

Analiza uticaja različitih vrsta goriva na potrošnju i izduvne emisije brodskog dvotaktnog dizel motora

Draško Kovač, Sead Cvrk, Đorđe Nedeljkov

Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor

Rezime - Dvotaktni dizel motori predstavljaju vitalnu komponentu pogona trgovačkih brodova, ali njihova upotreba teške nafte dovodi do ozbiljnih problema zagađenja okoline. Ovaj rad istražuje uticaj različitih vrsta goriva na potrošnju i izduvne emisije brodskog dvotaktnog dizel motora. U cilju smanjenja negativnih uticaja, istražene su alternative u vidu kvalitetnih dizel goriva i njihovih mješavina sa biodizelom. Primijenjena je eksperimentalna metoda za analizu performansi dvotaktnog dizel motora, najčešće korišćenog pogona u trgovačkom pomorskom saobraćaju. Korišćeni su čisti euro dizel i različite smjese euro dizela sa biodizelom dobijenim od otpadnog suncokretovog ulja u različitim odnosima (7%, 20%, 25%). Praćene su izduvne emisije, uključujući CO, CO₂, NO_x, SO₂ i O₂, tokom četiri različita režima rada motora. Eksperiment je sproveden na školskom brodu Jadran, koji je u sastavu Mornarice Vojske Crne Gore, dok je brod bio privezan u luci baziranja. Opterećenje motora, prilikom rada na vezu broda u luci, predstavlja posebnu pogonsku karakteristika motora koja se u literaturi naziva karakteristika teškog propelera. Rezultati ovog istraživanja pružaju uvid u efikasnost različitih vrsta goriva na performanse i ekološki aspekt rada dvotaktnog dizel motora u realnim eksploatacionim uslovima pomorskog saobraćaja.

Gljučne reči - brodski dizel motor, dizel goriva, potrošnja goriva, izduvne emisije, karakteristike teškog propelera

I UVOD

Sektor pomorskog saobraćaja postao je ključna komponenta svjetske privrede. Svjetska flota brodova trgovačke mornarice broji preko 104000 [1]. Istovremeno, na godišnjem prosječnom nivou (2007.–2012.) emisija sa brodova čine oko 13 % sumpornih oksida (SO_x), odnosno oko 15 % azotnih oksida (NO_x) [2]. Zagađenje vazduha sa brodova regulisano je međunarodnom konvencijom o sprječavanju zagađenja sa brodova, MARPOL, kroz Aneks 6. Aneks 6 navedene konvencije utvrđuje ograničenja emisija NO_x i SO_x iz brodskih motora s unutrašnjim sagorijevanjem koji služe za pogon broda ili nekog drugog pomoćnog uređaja na brodu [3].

Biogoriva kao obnovljivi izvor energije prilikom sagorijevanja u brodskim motorima imaju značajno manju emisiju azotnih i sumpornih oksida u odnosu na brodska dizel goriva te ih mogu djelimično zamijeniti. Osnovni nedostaci biogoriva su ograničene količine sirovina i visoki troškove proizvodnje. Ipak, biodizel bi mogao biti opcija za smanjenje emisije zagađivača u pomorskom sektoru. Međutim, danas su praktična iskustva s uporabom biodizela u pomorskoj industriji vrlo oskudna. Primjena biodizela kao goriva za brodove testirana je u nekoliko istraživačkih

programa, gdje su uočene neke prednosti u odnosu na fosilna goriva [4], uključujući činjenicu da se biogorivo može mješati sa konvencionalnim dizelom u svim odnosima. Pri tome nisu otkrivene nikakve štetne posljedice po rad motora [4].

Međutim, uočeni su potencijalni problemi koji se ogledaju u činjenici a biogorivo djeluje kao otapalo i ima tendenciju omekšavanja i razgradnje određenih spojeva gume i elastomera koji se često koriste u starijim motorima te da može lako ukloniti naslage preostale nakon uporabe konvencionalnog dizel goriva što uzrokuje začepljenje filtera goriva. Ipak, studije Međunarodne pomorske organizacije pokazuju da se niske mješavine biogoriva i dizel goriva do 20 % (B20) mogu koristiti bez ikakvih izmjena na sistemima goriva brodskih motora[5]

U ovom radu istražen je utjecaj smjese biogoriva (FAME) i konvencionalnog dizel goriva na karakteristike izduvnih gasova kod brodskog dvotaktnog dizel motora.

