

BIODEGALŲ ĮTAKOS ĮPURŠKIMO CHARAKTERISTIKOMS SKAITINIS IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Paulius BENDŽIŪNAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: paulius.bendziunas@vdu.lt

Stasys SLAVINSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: stasys.slavinskas@vdu.lt

Santrauka

Straipsnyje analizuojama hidrinto augalinio aliejaus (HVO) ir rapsų aliejaus metilo esterio (RME) įtaka dyzelinio variklio „Common Rail“ degalų įpurškimo charakteristikoms. Tyrimo tikslas – sukurti ir eksperimentiškai validuoti elektromagnetinio purkštuvu matematinį modelį bei įvertinti biodegalų fizinių savybių poveikį įpurškimo procesui. Skaitinis modeliavimas atliktas MATLAB Simscape aplinkoje, taikant izoterminį hidraulinį modelį, pagrįstą masės ir energijos tvermės bei skysčių dinamikos lygtimis. Modelio parametrai nustatyti remiantis purkštuvu vidinės geometrijos matavimais ir literatūriniais degalų savybių duomenimis. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Bosch metodu, tiriant mineralinio dyzelino, HVO ir RME įpurškimą esant 60–180 MPa slėgiams ir skirtingoms valdymo impulsų trukmėms. Vertintos įpurškimo greičio, trukmės ir ciklinio degalų kiekio charakteristikos. Gauti rezultatai parodė gerą skaitinių ir eksperimentinių duomenų atitiktį – daugeliu atvejų santykiniai nuokrypiai neviršijo $\pm 5\%$. Nustatyta, kad RME dėl didesnio tankio ir klampos didina įpurškimo trukmę ir ciklinį įpurškimą kiekį, o HVO charakteristikos išlieka artimos mineraliniam dyzelinui. Tyrimas patvirtino, kad sukurtas modelis gali būti taikomas biodegalų įtakos įpurškimo proceso vertinimui bei dyzelinių variklių maitinimo sistemų optimizavimui.

Reikšminiai žodžiai: biodyzelinas, HVO, dyzeliniai degalai, Common rail, įpurškimas, purkštukas.

Įvadas

Šiuo metu daugiau kaip 80 % pasaulinės energijos gaunama iš iškastinio kuro, pavyzdžiui, naftos, anglies ir gamtinių dujų (Hosseini et al., 2023). Vienas iš pagrindinių iš naftos perdirbimo gaunamų degalų yra dyzelinas. Dėl didelės galios ir efektyvumo dyzeliniai varikliai yra vis dar plačiai naudojami transporte ir kitose srityse (Meng et al., 2023).

Didėjant dyzelinių transporto priemonių skaičiui visame pasaulyje, auga ir iškastinio kuro paklausa. „BP Statistical Review of World Energy Statistics“ duomenimis, 2021 m. pasaulinis naftos suvartojimas padidėjo apie 632 mln. litrų per dieną, o dyzelino suvartojimas – 155 mln. litrų per dieną (Energy, 2022). Tuo pat metu didėjant sunaudojamam degalų kiekiui didėja susirūpinimas dėl dyzelinių variklių išmetamų azoto oksidų (NOx) ir kietųjų dalelių (PM) daromo poveikio aplinkai ir žmonių sveikatai (Ooi et al., 2018).

Todėl viena iš pagrindinių Europos Sąjungos strategijų, siekti mažinti energijos vartojimą ir aplinkos taršą, t.y. naftinį dyzeliną pakeičiant atsinaujinančiais biodegalais (Karavalakis ir kt., 2009). Remiantis Tarptautinės energetikos agentūros duomenimis, biodegalų paklausa turėtų padidėti beveik 50 % iki 2030 m. (Renewables, 2025).

Tačiau biodegalams būdingos skirtingos fizikinės ir cheminės savybės, kurios daro reikšmingą įtaką įpurškimo charakteristikoms, o šios lemia variklio darbą ir susidarančių kenksmingų emisijų kiekį (Al-Dawody et al., 2022).

Siekdami išsiaiškinti degalų įpurškimo procesą, kuriami skaitiniai matematiniai modeliai, kurie atkartoja realius įpurškimo procesus. Šių modelių panaudojimas leidžia taupyti laiką ir padėti pagerinti įpurškimo procesą, variklio darbą naudojant įvairius degalus (Marčič et al., 2015).

