

## ANTROS KARTOS BIODEGALAIS IR PADANGŲ PIROLIZĖS ALIEJAUS MIŠINIAIS VEIKIANČIO VARIKLIO DARBO RODIKLIŲ IR DEGINIŲ EMISIJOS TYRIMAS

**Paulius MONTVYDAS**, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: [paulius.montvydas@vdu.lt](mailto:paulius.montvydas@vdu.lt)

**Tomas MICKEVIČIUS**, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas el. paštas: [tomas.mickevicius1@vdu.lt](mailto:tomas.mickevicius1@vdu.lt)

### Santrauka

Straipsnyje analizuojama antros kartos biodegalų ir padangų pirolizės aliejaus ir jų mišinių įtaka dyzelinio variklio darbo ir deginių emisijos rodikliams. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami su vieno cilindro, keturtakčiu, oro aušinamu, tiesioginiu įpurškimo dyzeliniu varikliu. Tyrimams naudoti antros kartos biodegalai (HVO), padangų pirolizės aliejus (PPA) ir jų PPA15, PPA30, ir PPA60 mišiniai. Bandymo metu buvo matuojami variklio darbo parametrai: alkūninio veleno sukimosi dažnis, variklio oro sąnaudos, degalų sąnaudos, variklio sukimo momentas, deginių emisija ir dūmingumas.

Išanalizavus eksperimentinio tyrimo metu gautus rezultatus pastebėta, kad prie visų apkrovos režimų mažiausios degalų sąnaudos gautos varikliui dirbant HVO degalais. Varikliui dirbant visa apkrova, mažiausia azotų oksidų (NO<sub>x</sub>) emisija gauta varikliui veikiant gryniais antros kartos biodegalais (1571 ppm). Varikliui dirbant pilna apkrova, didžiausia anglies viendeginio (CO) emisija (1288 ppm) gauta variklį maitinant PPA degalais. Varikliui dirbant pilnos apkrovos režime, HVO degalais veikiantis variklis dūmino 78,1 % mažiau, palyginus su padangų pirolizės aliejumi.

**Reikšminiai žodžiai:** padangų pirolizės aliejus, antros kartos biodegalai, deginių emisija, dūmingumas.

### Įvadas

Transporto priemonių augimas didina energetinių išteklių sunaudojimą, kuris neigiamai veikia ekonomiką. Didėjantis transporto priemonių skaičius didina degalų poreikį, o naftos resursai žemėje yra riboti. Visame pasaulyje keliuose yra apie 1,35 milijardo automobilių, o 2035 m., prognozuojama, bus 2 milijardai (Yaqoob ir kt., 2021). Taip pat vidaus degimo variklių išmetami kenksmingi deginiai teršia gamtą ir blogina žmogaus sveikatą. Auganti aplinkos oro tarša didina oro temperatūrą atmosferoje. Norint sumažinti iškastinio kuro naudojimą ir išmetamųjų dujų kiekį yra privalu ieškoti alternatyvių degalų.

Antros kartos biodegalai (HVO) yra alternatyvūs degalai. Tai hidrinti biodegalai, kurie gaminami iš gyvūninės kilmės riebalų arba augalinio aliejaus (Pinto ir kt., 2023). HVO degalai turi didelę šiluminę vertę, aukštą cetaninį skaičių, neturi aromatinių medžiagų ir sieros junginių. Šių degalų panaudojimas dyzeliniuose varikliuose galėtų sumažinti deginių emisijas bei pagerinti variklio darbo rodiklius (Smigins ir kt., 2023).

Atliekų pavertimas degalais turi didžiulį potencialą kaip degalų pakaitalas, kuris sumažintų pasaulinę atliekų našatą. Naudotų padangų atliekų šalinimas išvežant į sąvartynus kelia didelę grėsmę aplinkai ir žmonių sveikatai. Kiekvienais metais visame pasaulyje išmetama 1 milijardas naudotų padangų. Pakartotinai naudojamos padangos sudaro tik 15–20 %, o likusios padangų atliekos tampa aplinkos dalimi (Yaqoob ir kt., 2021). Perdirbti naudotas padangas yra naudinga keliais kriterijais: pirma – perdirbimas sumažina atliekų kiekį ir saugo gamtą nuo nereikalingo šiukšlinimo. Antra – didina antrinių žaliavų kiekį, prisidedant prie tvarios gamybos ir vartojimo modelio kūrimo (Kumaravel ir kt., 2016).

