

DYZELINO – PADANGŲ PIROLIZĖS ALIEJAUS MIŠINIAIS VEIKIANČIO VARIKLIO DARBO RODIKLIŲ IR DEGINIŲ EMISIJOS TYRIMAS

Edvinas VABUOLIS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas edvinas.vabuolis@vdu.lt

Tomas MICKEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas el. paštas tomas.mickevicius1@vdu.lt

Santrauka

Straipsnyje pateikiami dyzelinių degalų ir jo mišinių su padangų pirolizės aliejumi variklio darbo ir deginių emisijos tyrimų rezultatai. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami dyzeliniu varikliu ,ORUVA FIL511. Tyrimams naudoti dyzeliniai degalai (DD) ir jo mišiniai PPA10 ir PPA20 su padangų pirolizės aliejumi. Bandymo metu buvo matuojamos variklio valandinės degalų sąnaudos, tūrinės oro sąnaudos, variklio sukimo momentas, deginių emisija ir dūmingumas.

Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad esant mažai apkrovai, mažiausios valandinės degalų sąnaudos buvo gautos varikliui dirbant grynu dyzelinu. Didžiausios efektyviosios lyginamosios degalų sąnaudos buvo gautos varikliui veikiant dyzelinu ir padangų pirolizės aliejaus PPA20 mišiniu. Esant didžiausiai apkrovai, panaudojus degalų mišinius PPA10 ir PPA20, variklio naudingo veikimo koeficientas buvo gautas atitinkamai 3,6 % ir 4 % mažesnis, palyginti su grynais dyzeliniais degalais veikiančiu varikliu. Tuo pačiu režimu panaudojus dyzelinių degalų ir padangų pirolizės aliejaus PPA20 mišinį, variklis generavo didžiausią bendrąją azoto oksidų emisiją. Didžiausia anglies viendeginio CO emisija, varikliui dirbant visos apkrovos režimu, buvo gauta varikliui veikiant degalų PPA20 mišiniu (745 ppm), o mažiausios – panaudojus grynus dyzelinius degalus (646 ppm). Varikliui dirbant didžiausios apkrovos režimu su degalų PPA20 mišiniu variklis dūmino 25,5 % mažiau negu su dyzeliniais degalais.

Reikšminiai žodžiai: dyzelinis variklis, dyzeliniai degalai, padangų pirolizės aliejus, variklio darbo rodikliai, deginių emisija, dūmingumas.

Įvadas

Šiuo metu pasaulis susiduria su daugybe iššūkių, susijusių su energetika. Pagrindinės išskiriamos problemos: auganti energijos paklausa ne tik besivystančiose, bet ir kylančiose šalyse, priklausomybė nuo iškastinio kuro pasaulio energetikoje ir didėjanti šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracija, sąlygojanti su visuotiniu atšilimu susijusį poveikį (García-Contreras et al., 2015). Griežtėjantys aplinkosauginiai reikalavimai verčia ieškoti naujų būdų mažinti išskiriamų dujų koncentracijas įvairiuose sektoriuose. Remiantis literatūros šaltiniais, Europos Sąjungoje iki 26 % šiltnamio efektą sukeliančių dujų yra sugeneruotos būtent iš transporto sektoriaus (European Environment Agency, 2017). Dėl šių aplinkybių viso pasaulio mokslininkai vis intensyviau ieško alternatyvių ir atsinaujinančių energijos šaltinių, kuriuos būtų galima panaudoti transporto sektoriuje.

Vienas iš būdų, taupantis iškastinį kurą ir mažinantis neigiamą poveikį aplinkai, energijos išgavimas iš atliekų, įskaitant medžiagas, kurios nėra biologiškai skaidžios (Europos audito rūmai, 2017). Komunalinės ir pramoninės atliekos, kurios turi didelę šiluminę vertę, laikomos efektyvia energijos žaliava. Automobilių padangų atliekų išmetimas – viena iš svarbių sprendinų problemų. Mokslininkų apskaičiuota, kad kasmet visame pasaulyje susidaro daugiau nei milijardas padangų atliekų. Pirolizės technologijos panaudojimas vienas iš atliekų perdirbimo metodų. Tai termodinaminis procesas, kurio metu medžiaga kaitinama ir skaidoma be oro. Pirolizės metu gaunami kieti, skysti ir dujiniai įvairios sudėties produktai: pirolizės dujos, skystoji frakcija, kietasis anglies likutis, metalo laužas (Campuzano et al., 2020). Padangų atliekų pakartotinis naudojimas pirolizės perdirbimo technologija, būtų vienas iš būdų šalinti atliekas ir gauti didelės energetinės vertės produktus. Šių produktų kokybė ir kiekis priklauso nuo reaktoriaus temperatūros ir konstrukcijos (Murugan et al., 2009).