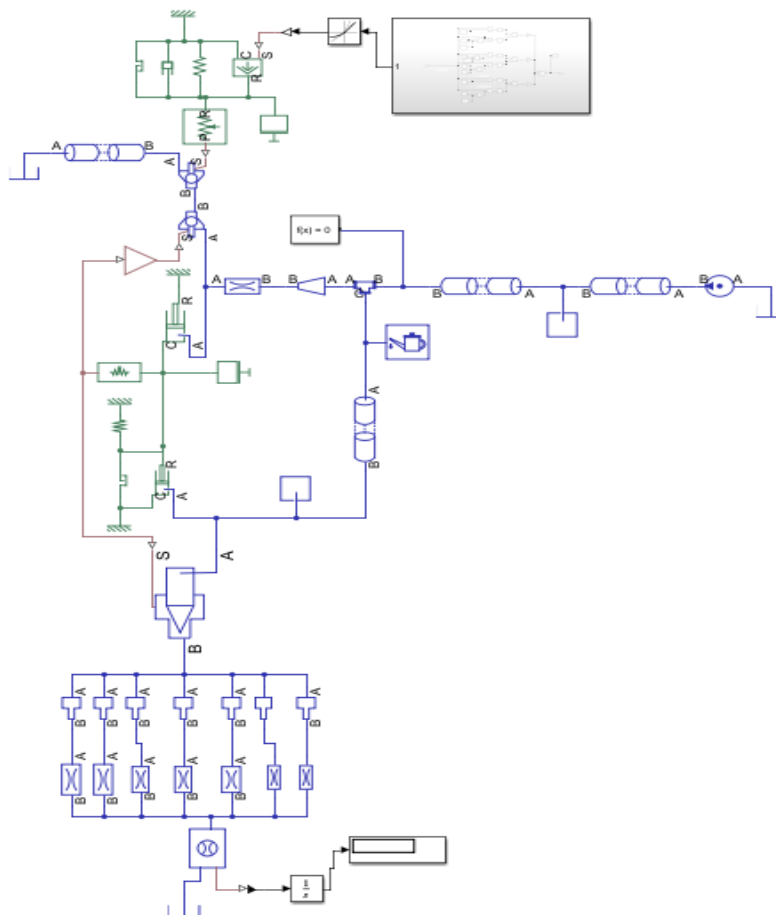
Tyrimo tikslas – ištirti hidrinto augalinio aliejaus ir rapsų aliejaus metilo esterio poveikį degalų įpurškimo charakteristikoms.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Teoriniams tyrimams sukurti matematinį modelį ir atlikti skaitinius tyrimus.
2. Atlikti modelio validavimą.
3. Atlikti rapsų aliejaus metilo esterio ir hidrinto augalinio aliejaus įtakos degalų įpurškimo charakteristikoms eksperimentinius tyrimus;
4. Įvertinti biodegalų poveikį įpurškimo charakteristikoms.