Padangos turi didelę energetinę vertę, todėl gali būti perdirbamos į įvairios agregatinės būsenos kurą: aliejų, anglis ir dujas (Kumaravel ir kt., 2016). Naudotų padangų atliekos perdirbamos į kurą pirolizuojant, sudeginamos inertinėje atmosferoje (Bi ir kt., 2022). Naudotų padangų pirolizės proceso metu gaunamas skystasis produktas: naudotų padangų pirolizės aliejus (PPA), kuris dėl cheminės sudėties gali būti naudojamas kaip degalai.

Mineralinius degalus keičiant alternatyviais ar atsinaujinančiais degalais, kinta degalų fizinės ir cheminės savybės. Dauguma mokslininkų teigia, kad PPA gali būti puiki degalų alternatyva, tačiau naudojant gryną padangų pirolizės aliejų, gali atsirasti problemų dėl mažo cetaninio skaičiaus, didelio sieros kiekio, didelės klampos (Yaqoob ir kt., 2021). Mažesni cetaniniai skaičiai turintys degalai prasčiau užsiliepsnoja. Didelis sieros kiekis didina emisiją. Klampesni degalai prasčiau išpurškiami ir blogai pasiskirsto degimo kameroje. Dėl degalų fizinių ir cheminių savybių įtakos kinta lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos, efektyvieji variklio rodikliai, deginių emisija ir dūmingumas.

**Tyrimo tikslas** – ištirti antros kartos biodegalais ir padangų pirolizės mišiniais dirbančio dyzelinio variklio darbo ir deginių emisijos rodiklius, esant įvairiems apkrovų režimams.

Išsikeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Paruošti tyrimų įrangą ir metodiką.
2. Atlikti biodegalais ir padangų pirolizės mišiniais dirbančio dyzelinio variklio darbo rodiklių matavimus.
3. Įvertinti biodegalais ir padangų pirolizės mišiniais dirbančio dyzelinio variklio deginių emisijos rezultatus.

## Tyrimų objektas ir metodai

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Inžinerijos fakulteto Mechanikos, energetikos ir biotechnologijų inžinerijos katedros variklių bandymo laboratorijoje. Tyrimams naudotas tiesioginio įpurškimo, vieno cilindro dyzelinis variklis „ORUVA F1L511“. Tyrimo metu matuojama: variklio degalų sąnaudos, oro sąnaudos, sukimo momentas, deginių emisijos ir dūmingumas. Variklio apkrovos charakteristikos registruotos esant pastoviems alkūninio veleno sukiamams  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ . Variklis buvo apkraunamas skirtingomis apkrovomis, išlaikant tokias pat apkrovas prie visų bandomų degalų.

Tūrinės oro sąnaudos išmatuotos turbininiu dujų skaitikliu „Gazomierz Turbinowy CGT-02“. Degalų sąnaudos matuotos sveriant elektroninėmis „SK-1000“ svarstyklėmis, registruojant laiką, per kurį variklis sunaudojo 50 g degalų.

Siekiant įvertinti antros kartos biodegalų (HVO), naudotų pirolizės aliejaus (PPA) ir jų mišinių įtaką variklio darbo ir deginių emisijos rodikliams, buvo paruošti PPA ir HVO mišiniai. Naudoti degalų mišiniai buvo sumaišyti pagal tūrį. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoti degalai ir jų mišiniai pateikti 1 lentelėje. Naudotų degalų fizinės ir cheminės savybės pateiktos 2 lentelėje.

**1 lentelė.** Tyrimams naudoti degalai ir jų mišiniai

**Table 1.** Fuels and mixtures of fuels used for research

Degalai ir jų mišiniai	HVO kiekis vol %	PPA kiekis vol %
HVO	100	0
PPA15	15	85
PPA30	30	70
PPA60	60	40
PPA	0	100

