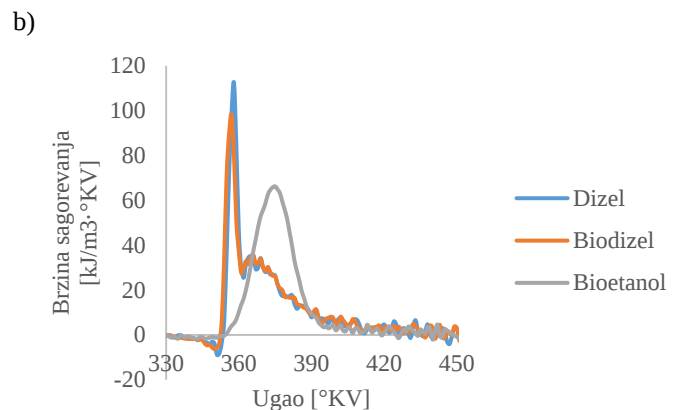
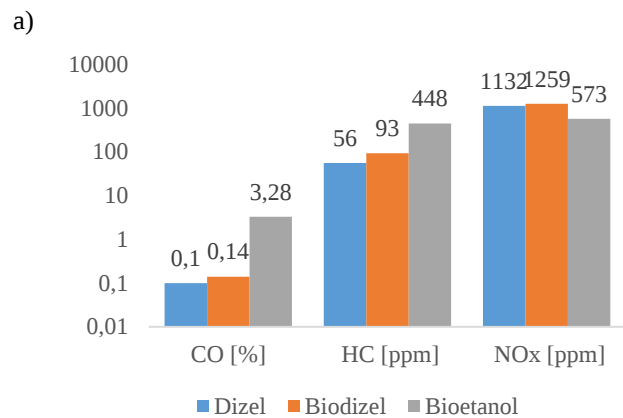
Slika 5. (a) Štetni gasoviti produkti sagorevanja i (b) brzina sagorevanja za režim rada motora 2670 o/min i opterećenje 75%

Razlog smanjenja koncentracije produkata nepotpunog sagorevanja, za slučaj primene biodizela je veoma jednostavan. Povećanje broja obrtaja motora uzrokuje intenziviranje turbulencija sveže smeše u cilindru motora, tokom takta sabijanja. Intenziviranje turbulencija, u cilindru motora, za sobom povlači bolje mešanje goriva i vazduha, kao i pobuđivanje procesa sagorevanja. Samim tim dolazi do potpunijeg sagorevanja, što kao pozitivnu posledicu ima smanjenje koncentracije CO i HC.

Nažalost, ovaj ambijent ne doprinosi smanjenju koncentracije NO_x , u odnosu na slučaj kada se primenjuje konvencionalno dizel gorivo. Razlog tome je što intenzivnije sagorevanje ujedno znači i veće temperature tokom procesa sagorevanja, koje sa većom koncentracijom kiseonika u samom gorivu pogoduju

nastanku NO_x .

Gotovo isti trend koncentracije štetnih gasovitih produkata sagorevanja kao i diferencijalni zakon sagorevanja, zabeležen je i za slučaj opterećenja od 100%, koji je dat slikama od 6 do 8.



$n = 1960$ o/min - broj obrtaja motora
 $w_e = 0,56$ kJ/dm³ - jedinični efektivni rad (opterećenje motora 100%)
 $\lambda_D = 1,797$ - koeficijent količine vazduha za dizel gorivo
 $\lambda_{BD} = 1,580$ - koeficijent količine vazduha za biodizel
 $\lambda_{BE} = 0,836$ - koeficijent količine vazduha za bioetanol