Za eksperimentalno istraživanje je korišćen brodski dvotaktni reverzibilni dizel motor. Motor je sporohodni i ima pet cilindara od kojih su četiri radna a jedan cilindra služi kao klipni dvoradni kompresor za poprečno ispiranje, odnosno izmjenu radne materije.

Za istraživanje je korišćeno konvencionalno dizel gorivi i smjesa biogoriva sa dizel gorivom u odnosima 7 %, 20 % i 25 %.

Biodizel je proizveden u laboratorijskim uslovima, korišćenjem otpadnog suncokretovog ulja. Za proizvodnju biogoriva primijenjena je bazno katalitička transesterifikacija.

II EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Eksperimentalni dio rada izveden je na školskom brodu Jadran (slika 1) koji se nalazi u formacijskom sastavu Mornarice Vojske Crne Gore. Školski brod "Jadran" je izgrađen u brodogradilištu "H. C. Silken Son" u Hamburgu, SR Njemačka u periodu od 1931 do 1933 godine. Osnovna namjena broda od izgradnje bila je obuka pomorskog kadra ratne i trgovačke mornarice Jugoslavije. Brod je motorni jedrenjak tipa "barkantin" sa deplasmanom od 787 tona i "dužinom preko svega" od 60 metara, a na vodnoj liniji 41 metar. Širina na glavnom rebru je 8,9 m, srednji gaz je 4,35 m, visina velejarbola 39,1 m.

U eksperimentalnom dijelu istraživanja izvedenom na brodu, za različite režime rada motora izmjeren je obrtni moment na propelerskom vratilu i potrošnja goriva za te režime. Pored mjerenja obrtnog momenta na propeleskom vratilu, za različite režime rada motora i različite vrste goriva, izmjeren je sastav izduvnih gasova motora. Mjerenje navedenih parametara

izvršeno je na vezu broda u luci što predstavlja vožnju sa teškim propelerom.



Slika 1. Školski brod Jadran, autorski prikaz

Motor je reverzibilni brodski dvotaktni dizel, model ALPHA 494R proizveden u fabrici brodskih motora "LITOSTROJ" u Ljubljani, Republika Slovenija (slika 2). Izrađen je po licenci "BURMEISTER", može se smatrati sporohodnim motorom jer postiže maksimalni broj obrtaja koljenastog vratila od 320 min⁻¹ i postiže maksimalnu snagu od 390 kW. Motor ima četiri radna cilindra i peti cilindar koji radi kao dvoradni klipni kompresor a namjenjen je za izmjenu radne materije u motoru (ispiranje cilindra). Prečnik cilindra je 290 mm a hod klipova je 490 mm.

Izlazna spojnica motora je spojena na propelersko vratilo a na propelersko vratilo je postavljen dvokrilni propeler sa fiksnim krilima. Prečnik propelera je 1850 mm, a prečnik propelerskog vratila je 162 mm. Prilikom mjerenja, motor je imao 18179 časova pogona od ugradnje, poslije generalnog remonta 4262 časa pogona i na njemu nisu rađene nikakve preinake za izvođenje eksperimenta [6].



Slika 2. Glavni brodski motor na školskom brodu Jadran, autorski prikaz

Za potrebe eksperimenta korišćeno je konvencionalno dizel gorivo i smjesa dizel i biogoriva od otpadnog suncokretovog ulja. Pripremljeni uzorci goriva su bili sledeći:

- čisto dizel gorivo - (ED),
- dizel 93 % i 7 % biodizel od suncokretovog ulja (28 litara+2,1 litar) - (BDS7),
- dizel 80 % i 20 % biodizel od suncokretovog ulja (24 litra+6 litara) - (BDS20),
- dizel 75 % i 25 % biodizel od suncokretovog ulja (22,5 litara+7,5 litara) - (BDS25).

Na osnovu fizičko-hemijske analize uzoraka goriva, određena je donja toplotna moć svakog uzorka pojedinačno što je prikazano u u Tabeli 1.