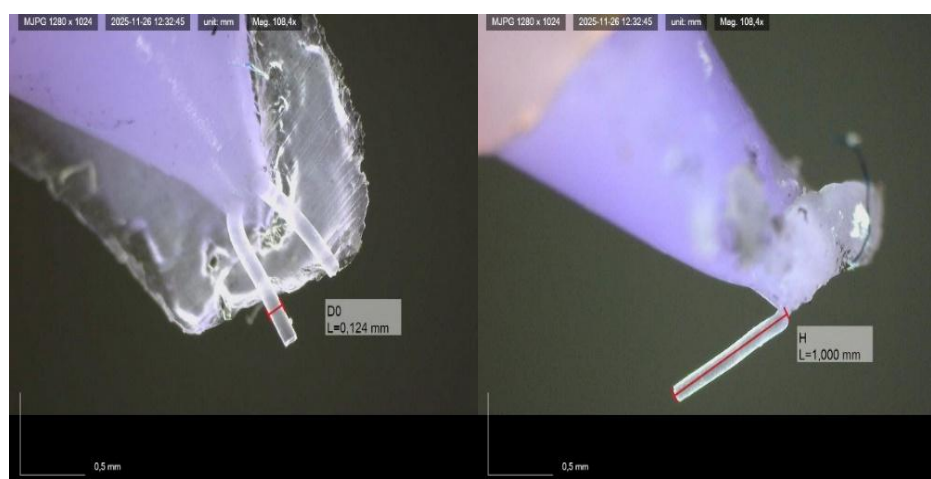
Tyrimų objektas ir metodai

Įpurškimo proceso skaitinis modeliavimas buvo atliekamas MATLAB programa (R2024b versija) Simscape aplinkoje. MATLAB Simscape priemonė, skirta fizinių sistemų modeliavimui, kai sistema aprašoma fizikiniais komponentais, o jos elgsena apskaičiuojama sprendžiant diferencialines lygtis. Simscape modeliavimo blokai paremti energijos ir masės tvermės lygtimis, taikomomis mechaniniams ir hidrauliniais elementams. Dėl modelio supaprastinimo šiame darbe taikomas izoterminis hidraulinis modelis. 1 paveiksle pateiktas sumodeliuotas elektromagnetu valdomo purkštuvu modelio schema.



1 pav. Elektromagnetinio purkštuko skaitinio modelio schema
Fig. 1. Numerical model scheme of the electromagnetic injector

Remiantis V. Macian ir kt. (2006), buvo pritaikyta silikono formavimo metodika, kuri leido tiksliai išmatuoti Bosch CR 2.2 (0445110256) purkštuko ir DLLA156P1509 purkštuko vidaus geometrijos parametrus, įskaitant purkštuko ertmių skersmenį, ilgį ir esminius parametrus, taip užtikrinant detalius vidinių geometrijų duomenis tolimesniam modelio kūrimui. Matavimai buvo atlikti naudojant Dino-Lite AM4815ZT mikroskopą ir DinoCapture programinę įrangą.



2 pav. Purkštuko vidaus geometrinių parametrų matavimas
Fig. 2. Determination of the internal geometric parameters of the nozzle

Šie parametrai apibrėžia purkštuko geometrines charakteristikas, judančių komponentų dinamines savybes bei kitas ypatybes, turinčias tiesioginę įtaką kuro įpurškimo procesui ir jo tikslumui.

Modeliui sudaryti įvedant degalų savybių reikšmes buvo pasinaudota kitų mokslininkų gautų tyrimų rezultatų skaičiavimais (Labeckas ir kt. (2017); Nikolic et al. (2012); Boehman et al. (2004)).

1 lentelė. Purkštuvo pagrindinių komponentų parametrai

Table 1. The parameters of the main components of the injector

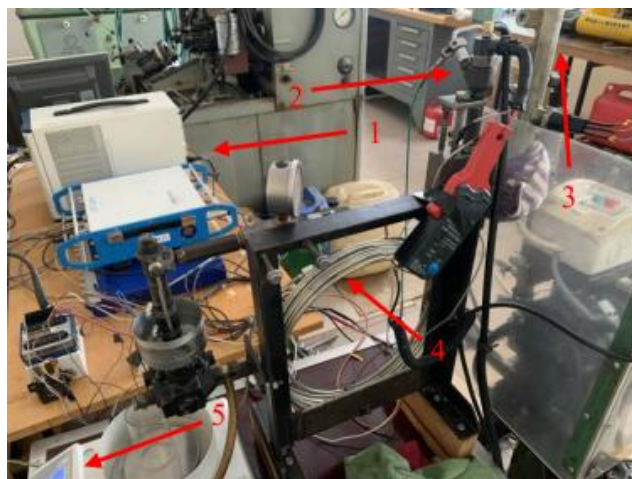
Parametro pavadinimas <i>Parameter name</i>	Parametro reikšmė ir matavimo vienetai <i>Parameter and units of measurement</i>
Purkštuko skylių skaičius N_{skyl} <i>Number of nozzle holes N_{skyl}</i>	7 vnt.
Purkštuko skylutės skersmuo D_0 <i>Nozzle hole diameter D_0</i>	0,124 mm
Skylutės ilgis H <i>Hole length H</i>	1 mm
Maksimali adatos eiga <i>Maximum needle lift</i>	0,42 mm
Valdymo kameros tūris <i>Control chamber volume</i>	4,42 mm ³
Purkštuko kūgio kampas <i>Nozzle cone angle</i>	60°
Purkštuko adatos lizdo skersmuo ties įpurškimo skylutėmis <i>Nozzle needle seat diameter at the injection holes</i>	0,42 mm
Judančių komponentų ir 1/3 spyruoklės masė <i>Mass of moving components and 1/3 of the spring</i>	15,044 g