**2 lentelė.** Naudotų degalų fizinės ir cheminės savybės

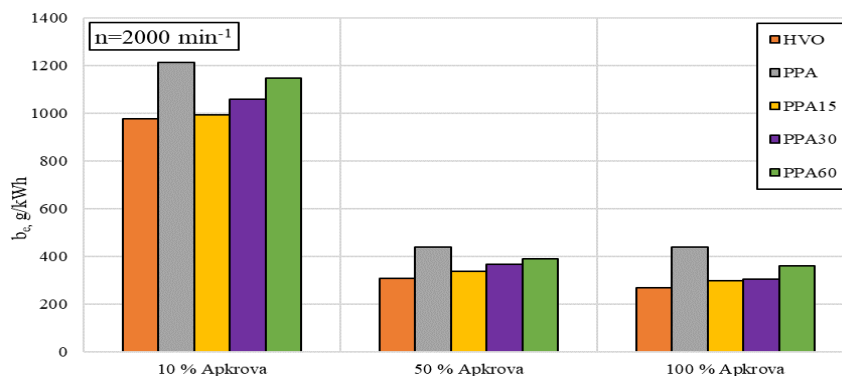
**Table 2.** Properties of tyre pyrolysis oil, HVO fuel

Savybių rodikliai	Vertinimo metodas	PPA	HVO
Tankis esant 15°C, kg/m <sup>3</sup>	EN ISO 12185:1999	917	779,8
Kinematinė klampa, mm <sup>2</sup> /s	EN ISO 3104+AC:2000 at 40 °C	3,77	2,92
Pliūpsnio temperatūra atvirame tiglyje (FP), °C	EN ISO 2719:2000	43	79,5
Stechiometrinis oro ir degalų santykis, kg/kg	-	13,46	15,1
Žemutinis šilumingumas, MJ/kg	EN ISO 8217:2012	40,49	43
Cetatinis skaičius	EN ISO 5165:1999	39,94	78,9
Anglis (%)		86,68	84,6
Vandenilis (%)		10,49	15,39
Deguonis (%)		1,29	-
Azotas (%)		0,48	-
Siera (%)		0,84	-

Anglies viendeginiui (CO), azoto viendeginiui (NO), azoto dvideginiui (NO<sub>2</sub>) ir azoto oksidui (NO<sub>x</sub>) emisijai išmatuoti naudotas „Testo 350 XL“ deginių analizatorius. Deginių dūmingumas buvo matuojamas „Bosch RTT 100/RTT 110“ deginių skaidrumo matuokliu.

## Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

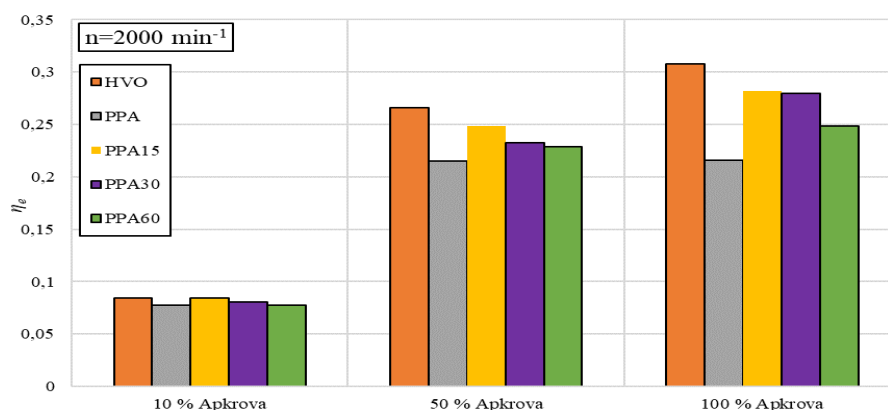
Degimo proceso rodiklių pokyčiai turi įtakos ir variklio ekonomiškumui. 1 pav. pateiktos lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos ( $b_e$ ) varikliui veikiant skirtingomis apkrovomis.



**1 pav.** Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų ( $b_e$ ) priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingas degalais ir jų mišiniais  
**Fig 1.** Brake specific fuel consumption ( $b_e$ ) dependence of engine load when the engine was running on different fuels and their mixtures

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad mažiausias  $b_e$  gautas naudojant HVO degalus. Esant maksimaliai variklio apkrovai, lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų skirtumas didėjant padangų pirolizės aliejaus kiekiui mišinyje padidėja 11,4–34,5 %. Variklį maitinant grynu padangų pirolizės aliejumi, lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos padidėja ~ 63,8 %. Tai galima paaiškinti tuo, kad padangų pirolizės aliejus pasižymi mažesniu degalų šilumingumu ir didesniu tankiu. Šie rezultatai sutampa su kitų mokslininkų (Yaqoob ir kt., 2021) rezultatais.