Padangų pirolizės aliejaus (PPA) panaudojimas dyzeliniuose varikliuose būtų puiki alternatyva. PPA gali būti naudojamas mišiniuose su dyzeliniais degalais. Tačiau dauguma mokslininkų teigia, kad mineralinius degalus keičiant alternatyviais ar atsinaujinančiais degalais, kinta degalų fizinės ir cheminės savybės. Dėl degalų fizinių ir cheminių savybių įtakos kinta variklio darbo ir deginių emisijos rodikliai (Islam et al., 2016). Norint užtikrinti kuo mažesnę taršos poveikį aplinkai, būtina atlikti išsamius eksperimentinius tyrimus (Kumaravel et al., 2016). Alternatyvių ir atsinaujinančių degalų naudojimą plačiai tyrinėja viso pasaulio mokslininkai, tačiau nėra vieningos nuomonės dėl jų fizinių ir cheminių savybių įtakos variklio darbo proceso parametrų, maitinimo sistemos elementų pokyčiams bei deginių emisijos rodikliams.

Tyrimo tikslas – ištirti dyzelinių degalų ir padangų pirolizės aliejaus mišiniais maitinamo dyzelinio variklio darbo ir deginių emisijos rodiklius, esant įvairiems apkrovų režimams.

Tyrimo uždaviniai:

1. Ištirti fizines ir chemines mineralinio dyzelino ir padangų pirolizės aliejaus savybes;

2. Atlikti eksperimentinius dyzelinių degalų ir padangų pirolizės aliejaus mišiniais veikiančio variklio darbo rodiklių tyrimus;
3. Įvertinti padangų pirolizės aliejaus kiekio degaluose įtaką deginių emisijos rodikliams.

Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimai buvo atlikti Vytauto Didžiojo universiteto, Žemės ūkio akademijos, Inžinerijos fakulteto Mechanikos, energetikos ir biotechnologijų inžinerijos katedros, variklių bandymo laboratorijoje. Eksperimentams atlikti buvo naudojamas vieno cilindro, tiesioginio įpurškimo dyzelinis variklis ORUVA F1L511, kurio vardinė galia 12,8 kW esant 3000 min⁻¹ variklio sukimosi dažniui. Variklio stende sumontuota variklio apkrovos valdymo įranga, darbo rodiklių ir emisijos matavimo prietaisai. Tyrimai buvo atliekami variklį apkraunant septyniomis skirtingo dydžio apkrovomis, o siekiant gautus rezultatus pateikti kuo suprantamiau – atvaizduojant duomenis grafikuose naudotos mažiausios (10 proc.), vidutinės (50 proc.) bei didžiausios (100 proc.) apkrovų reikšmės. Bandymo metu, buvo matuojamos variklio valandinės degalų sąnaudos, variklio sukimo momentas, deginių emisijos ir deginių dūmingumas. Variklio apkrovos charakteristikos buvo registruotos esant pastoviams alkūninio veleno sukiamams – $n = 2000 \text{ min}^{-1}$.

Tūrinės oro sąnaudos išmatuotos dujų GAZOERZ TURBINOWY CGT-02 Skaitikliu. Degalų sąnaudos matuotos elektroninėmis SK-1000 svarstyklėmis. Variklio deginių NO, NO₂, NO_x, CO, CO₂ emisijos išmatuotos dujų analizatoriumi Testo 350 XL, o deginių optinio skaidrumo (dūmingumo) kitimas įvertintas *Bosch* prietaisu RTT 100/RTT 110 nuo 0 iki 100 % skalėje.