2 lentelė. Tyrime naudotų degalų savybės reikalingos skaitiniam modeliui charakterizuoti

Table 2. The properties of the fuels used in the study to characterize the numerical model

Degalai <i>Fuels</i>	Tankis, kg/m ³ <i>Density, kg/m³</i>	Kinematinė klampa, cSt <i>Kinematic viscosity, cSt</i>	Tampumo modulis, Pa <i>Bulk modulus, Pa</i>
DD	832,7	2,13	1,53·10 ⁹
RME	883,6	4,444	1,73·10 ⁹
HVO	779,8	2,919	1,43·10 ⁹

Eksperimentinio tyrimo metu buvo naudojama didelio slėgio Common Rail degalų įpurškimo sistema. Degalų įpurškimo charakteristikos buvo tiriamas Bosch metodu (Bower et al. 1991). Tyrime naudoti degalai buvo įpurškiami skirtingais slėgiais: 60 MPa, 120 MPa, 180 MPa. Matavimo kameroje pasirinktas priešslėgis buvo 6 MPa. Purkštuvas buvo atidaromas 0,6 ms, 0,8 ms, 1,0 ms, 1,2 ms, 1,4 ms ir 1,6 ms trukmės valdymo impulsais 24,0 A srovės piku, o palaikymo srovės stipris buvo 13,0 A.



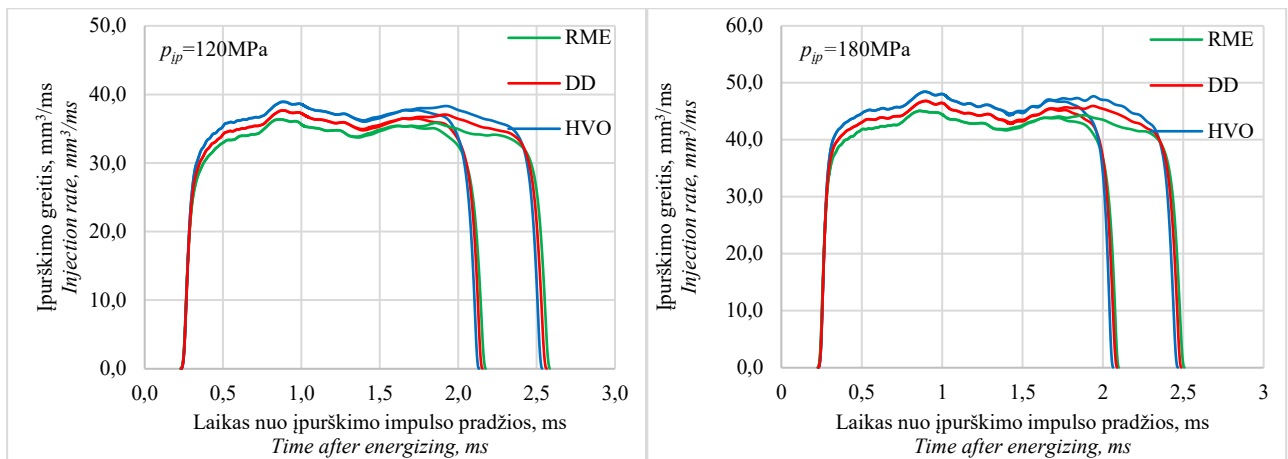
3. pav. Degalų įpurškimo tyrimo standas: 1 – duomenų rinkimo sistema; 2 – purkštuvas; 3 – CR degalų akumulatorius; 4 – matavimo vamzdelis; 5 – matavimo svarstyklės.