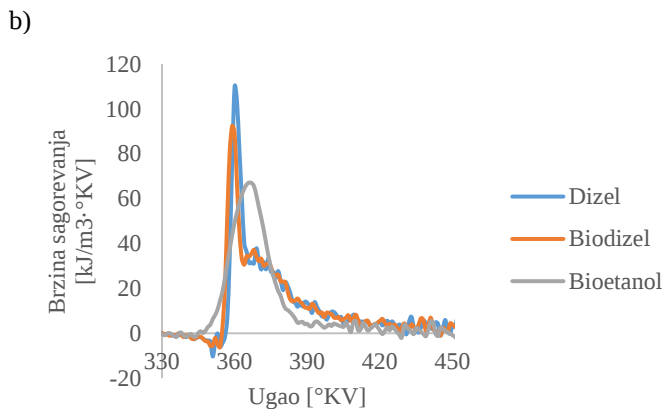
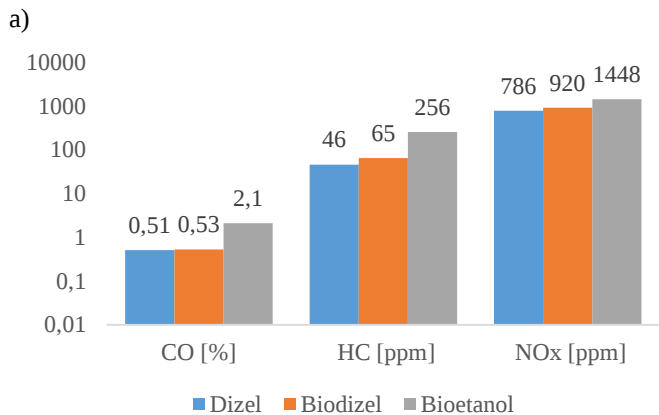
Slika 6. (a) Štetni gasoviti produkti sagorevanja i (b) brzina sagorevanja za režim rada motora 1960 o/min i opterećenje 100%

Naravno, sastav izduvne emisije ne može biti baš u potpunosti isti, iz razloga što radni ciklus motora predstavlja veoma složen fizičko-hemijski proces, čije odvijanje zavisi od mnogo parametara, kao što su:

- koeficijent količine vazduha,
- opterećenje motora,
- karakteristike goriva,
- broj obrtaja motora, itd.

Kao što se može videti, i za slučaj većeg opterećenja, biodizel i bioetanol daju lošije ekološke pokazatelje, u pogledu štetnih gasovitih produkata sagorevanja, u odnosu na konvencionalno dizel gorivo. Burnije sagorevanje, za slučaj konvencionalnog dizel goriva dovelo je do manje koncentracije produkata nepotpunog sagorevanja, CO i HC. Veća koncentracija kiseonika u biodizelu, doprinela je većjoj koncentraciji NO_x u odnosu na slučaj primene konvencionalnog dizel goriva.

Interesantna promena je smanjenje koncentracije NO_x , za slučaj primene bioetanola. Ova promena je takođe logična, uzimajući u obzir vrednost koeficijenta količine vazduha. Naime, bogata smeša ubrzava sagorevanje, što za sobom povlači veće temperature i formiranje veće količine NO_x . Međutim, ova tvrdnja je tačna do određenih granica obogaćenja smeše i takođe zavisi i o drugih uslova rada motora. Preveliko obogaćenje smeše dovodi do usporavanja procesa sagorevanja, te time i do smanjenja temperatura, pa samim tim i do smanjenja koncentracije NO_x . Isto tako, obogaćenje smeše doprinosi povećanju koncentracije HC, koji se mogu poistovetiti sa čistim gorivom koje nije sagorelo, a što je za ovaj slučaj i izuzetno izraženo, slika 6.



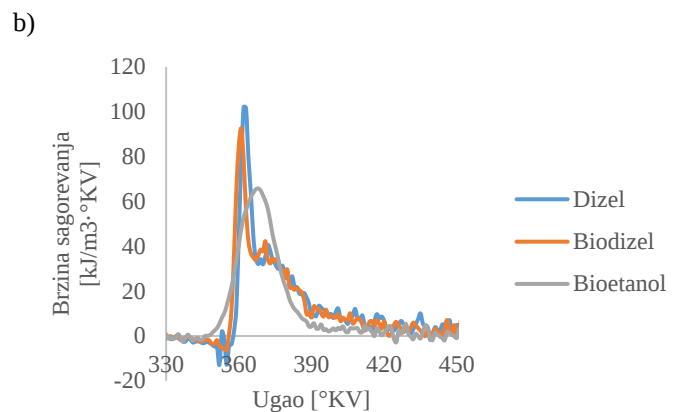
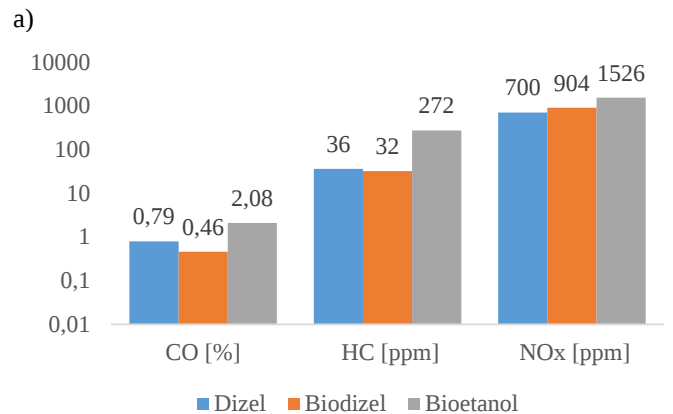
$n = 2320$ o/min - broj obrtaja motora
 $w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$ - jedinični efektivni rad (opterećenje motora 100%)
 $\lambda_D = 1,424$ - koeficijent količine vazduha za dizel gorivo
 $\lambda_{BD} = 1,332$ - koeficijent količine vazduha za biodizel
 $\lambda_{BE} = 0,861$ - koeficijent količine vazduha za bioetanol