Tyrimams naudotas grynas mineralinis dyzelinas (DD) ir degalų mišiniai, sudaryti iš mineralinio dyzelino ir padangų pirolizės aliejaus (PPA). Eksperimentiniame tyrime buvo tiriami degalai ir jų mišiniai su skirtingu priemaišų kiekiu : PPA5 – 5 % PPA ir 95 % dyzelino, PPA10 – 10 % PPA ir 90 % dyzelino, PPA15 – 15 % PPA ir 85 % dyzelino, PPA20 – 20 % PPA ir 80 % dyzelino. Straipsnyje pasirinkta pateikti dviejų koncentracijų – PPA10 ir PPA20 duomenis, gautus atliktų tyrimų metu. Vytauto Didžiojo universiteto Miškų ir ekologijos fakulteto Aplinkos ir ekologijos katedros Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratorijoje buvo tyrinėjamas skirtingos sudėties degalų šilumingumas, tankis ir kinematinė klampa. Fizinėms degalų savybėms nustatyti buvo naudojamas *Anton Paar* firmos prietaisas SVM 3000 (matavimo paklaidos atitinkamai 0,0002 g/cm³ ir 0,1%). Naudojant degalų fizines ir cheminės savybės pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Fizinės ir cheminės skirtingų degalų savybės

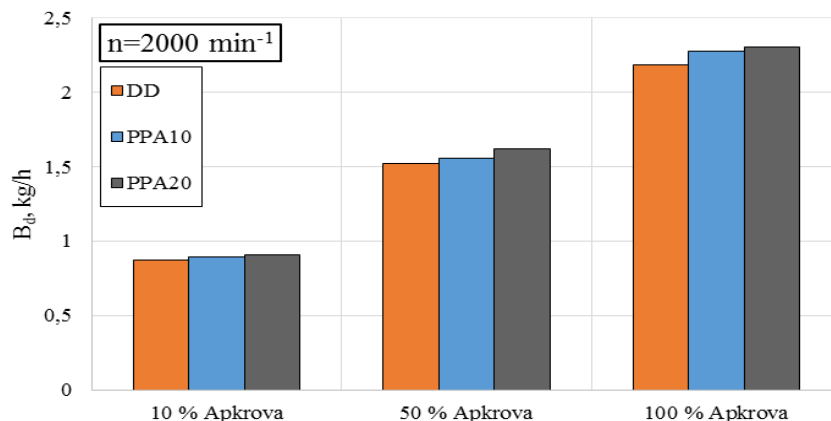
Table 1. Physiochemical properties of different fuels

Savybių rodikliai	DD	PPA
Tankis esant 20°C kg/m ³	824,7	909,4
Kinematinė klampa 40°C mm ² /s	2,01	3,17
Cetanis skaičius	~ 53	~ 40
Žemutinis šilumingumas MJ/kg	42,72	39,55

Kiekvienas bandymas buvo kartotas tris kartus. Gauti duomenys buvo susisteminti naudojantis *Microsoft Excel 2016* programa ir duomenys pavaizduoti grafiškai.

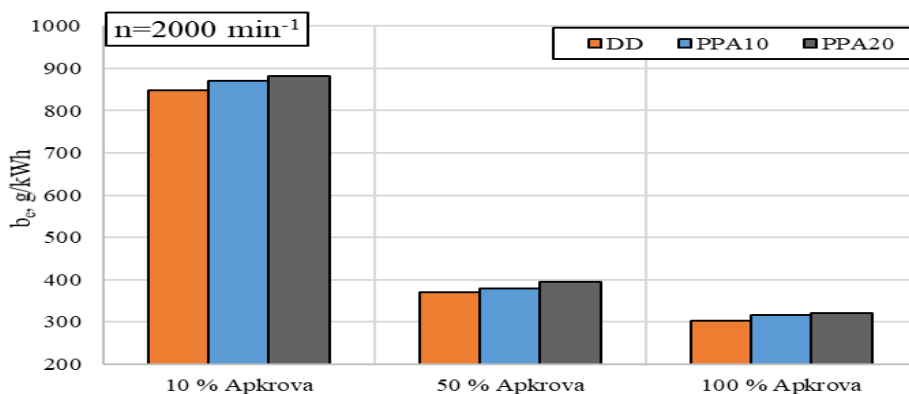
Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais, valandinių degalų sąnaudų priklausomybė nuo apkrovos pateikta 1 pav. Išanalizavus gautus duomenis buvo pastebėta, kad mažiausios valandinės degalų sąnaudos gautos varikliui dirbant gryniais dyzeliniais degalais.