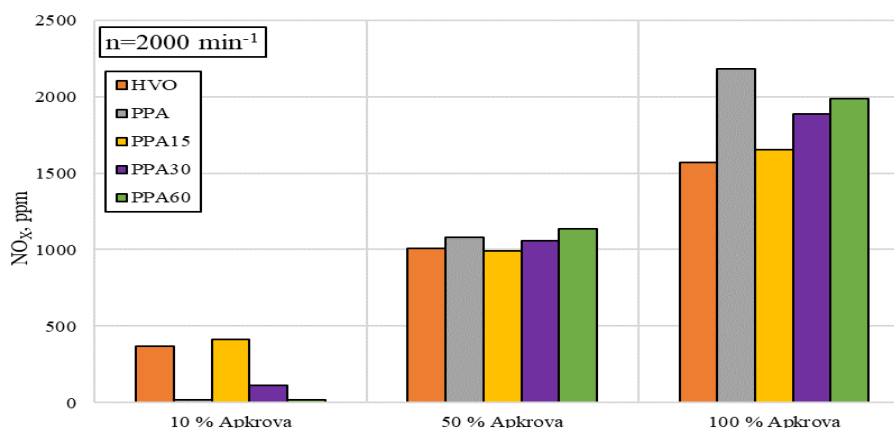
2 pav. pateikta efektyviojo naudingumo koeficiento priklausomybė ( $\eta_e$ ) nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingos sudėties degalais. Iš pateiktų grafikų matyti, kad didžiausias variklio efektyviojo naudingumo koeficiento sumažėjimas gautas esant mažoms variklio apkrovoms. Visose variklio darbo apkrovose padangų pirolizės aliejumi maitinamo variklio efektyvusis naudingumo koeficientas buvo mažesnis, lyginant su HVO degalais. Didžiausias padidėjimas (0,3) gautas varikliui veikiant grynais biodegalais, esant pilnai (100 %) variklio apkrovai. Naudojant PPA15, PPA30 ir PPA60 degalų mišinius, efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėjo 9,2 %, 10,1 % ir 23,9 % atitinkamai, palyginti su HVO degalais varomu varikliu, esant toms pačioms variklio darbo sąlygoms.



**2 pav.** Efektyviojo naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingais degalais ir jų mišiniais  
**Fig 2.** Brake thermal efficiency dependence of engine load when the engine was running on different fuels and their mixtures

Bendroji azotų oksidų emisija susideda iš azoto viendeginio ir azoto dvideginio. Tai yra bendras azoto ir deguonies junginių pavadinimas. Azoto oksidai susidaro visų degimo procesų metu, kuriuose dalyvauja oras, vykstant gretutinėms reakcijoms su ore esančiu azotu. Iš grafiko matyti, kad bendroji azoto oksidų ( $\text{NO}_x$ ) emisija didėjo, didėjant variklio apkrovai (žr. 3 pav.). Didžiausia  $\text{NO}_x$  emisijos reikšmė (2182 ppm) gaunama variklį maitinant padangų pirolizės aliejumi. Varikliui dirbant pilnos apkrovos režimu, degalų mišiniai PPA15, PPA30 ir PPA60 bendrąją azoto oksidų emisiją didino 5,3 %, 20 % ir 26,4 % atitinkamai, lyginant su HVO degalais. Gauti rezultatai iš esmės sutampa su kitų mokslininkų, tyrusių padangų pirolizės aliejaus įtaką vidaus degimo variklio darbo ir deginių emisijos rodikliams, rezultatais. Autoriai teigia, kad  $\text{NO}_x$  emisija gali didėti dėl didesnio azoto ir sieros kiekio esančio padangų pirolizės aliejuje (Kumaravel ir kt., 2016).