Slika 7. (a) Štetni gasoviti produkti sagorevanja i (b) brzina sagorevanja za režim rada motora 2320 o/min i opterećenje 100%

Već nešto siromašnija smeša, rezultati sa slike 7, doprinosi smanjenju HC a povećanju NO_x , za slučaj primene bioetanola. Pored siromašnije smeše, značajnu ulogu igra i veći broj obrtaja motora, koji doprinosi povećanju turbulencija tokom takta sabijanja, što kasnije povećava intenzitet sagorevanja i obezbeđuje potpunije sagorevanje, a time i veće temperature, što se manifestuju na izduvnu emisiju motora.

Kao i za slučaj opterećenja od 75% i u slučaju opterećenja od

100%, uočava se da najveći broj obrtaja daje i najmanju količinu CO i HC, za slučaj biodizela, poredeći sa režimima sa nižim brojevima obrtaja, slika 8. Ovo dokazuje tvrdnju o intenziviranju procesa sagorevanja i njegov doprinos smanjenju gasovitih produkata nepotpunog sagorevanja.



$n = 2670$ o/min - broj obrtaja motora
 $w_e = 0,56 \text{ kJ/dm}^3$ - jedinični efektivni rad (opterećenje motora 100%)
 $\lambda_D = 1,345$ - koeficijent količine vazduha za dizel gorivo
 $\lambda_{BD} = 1,299$ - koeficijent količine vazduha za biodizel
 $\lambda_{BE} = 0,916$ - koeficijent količine vazduha za bioetanol

Slika 8. (a) Štetni gasoviti produkti sagorevanja i (b) brzina sagorevanja za režim rada motora 2670 o/min i opterećenje 100%

Rezultati dobijeni u radu pokazuju da je sa ekološkog aspekta, koji je u direktnoj vezi sa procesom sagorevanja, bolje primenjivati konvencionalno dizel gorivo. Međutim, treba uzeti u obzir da su eksperimentalna istraživanja izvršena za apsolutno čista goriva a ne mešavine. Biogoriva, kao što su biodizel gorivo i bioetanol, ipak imaju drugačije motorske karakteristike, poput upaljivosti, isparljivosti i sl., u odnosu na konvencionalno dizel gorivo. Ovo su osnovni razlozi zašto je ipak mnogo bolja varijanta koristiti ova goriva kao aditive, odnosno da se jedan deo dizel goriva zameni, i da se napravi mešavina konvencionalnog dizel goriva sa biogorivima. Na ovaj način se može iskoristiti pogodnost primene biogoriva, a to su smanjenje potrošnje fosilnog goriva a samim tim i ušteda energenata kao i smanjenje emisije štetnih gasova. Na ovaj način može se obezbediti stabilan i ekološki prihvatljiv rad motora u čitavoj radnoj oblasti. Po preporukama proizvođača iz automobilske

industrije, procenat biogoriva u konvencionalnom dizel gorivu, ne bi trebalo da prelazi 20%.