1 pav. Valandinių degalų sąnaudų (B_d) priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais

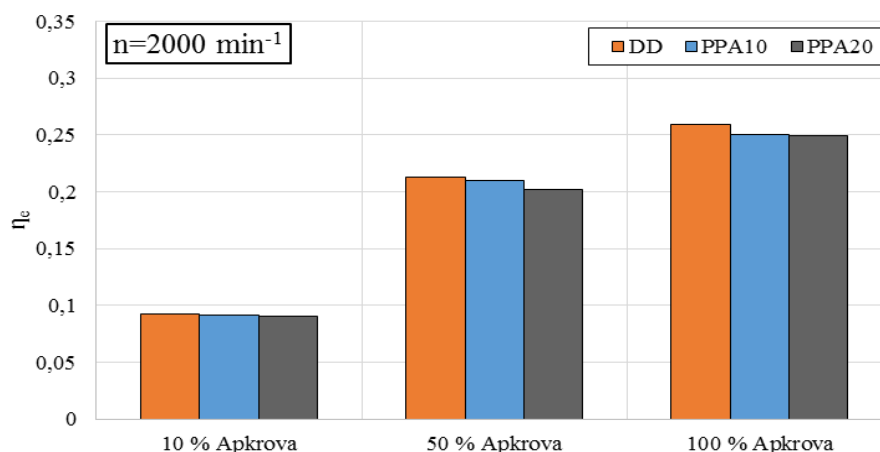
Fig. 1. The fuel consumption per hour (B_d) as a function of engine load, when the engine was running on different fuel compositions



2 pav. Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų (b_e) priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais
Fig.2. Brake specific fuel consumption (b_{sfc}) as a function of engine load, when the engine was running on different fuel compositions

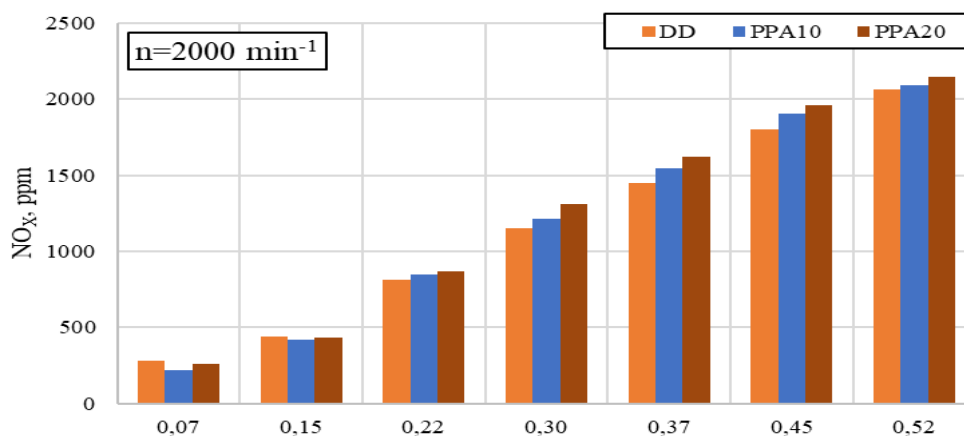
Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais, pateikta 2 pav. Kaip matyti, esant toms pačioms variklio darbo sąlygoms, efektyviosios lyginamosios degalų sąnaudos, varikliui veikiant PPA mišiniais, buvo didesnės. Tai paaiškinama mažesne degalų mišinių šilumingumo verte, kuri reikalauja didesnės porcijos degalų, kad išgautų tą pačią variklio galią (1 lentelė). Visos (didžiausios) apkrovos režimu varikliui dirbant degalų PPA10 ir PPA20 mišiniais, efektyviosios lyginamosios degalų sąnaudos atitinkamai 4,4 % ir 5,5 % padidėjo, lyginant su dyzelinu (DD).