Fig. 3. Schematic view of fuel injection testing stand: 1 – data acquisition system; 2 – injector; 3 – common rail; 4 – measuring tube; 5 – precision scale

Tyrimo metu buvo renkami 300 vienas po kito sekančių ciklinių įpurškimų duomenų ir apskaičiuotas vidurkis. Atliekant surinktų duomenų rezultatų analizę buvo įvertinama įpurškimų charakteristikos: įpurškimo greičio, masės ir tūrio cikliniai degalų įpurškimo kiekiai, įpurškimo, uždelsimo periodas, slėgio bangos greitis.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

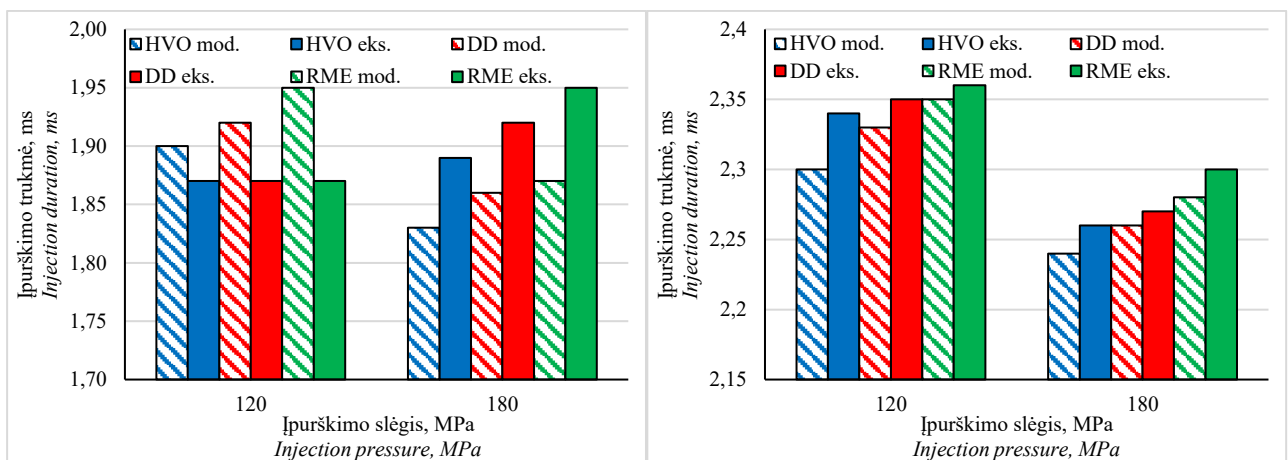
4 paveiksle pavaizduotos skaitinio tyrimo metu gautos įpurškimo greičio charakteristikos, esant 1,0 ms ir 1,4 ms įpurškimo impulso trukmėms bei 120 MPa ir 180 MPa įpurškimo slėgiui.



4 pav. Degalų tūriniai įpurškimo greičiai naudojant teorinį modelį esant 120 MPa ir 180 MPa įpurškimo slėgiams bei 1,0 ms ir 1,4 ms purkštuko sužadinimo trukmei

Fig. 4. Volumetric fuel injection rates obtained using the numerical model at injection pressures of 120 MPa and 180 MPa and injector energizing durations of 1.0 ms and 1.4 ms