Tabela 1. Maseni udjeli pojedinih hemijskih elemenata i donja toplotna moć za sve uzorke goriva

Uzorci goriva	Maseni udjeli u %						H_d kJ/kg
	C	H	O	N	S	H ₂ O	
ED	84,26	13,6	1,807	0,32	0,0085	0,0041	43982,068
BDS7	80,21	13,05	6,604	0,12	0,0078	0,0080	41771,595
BDS20	80,44	12,83	6,438	0,27	0,0061	0,0153	41589,128
BDS25	78,32	13,12	8,436	0,10	0,0056	0,0177	40942,853

Donja toplotna moć određena je pomoću empirijske formule za tečna goriva [7]:

$$H_d = 339,13 \cdot c + 1193,24 \cdot \left(h - \frac{o+n}{8} \right) + 92,11 \cdot s - 25,12 \cdot w \quad (1)$$

U izrazu (1) su c , h , o , n , s i w procentualni maseni udjeli prisutnih hemijskih elemenata C, H, O, N, S i vode H₂O u gorivu.

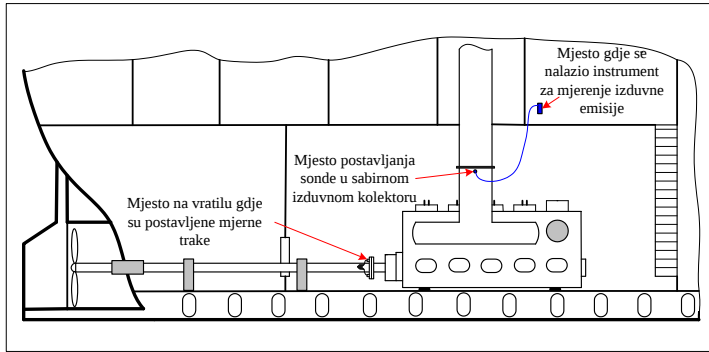
Mjerenje potrošnje goriva vršeno je pomoću elektronske vage. Mjerenje je vršeno tako što se iz posebne posude napajao sistem goriva motora čija se masa mjerila na početku i na kraju mjerenja parametara motora na odabranim režimima uz registrovanje dužine vremenskog intervala.

Za mjerenje obrtnog momenta na propelerskom vratilu korišćena

je sledeća oprema: mjerne trake, višekanalna elektronska jedinica za mjerenje dinamičkih veličina "spider 8" i personalni računar. Softverski paket koji omogućava mjerenje i obradu izmjerenih podataka je "catman 3.0". Navedena oprema, odnosno hardver i softver proizvedeni su u firmi "HOTTINGER BALDWIN MESSTEHNİK (HBM)", Darmstadt iz SR Njemačke.

Mjerenje obrtnog momenta na propelerskom vratilu izvršeno je postavljanjem mjernih traka i mjerne opreme na propelersko vratilo glavnog motora. Mjesto postavljanja mjernih traka na propelersko vratila je poslije spojnice motora sa vratilom. Propelersko vratilo na glavnom motoru školskog broda Jadran je punog poprečnog presjeka prečnika 162 mm, izrađeno je od kovanog čelika čiji je modul elastičnosti $E=215 \text{ kN/mm}^2$. Na propelersko vratilo su postavljena dva para mjernih traka tip

"XY21-6/350" koje su povezane u Wheatston-ov most [8].



Slika 1. Mjesto postavljanja mjerne opreme

Za mjerenje sastava izduvnih gasova glavnog brodskog dizel motora korišćen je gasni analizator "testo 350 MARITIME" [9]. Testo 350 je prenosni analizator produkata sagorijevanja, koji se može koristiti kao sistemska komponenta unutar kompletnog sistema za mjerenje sastava dimnih gasova iz brodskih dizel motora u skladu sa konvencijom "MARPOL 73/78 Aneksom 6" i NO_x tehničkim kodom 2008 (MEPC.177 (58)). Instrument se sastoji od kontrolne jedinice (upravljačka jedinica za prikazivanje i očitavanja) i kućišta analizatora (mjerni instrument). Spojni kontakti, kablovi za prenos podataka ili bluetooth (opcija) se koristi za povezivanje upravljačke jedinice sa kućištem analizatora.