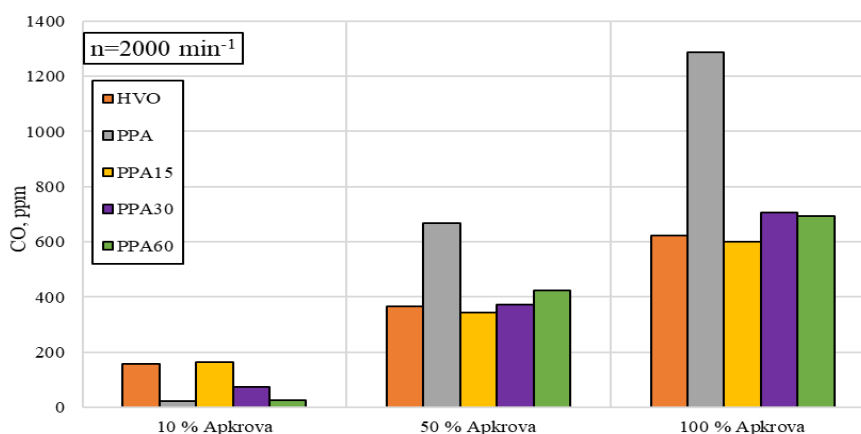
Anglies viendeginio emisijos priklausomybė nuo apkrovos pateikta 4 pav. Kaip matyti grafike, varikliui veikiant maža apkrova (10 %), anglies viendeginio (CO) emisija, naudojant gryną padangų pirolizės aliejų (PPA) buvo mažesnė, lyginant su HVO degalais, maitinamu varikliu.



**3 pav.** Azoto oksidų emisijos priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingais degalais ir jų mišiniais  
**Fig 3.** Nitrogen oxide emissions dependence of engine load when the engine was running on different fuels and their mixtures

Esant vidutinei apkrovai (50 %), panaudojus padangų pirolizės aliejaus mišinius PPA30 ir PPA60, anglies viendeginio emisija padidėjo atitinkamai 1,1 % ir 15,5 %. Varikliui veikiant pilna apkrova, didžiausia anglies viendeginio CO emisija buvo gauta variklį maitinant padangų pirolizės aliejumi. Tame pačiame apkrovos režime naudojant padangų pirolizės aliejaus mišinį PPA60, anglies viendeginio emisija buvo 11,1 % didesnė, negu naudojant grynus HVO degalus.

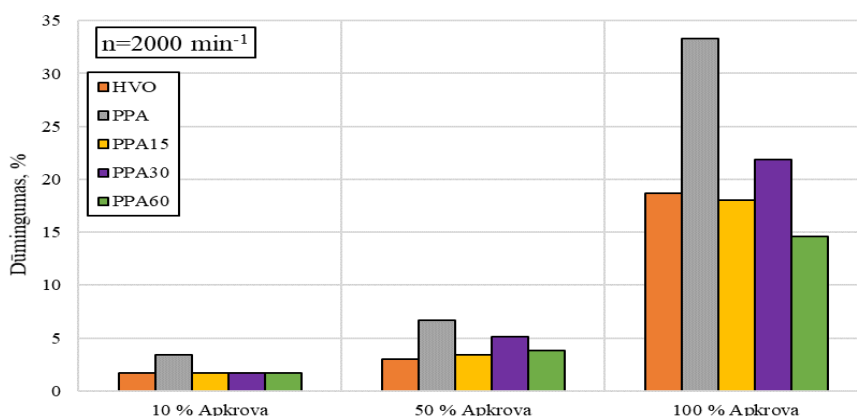
Mikulski ir kt. (2021) teigia, kad CO emisija gali didėti dėl mažesnio PPA degaluose esančio cetaninio skaičiaus, dėl kurio vėluoja degimas, kurioje nepilnai sudeginami degalai.



**4 pav.** Anglies viendeginio emisijos priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingais degalais ir jų mišiniais

**Fig 4.** Carbon monoxide emissions dependence of engine load when the engine was running on different fuels and their mixtures

Antros kartos biodegalais ir padangų pirolizės aliejaus mišiniais PPA15, PPA30 ir PPA60 veikiančio variklio išmetamųjų deginių dūmingumas pateiktas 5 pav. Grafikuose matyti, kad didžiausią reikšmę deginių dūmingumui turėjo variklio apkrova. Varikliui veikiant maža apkrova (10 %), didžiausią deginių dūmingumą generavo padangų pirolizės aliejus.