3 pav. pateikta efektyviojo naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant dyzeliniais degalais ir jo mišiniais su padangų pirolizės aliejumi. Grafike matyti, kad visais apkrovos režimais didžiausia efektyvaus naudingumo koeficiento reikšmė gauta varikliui dirbant dyzeliniais degalais. Esant 100 % variklio apkrovai, naudojant degalų mišinius PPA10 ir PPA20, efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėjo atitinkamai 3,62 ir 4 %, palyginti su dyzeliniais degalais varomu varikliu.



3 pav. Efektyviojo naudingumo koeficiento (η_e) priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais
Fig. 3. Brake thermal efficiency (η_e) as a function of engine load, when the engine was running on different fuel compositions

Azoto oksidas yra bendras azoto deguonies junginių pavadinimas. Jis susidaro visų degimo procesų, kuriuose dalyvauja oras, metu, vykstant gretutinėms reakcijoms su ore esančiu azotu. Azoto oksidų emisijos (NO_x) priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio (p_e), varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais, pateikta 4 pav. Kaip matyti, bendroji azoto oksidų (NO_x) emisija didėjo didėjant variklio apkrovai. Varikliui veikiant maža apkrova, didžiausias azoto oksidų kiekis buvo sugeneruotas varikliui dirbant dyzeliniais degalais. Esant tai pačiai variklio apkrovai, naudojant degalų PPA20 mišinį, azoto oksidų emisija buvo 6,8 % mažesnė negu naudojant dyzelinius degalus. Grafikuose galima matyti, kad esant didžiausiai apkrovai, maksimali azoto oksidų emisijos reikšmė (2170 ppm) gaunama varikliui dirbant PPA20 degalų mišiniu.

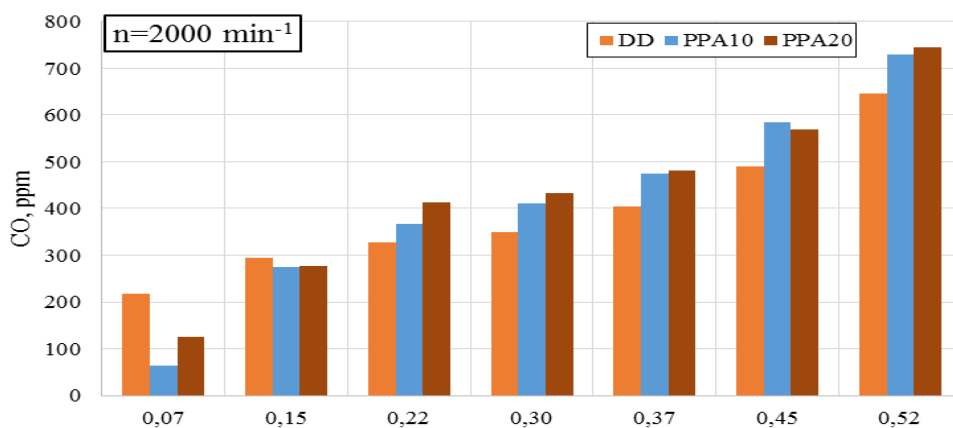


4 pav. Azoto oksidų emisijos (NO_x) priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio (p_e), varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais

Fig.4. Nitrogen oxide (NO_x) as a function of engine break mean effective pressure (p_e), when the engine was running on different fuel compositions

NO_x emisijoms formavimuisi didelę įtaką daro du parametrai – aukšta dujų temperatūra cilindre ir ilgesnė savaiminio užsiliepsnojimo periodo trukmė. Degalai, turintys ilgesnį savaiminio užsiliepsnojimo gaišties periodą, pasižymi didesniu maksimaliu šilumos išsiskyrimo greičiu. Dėl šios priežasties didėja temperatūra cilindre. Antra vertus, didesnis aromatinių medžiagų kiekis didina azotų oksidų kiekį. Tai galima paaiškinti išanalizavus ir kitų autorių mokslinius darbus. (Murugan et al., 2009).