Tabela 2. Izmjerene vrijednosti obrtnog momenta, snage i potrošnje goriva na odabranim režimima rada motora

Vrsta goriva	Režim rada motora	Obrtni moment M [Nm]	Snaga koju troši propeler P [kW]	Časovna potrošnja goriva [kg/h]
Čisto dizel gorivo	N 150	4267	67	15,30
	N 180	5611	105	23,20
	N 210	7649	168	36,20
	N 210 KSD	8380	184	38,60
Smjesa dizela i 7 % biodizela od suncokretovog ulja	N 150	4267	67	16,00
	N 180	5611	105	24,45
	N 210	7649	168	38,10
	N 210 KSD	8380	184	40,65
Smjesa dizela i 20 % biodizela od suncokretovog ulja	N 150	4267	67	16,10
	N 180	5611	105	24,55
	N 210	7649	168	38,25
	N 210 KSD	8380	184	40,85
Smjesa dizela i 25 % biodizela od suncokretovog ulja	N 150	4267	67	16,35
	N 180	5611	105	24,95
	N 210	7649	168	38,85
	N 210 KSD	8380	184	41,50

3.2 Emisija izduvnih gasova

Istraživanje sastava izduvnih gasova vršeno je na tri različita broja obrtaja koljenastog vratila motora a na 210 o/min za dva različita opterećenje.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da je uticaj promjene broja

III EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Parametri rada glavnog motora

Izmjerene vrijednosti obrtnog momenta, snage i časovne potrošnje za sve vrste goriva na odabranim režimima rada glavnog motora prikazane su u tabeli 2. Odabrana su četiri režima rada i to tri režima u vožnji naprijed (N 150, N 180 i N 210) i jedan režim u vožnji krmom kada je zakrenuto kormilo sasvim desno (N 210 KSD). Pošto je brod vezan uz obalu ovakav režim rada motora može se smatrati stacionarnim jer nema uticaja vanjskih uslova na rad i promjenu opterećenja (uticaj vjetrova, morske struje, talasa i dr.).

Efektivna snaga koja se predaje od motora propeleru može da se izrazi preko obrtnog momenta koji se sa koljenastog vratila motora prenosi preko spojnice na propelersko vratilo, pri čemu se ono obrće ugaonom brzinom ω [7]:

$$P_e = M \cdot \omega \quad (2)$$

gde su:

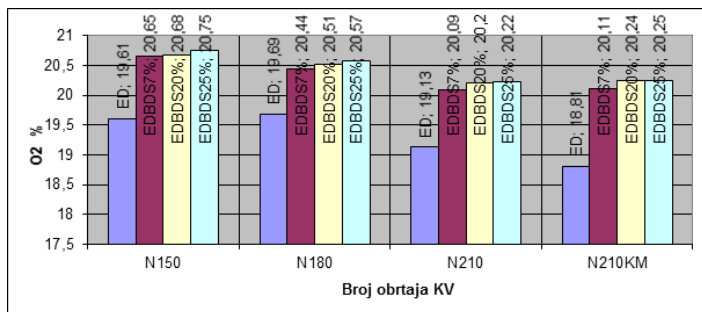
- P_e [W], snaga koju motor predaje propeleru,
- M [Nm], obrtni moment propelera,
- ω [rad/s], ugaona brzina propelerskog vratila.

Izmjereni podaci o potrošnji goriva pokazuju da je potrošnja različita za sve vrste goriva na odabranim režimima rada motora.

obrtaja koljenastog vratila motora na proces sagorijevanja a time i na sastav izduvnih gasova veoma kompleksan. Sa promjenom broja obrtaja koljenastog vratila motora mijenja se ugao početka i kraja ubrizgavanja, koeficijent punjenja, koeficijent zaostalih gasova, sastav smjese, intenzitet turbulencije radnog medija u kompresionom prostoru, termički nivo prostora za sagorijevanje,