**5 pav.** Dūmingumo priklausomybė nuo apkrovos, varikliui dirbant skirtingais degalais ir jų mišiniais

**Fig 5.** Smoke dependence of engine load when the engine was running on different fuels and their mixtures

Esant vidutinei apkrovai (50 %), variklį maitinant padangų pirolizės aliejaus PPA15 mišiniu dūmingumas padidėjo 13,3 %, lyginant su HVO degalais. Pilnos apkrovos režime didžiausias dūmingumas gautas variklį maitinant padangų pirolizės aliejumi. HVO degalų sudėtyje nėra policiklinių angliavandenilių ir sieros, o tai galėjo daryti įtaką mažesniai dūmingumui. Gauti dūmingumo rezultatai sutampa su daugelio mokslininkų atliktų tyrimų rezultatais. Yaqoob ir kt. (2021) teigia, kad dūmingumą lemia skirtingų fizinių ir cheminių savybių turintys degalai.

## Išvados

1. Varikliui dirbant maža (10 %) apkrova, mažiausios (977,72 g/kWh) lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos gautos varikliui veikiant antros kartos biodegalais, o didžiausios (1212,77 g/kWh) – padangų pirolizės aliejaus.
2. Esant vidutinei (50 %) variklio apkrovai, panaudojus antros kartos biodegalus, variklio efektyvūs naudingumo koeficientas gautas 23,4 % didesnis, negu padangų pirolizės aliejaus.
3. Varikliui dirbant žemos (10 %) apkrovos režimu, mažiausia (22 ppm) anglies viendeginio emisija gauta varikliui veikiant padangų pirolizės aliejumi.
4. Esant pilnai (100 %) variklio apkrovai didžiausią (2182 ppm) azoto oksidų emisiją generavo padangų pirolizės aliejumi veikiantis variklis.
5. Varikliui dirbant pilnos (100 %) apkrovos režime HVO degalais veikiantis variklis dūmijo 78,1 % mažiau, palyginus su PPA degalais.

## Literatūra

1. Bi, R., Zhang, Y., Jiang, X., Yang, H., Yan, K., Han, M., ... & Xiang, S. 2022. Simulation and techno-economical analysis on the pyrolysis process of waste tire. *Energy*, Vol. 260, 125039.

2. Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Jamil, M. A., Gulzar, M. 2021. Potential of tire pyrolysis oil as an alternate fuel for diesel engines: A review. *Journal of the Energy Institute*, Vol. 96, p. 205–221.
3. 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.
4. Mikulski, M., Ambrosewicz-Walacik, M., Hunicz, J., & Nitkiewicz, S. 2021. Combustion engine applications of waste tyre pyrolytic oil. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 85, 100915.
5. Pinto, G. M., De Souza, T. A. Z., Da Costa, R. B. R., Roque, L. F. A., Frez, G. V., & Coronado, C. J. R. 2023. Combustion, performance and emission analyses of a CI engine operating with renewable diesel fuels (HVO/FARNESANE) under dual-fuel mode through hydrogen port injection. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48(51), p. 19713–19732.
6. Smigins, R., Sondors, K., Pirs, V., Dukulis, I., Birzietis, G. 2023. Studies of Engine Performance and Emissions at Full-Load Mode Using HVO, Diesel Fuel, and HVO5. *Energies*, Vol. 16(12), p. 4785.

## **INVESTIGATION OF ENGINE PERFORMANCE INDICATORS AND EMISSIONS CHARACTERISTICS OF SECOND GENERATION BIOFUELS AND TYRE PYROLYSIS OIL BLENDS**

### **Summary**

The article analyses the influence of second-generation biofuels and tires pyrolysis oil and their mixtures, on the indicators of diesel engine performance and exhaust emissions. Experimental studies were carried out with a single-cylinder, four-stroke, air-cooled, direct injection diesel engine. Second-generation biofuels (HVO), tyre pyrolysis oil (PPA) and their PPA15, PPA30, and PPA60 blends were used in the studies. During the test, the operating parameters of the engine were measured: the frequency of rotation of the crankshaft, engine air consumption, fuel consumption, engine torque, exhaust emissions and smokiness of gases.

After analysing the results obtained during the experimental study, it was noted that in addition to all load modes, the lowest fuel consumption was obtained when the engine was running on HVO fuel. When the engine was running at full load, the lowest emissions of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) were obtained when the engine was running on pure second-generation biofuels (1571 ppm). When the engine was running at full load, the maximum carbon monoxide (CO) emission (1288 ppm) was obtained by powering the engine with PPA fuel. When the engine was running in full load mode, the HVO-fuelled engine smoked 78.1% less compared to tire pyrolysis oil.

**Keywords:** tire pyrolysis oil, second-generation biofuels, emissions, smoke.