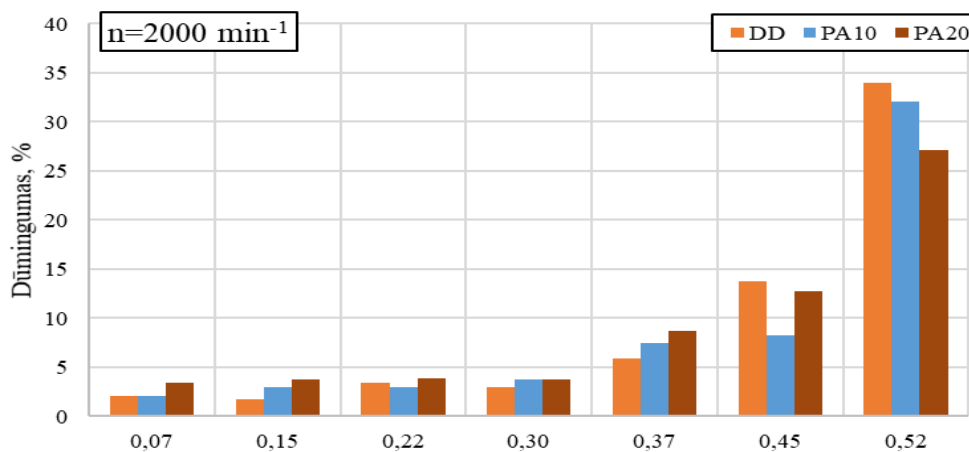
Anglies viendeginio emisijos priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio, varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais, pateikta 5 pav. Varikliui veikiant maža apkrova, didžiausia anglies viendeginio CO emisija buvo gauta varikliui dirbant dyzeliniais degalais. Varikliui dirbant vidutine ($p_e = 0,3$ MPa) apkrova, anglies viendeginio (CO) emisija, naudojant degalų mišinį PPA20, buvo didesnė negu naudojant dyzelinius degalus. Esant pilnai variklio ($p_e = 0,52$ MPa) apkrovai, panaudojus dyzelinių degalų ir padangų pirolizės aliejaus PPA10 ir PPA20 mišinius, anglies viendeginio emisija padidėjo atitinkamai 12,8 % ir 15,3 %, lyginant su rezultatais, gautais ištyrus dyzelinius degalus (DD).



5 pav. Anglies viendeginio (CO) emisijos priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio (p_e), varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais

Fig. 5. Dependencies of carbon monoxide (CO) on engine break mean effective pressure (p_e), when the engine was running on different fuel compositions

Mineralinio dyzelino ir jo mišinių PPA10 ir PPA20 su padangų pirolizės aliejumi, veikiančio variklio išmetamųjų deginių dūmingumas pateiktas 6 pav. Buvo pastebėta, kad deginių dūmingumui didžiausią reikšmę turi variklio apkrova. Galima matyti, kad mažiausias deginių dūmingumas buvo varikliui veikiant maža apkrova su degalų PPA20 mišiniu..



6 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio (p_e), varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais
Fig. 6. Dependencies of smoke opacity of the exhaust on engine break mean effective pressure (p_e), when the engine was running on different fuel compositions

Varikliui dirbant didžiausia apkrova ($p_e = 0,52$ MPa) su PPA10 ir PPA20 degalų mišiniais, dūmingumas atitinkamai 5,9 %, ir 25,5 % sumažėjo, palyginus su dyzeliniais degalais dirbančiu varikliu.

Išvados

1. Varikliui dirbant maža (10 %) apkrova, mažiausios efektyviosios lyginamosios degalų sąnaudos buvo gautos varikliui dirbant dyzeliniais degalais. Esant maksimaliai (100 %) variklio apkrovai, didžiausios (320,3 g/kW·h) lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos buvo gautos varikliui veikiant PPA20 degalų mišiniu.

2. Esant vidutinei (50 %) apkrovai, panaudojus degalų mišinį PPA20, variklio naudingo veikimo koeficientas buvo gautas 5,4 % mažesnis, palyginti su dyzeliniais degalais veikiančiu varikliu.