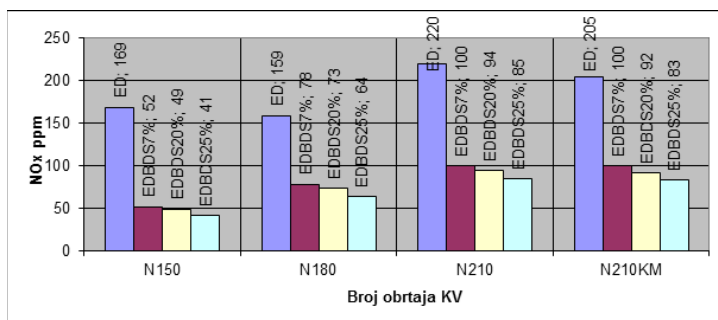
vrijeme trajanja procesa sagorijevanja i drugi parametri ciklusa što sve značajno utiče na sastav izduvnih gasova.

Istraživanje pokazuje da se procenat O_2 u izduvnim gasovima smanjivao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora i povećavao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora (slika 4). Procenat O_2 u izduvnim gasovima motora se povećavao sa povećanjem procentualnog udjela biodizel goriva u smjesi sa dizel gorivom. To je posledica većeg sadržaja kiseonika u biogorivu.



Slika 2. Izmjerene vrijednosti O_2 za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora

Istraživanje pokazuje da se procenat NO_x u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora, a smanjivao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora (slika 5). Procenat NO_x u izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Dosadašnja istraživanja su pokazala da kod dizel motora tokom procesa sagorijevanja goriva u cilindru nastaje samo azot-monoksid (NO). Ostali azotni oksidi nastaju u izduvnom kolektoru i atmosferi. Veći sadržaj azotnih oksida je posledica visokih temperatura i pritiska tokom procesa sagorijevanja. Veće vrijednosti koeficijenta viška vazduha i manji ugao ubrizgavanja goriva doprinosi smanjenju azotnih oksida. Imajući u vidu navedeno te da je mjerenje vršeno na manjim opterećenjima motora i manjim termičkim opterećenjima jedno je od mogućih objašnjenja za dobijene rezultate istraživanja.

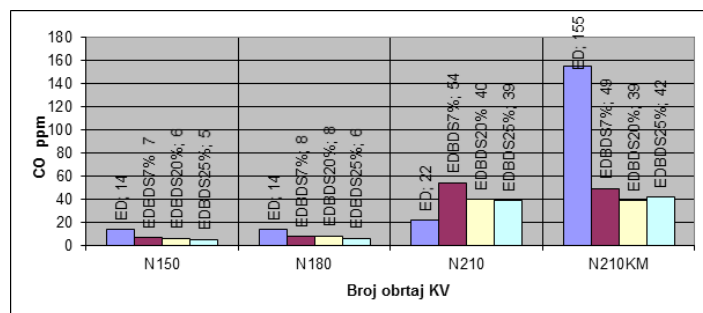


Slika 3. Izmjerene vrijednosti NO_x za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora

Pored navedenog mogući razlozi za smanjenje NO_x za smjese sa većim procentom biodizela jeste što iste imaju veći cetanski broj i niži aromatski sadržaj u poređenju sa čistim eurdizel gorivom.

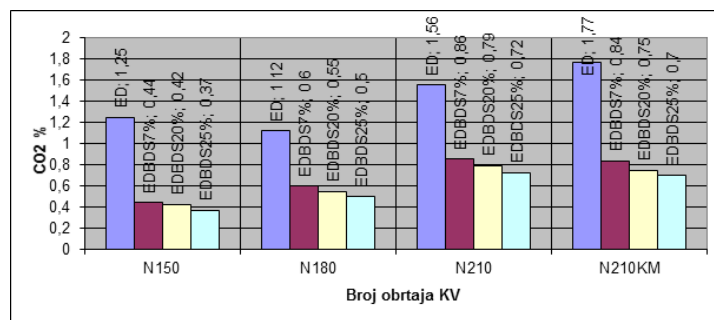
Veći cetanski broj je povezan sa kašnjenjem samozapaljenja goriva, sporijim rastom pritiska i nižim temperaturama procesa sagorijevanja što smanjuje emisiju NO_x u izduvnim gasovima [10, 11].