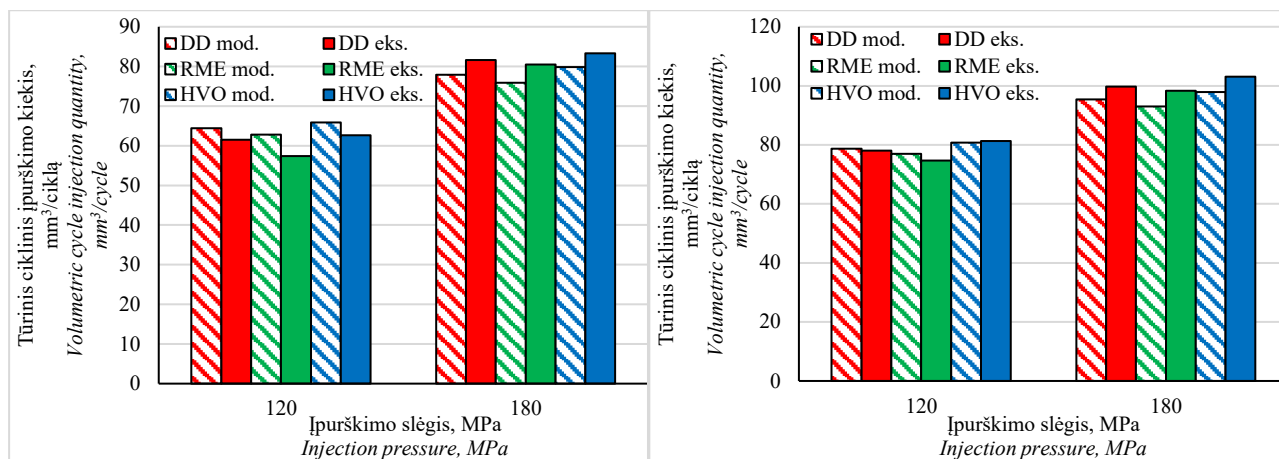
Atliekant skaitinį įpurškimo proceso modeliavimą nustatyta, kad esant 120 MPa įpurškimo slėgiui ir 1,0 ms valdymo impulso trukmei, įpurškimo greičio kreivių pobūdis ir jų tarpusavio išsidėstymas iš esmės atitinka eksperimentinių tyrimų rezultatus. RME degalų maksimalus įpurškimo greitis buvo 3,45 % mažesnis nei dyzelinių degalų (DD), o naudojant HVO degalus užfiksuotas 3,18 % didesnis maksimalus įpurškimo greitis, palyginti su DD. Padidinus įpurškimo slėgį iki 180 MPa ir išlaikius 1,0 ms impulso trukmę, stebėtos analogiškos tendencijos. RME degalų atveju maksimalus įpurškimo greitis buvo 3,63 % mažesnis nei DD, o HVO degalų – 3,42 % didesnis. Tai rodo, kad didėjant slėgiui išlieka ta pati degalų tarpusavio įpurškimo greičio priklausomybė. Pailginus valdymo impulso trukmę iki 1,4 ms tiek prie 120 MPa, tiek prie 180 MPa slėgio, maksimali įpurškimo greičio reikšmė iš esmės nekito, RME įpurškimo greitis buvo apie 3,5–3,6 % mažesnis, o HVO – apie 3,2–3,4 % didesnis nei DD. Kitaip tariant, impulso trukmės didinimas turėjo įtakos įpurškimo trukmei, bet ne didžiausiam greičio vertei.



5 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimo įpurškimo trukmės charakteristikos, kai valdymo impulso trukmė 1 ms ir 1,4 ms

Fig. 5. Injection duration characteristics from experimental and numerical investigations at control pulse durations of 1 ms and 1.4 ms

Esant 120 MPa įpurškimo slėgiui ir 1 ms impulso trukmei, modeliu apskaičiuotos įpurškimo trukmės visais atvejais buvo didesnės nei eksperimentiškai nustatytos. HVO degalų atveju nuokrypis siekė 1,6 %, dyzelinių degalų – 2,7 %, o didžiausias skirtumas nustatytas RME degalams – 4,3 % lyginant skaitinio ir eksperimento tyrimo rezultatus. Padidinus įpurškimo slėgį iki 180 MPa ir išlaikius 1 ms impulso trukmę, nustatyta priešinga tendencija – modelio rezultatai tapo mažesni už eksperimentinius. HVO degalams skirtumas sudarė 3,2 %, dyzeliniams – 3,1 %, o RME – 4,1 %. Padidinus impulso trukmę iki 1,4 ms, modelis išlaikė tas pačias bendrąsias įpurškimo trukmės kitimo tendencijas, tačiau skirtumai tarp modelio ir eksperimento reikšmingai sumažėjo. Esant 120 MPa slėgiui, nuokrypiui neviršėjo 1,7 %, o esant 180 MPa – 0,9 %. Modelis pakankamai tiksliai atspindi įpurškimo trukmės priklausomybę nuo slėgio ir impulso trukmės, nors didžiausi neatitikimai nustatyti RME degalų atveju.