3. Maža apkrova ir dyzeliniais degalais veikiantis variklis išskyrė didžiausią (278 ppm) bendrąją azoto oksidų emisiją. Naudojant degalų PPA20 mišinį mažos apkrovos diapazone, azotų oksidų emisija 6,8 % sumažėjo, palyginus su dyzeliniais degalais dirbančiu varikliu.

4. Varikliui dirbant vidutinės apkrovos režimu ($p_e = 0,3$ MPa), didžiausia anglies viendeginio emisija buvo gauta varikliui veikiant PPA20 degalų mišiniu (433 ppm), o mažiausios (349 ppm) – dyzeliniais degalais dirbančio variklio.

5. Varikliui dirbant mažos ($p_e = 0,07$ MPa) apkrovos režimu, degalų mišiniu PPA20 veikiantis variklis dūmino daugiau, palyginus su dyzeliniais degalais. Didžiausios apkrovos režimu dirbančio variklio, panaudojus degalų mišinį PPA20, deginių dūmingumas buvo 25,5 % mažesnis, lyginant su dyzeliniais degalais.

Literatūra

1. ES veiksmai energetikos ir klimato kaitos srityje, Europos audito rūmai. 2017 m. Prieiga per internetą: www.op.europa.eu/webpub/eca/ir-energy-and-climate/lt/ (žiūrėta 2023-02-22).
2. Felipe Campuzano, Abdul Gani Abdul Jameel, Wen Zhang, Fuel and Chemical Properties of Waste Tire Pyrolysis Oil Derived from a Continuous Twin-Auger Reactor. 2020 m. Prieiga per internetą: www.pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.0c02271 (žiūrėta 2023-02-22)
3. García-Contreras, R., Martínez, J. D., Armas, O., Murillo, R., García, T. 2015. Study of a residential boiler under start-transient conditions using a tire pyrolysis liquid (TPL)/diesel fuel blend. *Fuel*, Vol. 158, p. 744–752.
4. Greenhouse gas emissions from transport in Europe, European Environment Agency, 2017 m. Prieiga per internetą: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-10> (žiūrėta 2023-02-22)
5. Islam, M. N., Nahian, M. R. 2016. Improvement of waste tire pyrolysis oil and performance test with diesel in CI Engine. *Journal of Renewable Energy*, ID 5137247.
6. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., Nagarajan, G. 2008. The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines. *Waste management*, Vol. 28(12), p. 2743–2749.
7. Naima, K., Liqid, A. 2013. Waste oils as alternative fuel for diesel engine: A review. *Journal of Petroleum technology and Alternative fuels*, Vol. 4(3), p.30–43.
8. Kumaravel, S. T., Murugesan, A., Kumaravel, A. 2016. Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel for diesel engines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, p. 1678-1685.

INVESTIGATION OF ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS CHARACTERISTICS OF DIESEL FUEL AND TYRE PYROLYSIS OIL BLENDS

Summary

The article presents the results of the engine performance and fuel emissions characteristics studies using diesel fuel and its blends with tire pyrolysis oil. Experimental studies were carried out with the diesel engine "ORUVA F1L511". Diesel fuel (DD) and its blends PPA10 and PPA20 with tire pyrolysis oil were used for research. During the test, the engine's fuel consumption per hour (Bd), volumetric air consumption, engine torque, fuel emissions and smoke opacity on the exhaust were measured.

Research has shown that at low load, the lowest fuel consumption per hour (Bd) was obtained when the engine was running on pure diesel. The highest brake specific fuel consumption ($bsfc$) was obtained when the engine was running on a diesel and tire pyrolysis oil PPA20 blend. At full load, PPA10 and PPA20 fuel blends resulted in 3.6% and 4% lower brake thermal efficiency (η_e), compared to pure diesel in the distribution engine. In the same mode, using a blend of diesel fuel and tire pyrolysis oil PPA20, the engine generated the highest total emissions of nitrogen oxides. The highest carbon monoxide CO emissions at full load was obtained with the PPA20 fuel blend (745 ppm) and the lowest with pure diesel (646 ppm). When the engine is running at full load. When the engine was running at full load, the PPA20 blend fueled engine emitted 25.5% less smoke opacity on the exhaust than the diesel fueled engine.

Keywords: pyrolysis, tire pyrolysis oil, diesel fuel, engine performance, emissions.