Istraživanje pokazuje da se procenat CO u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora a uglavnom se povećavao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora. Procenat CO u izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Istraživanja pokazuju da CO nastaje kao produkt nepotpunog sagorijevanja zbog nedostatka kiseonika. Razlog za ovakav trend može se objasniti što na većim brojevima obrtaja koljenastog vratila motora i većim opterećenjima odnos vazduha i goriva je manji, odnosno smjesa vazduha i goriva je bogatija [11, 12, 13].



Slika 4. Izmjerene vrijednosti CO za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora, autorski prikaz

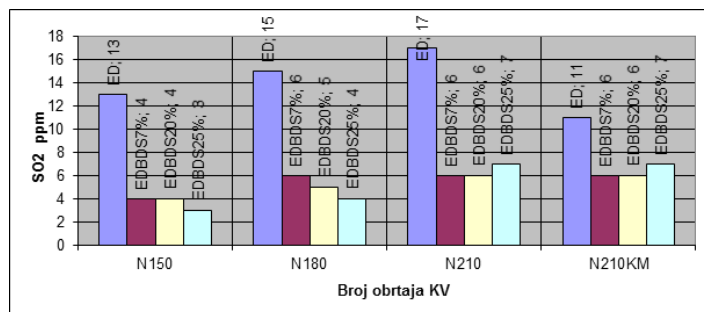
Istraživanje pokazuje da se procenat CO_2 u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora i smanjivao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora. Procenat CO_2 u izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Razlog za ovakav trend može se potražiti u nižim procentualnim udjelima ugljenika i vodonika za biodizelske smjese u odnosu na čisto dizel gorivo što uslovljava i niži procenat emisije CO_2 [14, 15].



Slika 5. Izmjerene vrijednosti CO_2 za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora

Istraživanje pokazuje da se procenat SO_2 u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora, a uglavnom se smanjivao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora. Procenat SO_2 u

izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Posledica nastanka sumpornih-oksida u izduvnim gasovima dizel motora su zbog prisustva sumpora u gorivu. Istraživanja pokazuju da uzorci goriva sa većim sadržajem sumpora imaju i veću koncentraciju SO_2 u izduvnim gasovima.



Slika 6. Izmjerene vrijednosti SO_2 za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora, autorski prikaz

Međutim, smanjenje sumpora u gorivu smanjuje podmazujuće osobine goriva što je posebno izraženo kod klipnih pumpi visokog pritiska goriva [16].

VII ZAKLJUČAK

U ovoj istraživanju analizirana je potrošnja i utjecaj biogoriva druge generacije (FAME) na karakteristike izduvne emisije iz brodskog dizel motora. Korišten je reverzibilni dvotaktni brodski dizelski motor sa poprečnim ispiranjem, odnosno izmjenom radne materije.

Motor je bio pogonjen čistim dizel gorivom i mješavinama od 7%, 20% i 25% dizel goriva biogoriva od otpadnog suncokretovog ulja.

Iz eksperimentalnih rezultata može se zaključiti sledeće:

- postoji trend smanjenja emisije NO_x pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati njihovom većem cetanskom broju i nižem sadržaju aromata,
- postoji trend smanjenja emisije CO pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati većim sadržajem kiseonika u biogorivu,
- postoji trend smanjenja emisije CO_2 pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati nižem udjelu ugljenika i vodonika a većim udjelima kiseonika u biogorivu,
- postoji trend smanjenja emisije SO_2 pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati nižem udjelu sumpora u njima,
- potrošnja goriva za iste režime se povećavala što se povećavao udio biogoriva i smjesi.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] International Maritime Organization (IMO), *International shipping facts and figures - information resources on trade, safety, security, environment*, 2012. <https://nmsmontereybay.blob.core.windows.net/montereybay-prod/media/resourcepro/resmanissues/pdf/120601shippingfacts.pdf> [pristupljeno 29.01.2024]
- [2] International Maritime Organization (IMO), *Third IMO GHG Study 2014 - Final Report*, MEPC 67/INF.3, 2014. <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf> [pristupljeno 29.01.2024]
- [3] International Maritime Organization (IMO), Note by the International Maritime Organization to the forty-third session of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA 43) Paris, France, 1 to 4 December 2015. Agenda item 10(c) Emissions from fuel used for international aviation and maritime transport. Update on imo's work to address emissions from fuel used for international shipping, 2015.
- [4] Florentinus, A., Hamelinck, C., van den Bos, A., Winkel, R., Cuijpers, M. *Potential of biofuels for shipping – Final Report*, Ecofys, European Maritime Safety Agency (EMSA), Project number: BIONL11332, 2011.
- [5] IMO, 2007. *Feasibility study into the use of biofuels in the Norwegian domestic fleet*, Marine Environment Protection Committee, 57th session, Agenda item 4.
- [6] Osnovna brodska knjiga školskog broda Jadran
- [7] Živković, M.C. *Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem: I dio teorija motora*, Mašinski Fakultet, Beograd, 1985.
- [8] Messtechnik, H.B. *HBM measurement techniques and catman*, HBM Darmstadt, Berlin, 2001.
- [9] Testo 350 MARITIME V2-flue gas analyzer, Instruction manual, <https://static.testo.com/image/upload/Instruction-manual-and-Software/Instruction-manuals/testo-350-maritime-instruction-manual.pdf> [pristupljeno 29.01.2024]
- [10] Monym, A., Gerpen, J.H. *The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions*, Biomass and Bioenergy, Vol. 20, No. 4, pp. 317-325, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00095-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00095-7)
- [11] Gumus, M., Kasifoglu, S. *Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oil methyl ester) and its blends with diesel fuel*, Biomass and Bioenergy, Vol. 34, No. 1, pp. 134-139, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.010>
- [12] Usta, N., Ozturk, E., Can, O., Conkur, E.S., Nas, S. *Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine*, Energy Conversion Management, Vol. 46, No. 5, pp. 741-755, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.05.001>
- [13] Lertsathapornsuka, V., Pairintrab, R., Aryasukb, K. *Krisnangkura K. Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator*, Fuel Processing Technology, Vol. 89, No. 12, pp. 1330-1336, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.024>
- [14] Ozsezen, A.N., Canakci, M., Turkan, A. Sayin C. *Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters*, Fuel, Vol. 88, No. 4, pp. 629-636, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.023>
- [15] Utlu, Z., Kocak, M.S. *The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions*, Renew Energy, Vol. 33, No. 8, pp. 1936-1941, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.006>
- [16] Muñoz, M., Moreno, F., Monné, C., Morea, J., Terradillos, J. *Biodiesel improves lubricity of new low sulphur diesel fuels*, Renew Energy, Vol. 36, No. 11, pp. 2918-2924, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.007>

AUTORI/AUTHORS

mr Draško Kovač - stručni saradnik, Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor, draskokovac@ucg.ac.me,

dr Sead Cvrk - redovni profesor, Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor, cvrk@t-com.me, ORCID [0000-0002-2717-4428](https://orcid.org/0000-0002-2717-4428)

Đorđe Nedeljkov- laborant, Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor

Analysis of the Impact of Different Fuel Types on Fuel Consumption and Exhaust Emissions of a Two-Stroke Marine Diesel Engine

Abstract – Two-stroke diesel engines are a vital component of merchant ship propulsion, but their use of heavy fuel oil contributes significantly to environmental pollution. This paper explores the impact of different fuel types on the fuel consumption and exhaust emissions of a two-stroke diesel engine used in maritime transport. In an effort to reduce these negative impacts, alternatives in the form of high-quality diesel fuels and their blends with biodiesel have been investigated. An experimental method was applied to analyse the performance of the two-stroke diesel engine, commonly used in commercial maritime traffic. Pure Euro diesel and various blends of Euro diesel with biodiesel obtained from waste sunflower oil were used in different proportions (7%, 20%, 25%). Exhaust emissions, including CO, CO₂, NO_x, SO₂, and O₂, were monitored during four different engine operating regimes. The experiment was conducted on the training ship Jadran, part of the Navy of Montenegro, while the ship was docked in the homeport. The engine load during moored ship operations represents a specific propulsion characteristic known as the heavy propeller loading, as referred to in the literature. The results of this research provide insights into the efficiency of different fuel types on the performance and ecological aspects of the two-stroke diesel engine under real operational conditions in maritime traffic.

Index Terms – Marine diesel engine, Diesel fuels, Fuel consumption, Exhaust emissions, Heavy propeller characteristics