6 pav. Eksperimentinio ir skaitinio tyrimo tūrinio ciklinio įpurškiamų degalų kiekio charakteristikos, kai valdymo impulso trukmė 1 ms ir 1,4 ms

Fig. 6. Characteristics of the volumetric cyclic injected fuel quantity from experimental and numerical investigations at control pulse durations of 1 ms and 1.4 ms

Esant 120 MPa įpurškimo slėgiui ir 1 ms impulso trukmei, modeliu apskaičiuotas įpurškimo kiekis visiems degalams buvo didesnis nei eksperimentiškai nustatytas. Nuokrypis siekė apie 4,7 % dyzeliniams degalams, 5,3 % HVO ir 9,4 % RME, todėl mažesnio slėgio režime modelis linkęs tiekti didesnę įpurškiamą kiekį, ypač didesnio tankio ir klampios degalams. Padidinus slėgį iki 180 MPa, rezultatai tapo artimesni eksperimentiniams, tačiau daugeliu atvejų modelis jau prognozavo mažesnes reikšmes. Nuokrypis sudarė apie 4,5 % dyzeliniams degalams, 4,2 % HVO ir 5,7 % RME. Pailginus impulso trukmę iki 1,4 ms ir esant 120 MPa slėgiui, modelio ir eksperimento skirtumai reikšmingai sumažėjo ir neviršijo 3,1 %, o kai kuriais atvejais buvo mažesni nei 1 %. Tačiau padidinus slėgį iki 180 MPa, neatitiktimai vėl išaugo ir siekė apie 4–5 % visiems degalams. Apibendrinant galima teigti, kad modelis pakankamai gerai prognozuoja įpurškiamų degalų kiekio kitimą didėjant impulso trukmei, tačiau jo tikslumas labiau priklauso nuo įpurškimo slėgio ir degalų fizinių savybių.

Įvertinant maksimalaus įpurškimo greičio santykinius nuokrypius tarp modelio ir eksperimentinių duomenų, matyti, kad modelis pakankamai tiksliai atkuria įpurškimo greičio dydžius. Esant 120 MPa įpurškimo slėgiui ir 1 ms impulso trukmei, modelis pateikia mažesnes maksimalaus įpurškimo greičio reikšmes nei nustatytos eksperimentiškai: DD – 4,6 %, RME – 2,2 %, BTL – 3,0 %. Pailginus impulsą iki 1,4 ms, nuokryptai sumažėja ir neviršija 2,3 %, todėl ilgesnė impulso trukmė leidžia tiksliau aprašyti nusistovėjusį srautą. Padidinus slėgį iki 180 MPa, ši tendencija išlieka. Esant 1 ms impulsui, skirtumas siekia apie 1,7 % DD, 3,6 % RME ir 3,0 % BTL degalams. Esant 1,4 ms trukmei, nuokryptai išlieka panašūs – apie 2,8–3,4 %.

Apibendrinus įpurškimo trukmės, maksimalaus įpurškimo greičio ir tūrinio ciklinio įpurškiamo kiekio palyginimus, galima teigti, kad taikomas modelis teisingai atkuria pagrindines įpurškimo proceso tendencijas skirtingiems degalams, įpurškimo slėgiams ir impulso valdymo trukmėms. Lyginamųjų charakteristikų nuokryptai daugeliu atvejų neviršija ± 5 %, o tai laikytina pakankamu tikslumu modelio validavimui.

Išvados

- Sukurtas izoterminis elektromagnetinio purkštuvų matematinis modelis, paremtas masės ir energijos tvermės bei skysčių dinamikos lygtimis, tinkamai atkuria pagrindines degalų įpurškimo proceso charakteristikas.
- Didžiausias maksimalaus įpurškimo greičio skirtumas tarp modelio ir eksperimento siekia 4,6 % naudojant DD prie mažesnio 120 MPa įpurškimo slėgio ir trumpesnės 1 ms impulso trukmės, mažiausias skirtumas gautas naudojant RME degalus prie 120 MPa įpurškimo slėgio ir ilgesnės 1,4 ms impulso trukmės ir siekia 0,3 %.
- Modelis prie 120 MPa įpurškimo slėgio ir 1 ms impulso trukmės pateikia didesnę įpurškimo trukmę nuo 1,6 % iki 4,3 % nei eksperimentas, o padidinus impulsą iki 1,4 ms nuokryptai sumažėja iki 1,7 %, tačiau modelis jau pateikia mažesnes reikšmes. Esant 180 MPa ir 1 ms modelis pateikia mažesnę įpurškimo trukmę nuo 3,1 % iki 4,1 %, padidinus impulsą iki 1,4 ms nuokryptai sumažėja iki 0,9 % lyginant su eksperimento rezultatais.
- Modelio validacija parodė, kad daugeliu atvejų skaitinių ir eksperimentinių rezultatų nuokryptai neviršija ± 5 %, todėl modelis gali būti laikomas pakankamai tikslu įpurškimo procesų analizei ir prognozavimui.