VIII ZAKLJUČAK

Veliki nedostatak konvencionalnih goriva, koja se koriste za pogon motornih vozila, predstavlja ekološko opterećenje okoline. Jedno od mogućih rešenja za prevazilaženje ovog nedostatka je primena alternativnih goriva, među kojima su, sa ekološkog aspekta, posebno zanimljiva biogoriva. Posebno perspektivnim biogorivima smatraju se biodizel i bioetanol, a efekti njihove primene u pogledu štetnih produkata sagorevanja zavise od sirovina iz kojih se proizvode, načina proizvodnje, ali i načina njihove primene. Istraživanja su pokazala da pozitivni efekti primene ovih biogoriva, u pogledu koncentracije štetnih gasovitih produkata sagorevanja u sirovoj emisiji izduvnih gasova, mogu izostati ukoliko se biodizel a pogotovo bioetanol primenjuju kao čista goriva u motorima koji nisu namenski projektovani za njihovu primenu. U tom slučaju bolje je koristiti mešavine biogoriva i konvencionalnog goriva nego čisto alternativno gorivo. Za slučaj multiprocesnog motora, koji je ispitivan pri opterećenju od 75% i 100%, pokazalo se da je povoljnije koristiti konvencionalno dizel gorivo nego bioetanol, po sve tri štetne gasovite komponente, osim pri režimu $n=1960$ o/min i opterećenju 100%, kada se primenom konvencionalnog dizel goriva dobija nepovoljnija (veća) koncentracija NO_x nego u slučaju primene bioetanola. Ako se u multiprocesnom motoru primenjuje biodizel, na niskim i srednjim brojevima obrtaja, na oba opterećenja motora, dobija se nepovoljnija emisija po sve tri štetne gasovite komponente (CO , HC , NO_x), nego u slučaju primene konvencionalnog dizel goriva. Na oba opterećenja motora (75% i 100%) i visokim brojevima obrtaja (2670 o/min) CO i HC imaju manju koncentraciju u odnosu na slučaj kada se primenjuje konvencionalno dizel gorivo. Dakle, pokazalo se da se pun potencijal biodizela i bioetanola, u pogledu smanjenja štetne emisije gasovitih produkata sagorevanja, ne može iskoristiti ako se ova biogoriva koriste kao čista goriva, već ih je bolje koristiti kao aditive za konvencionalna goriva. Što se tiče brzine sagorevanja, koja je usko povezana i sa emisijom izduvnih gasova, najveća brzina se ostvaruje pri sagorevanju konvencionalnog dizel goriva, zatim biodizela pa bioetanola, što je povezano sa karakteristikama svakog od goriva ali i sa primenjenim radnim ciklusom.

LITERATURA

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council, 23 April 2009, on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European Union, L 140/16, 2009. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj/eng> [pristupljeno 12.11.2024]
- [2] Share of renewables in transport increased slightly in 2022, <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/DDN-20240205-1> [pristupljeno 12.11.2024]
- [3] Putz, R. European policy on future road mobility - technology neutrality right of way or headed in the wrong direction?, *Mobility & Vehicle Mechanics*, Vol 48, No. 2, pp 1-18, 2022. <https://doi.org/10.24874/mvm.2022.48.02.01>
- [4] Fominykh, S., Stanar, D. Unravelling the Serbian Energy Transition Puzzle: Driving an Electric Vehicle Result in Higher CO_2 Emissions than Driving a Traditional Internal Combustion Engine Counterparty, *Energija, ekonomija ekologija*, Vol. 26, No. 1, pp 22-27, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.22F>
- [5] Heywood, B.J. *Internal combustion engine fundamentals 2E*, McGraw-Hill Education, 2018.
- [6] Petković, S. *Biodizel - uticaj na mazivo i pogonske karakteristike motora*, Akademija nauka i umjetnosti Republike Srpske. Banja Luka, 2014.
- [7] Đurišić-Mladenović, N., Predojević, Z., Škrbić, B. Konvencionalna i napredna tečna biogoriva, *Hemijska industrija - Časopis Saveza hemijskih inženjera Srbije*, Vol. 70, No. 3, pp 225-241, 2016. <http://doi.org/10.2298/HEMIND150311029D>
- [8] Batić, I., Đurišić, Ž., Babić, M. Techno-economic Analysis of Hydrogen Production from Biodiesel and Its Use for Electricity Production in Fuel Cells for Electric Vehicles, *Energija, ekonomija ekologija*, Vol. 23, No. 1, pp 1-6, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-1.01B>
- [9] Knežević, D. *Istraživanje procesa sagorevanja i izduvne emisije dizel motora pri pogonu biogorivima*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
- [10] Qi, D.H., Chen, H., Geng, L.M., Bian, Y.ZH. Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 12, pp 2985-2992, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.042>
- [11] Asokan, M.A., Prabu, S.S., Prathiba, S., Akhil, V.S., Abishai, D.L., Surejla, M.E. Emission and performance behaviour of flax seed oil biodiesel/diesel blends in DI diesel engine, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, No. 17, pp. 8148-8152, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.108>
- [12] Kovač, D., Cvrk, S., Nedeljkov, Đ. Analysis of the Impact of Different Fuel Types on Fuel Consumption and Exhaust Emissions of a Two-Stroke Marine Diesel Engine, *Energija, ekonomija ekologija*, Vol. 26, No. 2, pp 55-60, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-2.55C>
- [13] Shenir, R., Balaji, G. Utilisation of alternate fuels in diesel and crdi engine for eliminating vehicular emissions, *Mobility and Vehicle Mechanics*, Vol. 49, No. 1, pp. 9-24, 2023. <https://doi.org/10.24874/mvm.2023.49.01.02>
- [14] Tomić, M., Petrović, S. *Motorni sa unutrašnjim sagorevanjem*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [15] Nestorović, D., Radovanović, M., Petrović, S., Tomić, M., Očić, O., Veinović, S., Pešić, R., Šiler Marinković, S., Mojović, Lj., Pejin D. *Alternativna goriva za pogon motora SUS u 21 veku*, Mašinski fakultet Univerziteta, Beograd, 2006.
- [16] Florian, M., Michael, G. A detailed comparison of ethanol-diesel direct fuel blending to conventional ethanol-diesel dual-fuel combustion, *Automotive and Engine Technology*, Vol. 10, No. 1, 2024. <https://doi.org/10.1007/s41104-024-00147-1>
- [17] Gnanamoorthy, V., Devaradjane, G. Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission of DI diesel engine fueled with ethanol e Diesel blend, *Elsevier, Journal of the Energy Institute*, Vol. 88, No. 1, pp 19-26, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.06.001>
- [18] Han, J., Somers, L.M.T., Cranknell, R., Joedicke, A., Wardle, R., Mohan, V.R.R. Experimental investigation of ethanol/diesel dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine, *Fuel*, Vol. 275, 117867, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>
- [19] Imran, A., Varman, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A. Review on alcohol fumigation on diesel engine: A viable alternative dual fuel technology for satisfactory engine performance and reduction of environment concerning emission, *Renew Sustain Energy Reviews*, Vol. 26, pp 739-751, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.070>
- [20] Hebbar, G.S., Bhat, A.K. Control of NO_x from a DI diesel engine with hot EGR and ethanol fumigation: An experimental investigation, *International Journal of Automotive Technology*, Vol 14, pp 333-341, 2013. <http://doi.org/10.1007/s12239-013-0037-8>
- [21] Milojević, S., Pešić, R., Davinić, A., Pavlovic, R. Influence of the compression ratio on combustion and emissions parameters of the diesel engine, in *Proc. International Congress Motor Vehicles & Motors 2006*, Kragujevac 4-6. October 2006.
- [22] Pešić, R., Veinović, S., Radonjić, D., Davinić, A., Tešić, A., Radošević, Z. Methanol as a fuel for variable compression ratio engine, in *Proc. IX international scientific meeting*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2-4 October, 1996.
- [23] Davinić, A. *Identifikacija karakteristika multiprocesnog rada klipnog motora SUS*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2012.

[24] Milojević, S. *Istraživanje uticaja stepena kompresije na radni proces dizel motora*, Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2005.

AUTORI

Željko Đurić - viši asistent, Mašinski fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci, zeljko.djuric@mf.unibl.org, ORCID [0009-0001-8573-6038](https://orcid.org/0009-0001-8573-6038)

Vladimir Vukašinović - vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka

Univerziteta u Kragujevcu, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632), autor za korespondenciju

Dušan Gordić - profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu,, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)

Ivan Grujić - docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu,, ivan.grujic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-0572-1205](https://orcid.org/0000-0003-0572-1205)

Nadica Stojanović - docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, nadica.stojanovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-4199-0587](https://orcid.org/0000-0002-4199-0587)

Experimental Research of Environmental Indicators and Combustion Processes of Diesel Engines for the Case of Application of Biodiesel and Bioethanol

Abstract – Biofuels are of increasing importance, because they do not affect the carbon dioxide (CO₂) balance. Biodiesel and bioethanol are considered fuels of the future, because of their positive influence in terms of the environment. The paper presents the results of experimental research on environmental indicators and the combustion processes in a diesel engine when using biodiesel and bioethanol as alternative fuels. The aim of the research is to compare the concentrations of harmful gaseous products of combustion in the emission of diesel engine exhaust gases, for the cases when conventional diesel fuel, biodiesel or bioethanol is used. A modified experimental IC engine was used for the purpose of this research in order to realize both a diesel and an otto cycle in the same engine. During the combustion of diesel fuel or biodiesel, the engine works according to the diesel cycle, and during the combustion of bioethanol, the engine works according to the otto cycle. This paper presents the results for two loads, 75% and 100%. The results lead to a conclusion that the full potential of biodiesel and bioethanol, in terms of reducing harmful emissions of gaseous combustion products, cannot be used if these biofuels are used as pure fuels, but it is better to use them as additives for conventional fuels.

Index terms – Biofuels, Biodiesel, Bioethanol, Ecological characteristics, Combustion