Literatūra

1. Al-Dawody, M. F., Al-Farhany, K. A., Hamza, N. H., & Hamzah, D. A. (2022). Numerical study for the spray characteristics of diesel engine powered by biodiesel fuels under different injection pressures. *Journal of Engineering Research*, 10(1B), 264–289.
2. Boehman, A. L., Morris, D., & Szybist, J. (2004). The impact of the bulk modulus of diesel fuels on fuel injection timing. *Energy & Fuels*, 18(6), 1877–1882. <https://doi.org/10.1021/ef049880j>

3. Bower, G., & Foster, D. (1991). A comparison of the Bosch and Zuech rate of injection meters. *SAE Technical Paper*, 910724. <https://doi.org/10.4271/910724>
4. BP. (2022). BP statistical review of world energy 2022.
5. Hosseini, S. H., Tsolakis, A., Alagumalai, A., Mahian, O., Lam, S. S., Pan, J., Peng, W., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2023). Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 98, Article 101100. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101100>
6. Karavalakis, G., Stournas, S., & Bakeas, E. (2009). Effects of diesel/biodiesel blends on regulated and unregulated pollutants from a passenger vehicle operated over the European and the Athens driving cycles. *Atmospheric Environment*, 43(10), 1745–1752. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.033>
7. Labeckas, G., Slavinskas, S., & Kanapkienė, I. (2017). The individual effects of cetane number, oxygen content or fuel properties on the ignition delay, combustion characteristics, and cyclic variation of a turbocharged CRDI diesel engine – Part 1. *Energy Conversion and Management*, 148, 1003–1027. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.050>
8. Macian, V., Bermúdez, V., Payri, R., & Gimeno, J. (2003). New technique for determination of internal geometry of a diesel nozzle with the use of silicone methodology. *Experimental Techniques*, 27(4), 39–43. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00107.x>
9. Marčič, S., Marčič, M., & Pogačar, Z. (2015). Mathematical model for the injector of a common rail fuel injection system. *Engineering*, 7(6), 307–321. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.76027>
10. Meng, J., Xu, W., Meng, F., Wang, B., Zhao, P., Wang, Z., Ji, H., & Yang, Y. (2023). Effects of waste cooking oil biodiesel addition on combustion, regulated and unregulated emission characteristics of common-rail diesel engine. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 1094–1106. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.065>
11. Nikolić, B., Kegl, B., Marković, S., & Mitrović, M. (2012). Determining the speed of sound, density and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel and diesel fuel. *Thermal Science*, 16(2), 505–514. <https://doi.org/10.2298/TSCI120426187N>
12. Ooi, J. B., Ismail, H. M., Tan, B. T., & Wang, X. (2018). Effects of graphite oxide and single-walled carbon nanotubes as diesel additives on the performance, combustion, and emission characteristics of a light-duty diesel engine. *Energy*, 161, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.062>

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF BIOFUELS ON INJECTION CHARACTERISTICS

Abstract

The article analyzes the influence of hydrotreated vegetable oil (HVO) and rapeseed methyl ester (RME) on the fuel injection characteristics of a diesel engine Common Rail system. The aim of the study was to develop and experimentally validate a mathematical model of an electromagnetic injector and to evaluate the impact of biofuel physical properties on the injection process. Numerical simulations were performed in the MATLAB Simscape environment using an isothermal hydraulic model based on mass and energy conservation and fluid dynamics equations. Model parameters were defined according to injector internal geometry measurements and literature data on fuel properties. Experimental investigations were carried out using the Bosch method, examining the injection of mineral diesel, HVO, and RME at pressures of 60–180 MPa and different control pulse durations. Injection rate, duration, and cyclic fuel quantity were analyzed. The results showed good agreement between numerical and experimental data, with deviations generally within $\pm 5\%$. RME, due to its higher density and viscosity, increased injection duration and cyclic fuel quantity, whereas HVO exhibited characteristics close to mineral diesel. The developed model is suitable for evaluating biofuel effects on the injection process and optimizing diesel fuel systems.

Keywords: biodiesel, diesel, HVO, Common rail, injection, nozzle.