

GAMTINIŲ DUJŲ IR BIODEGALŲ NAUDOJIMO SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIUOSE EFEKTYVUMO TYRIMAS

Vitalij Kabelis, Alfredas Rimkus

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius

Anotacija

Straipsnyje pristatomi slėginio uždegimo variklio, veikiančio dvigubais degalais (dyzelinu ir gamtinėmis dujomis bei antros kartos biodyzelinu ir gamtinėmis dujomis) energetinio ir ekologinio efektyvumo tyrimo rezultatai, keičiant dujų energijos koncentraciją mišinyje ir degalų įpurškimo pradžios momentą. Eksperimentinių tyrimų duomenys skaitinio modeliavimo būdu analizuoti AVL BOOST programa, nustatant pagrindinius degimo proceso rodiklius. Nustatyta biodyzelino ir gamtinių dujų įtaka degimo procesui bei variklio rodikliams, pateiktos rekomendacijos variklio energetinio efektyvumo didinimui.

Reikšminiai žodžiai: slėginio uždegimo variklis, biodyzelinas, gamtinės dujos, energetinis efektyvumas, ekologiniai rodikliai.

Įvadas

Paskutiniu metu ypač didelis dėmesys skiriamas slėginio uždegimo (dyzelinių) variklių keliama taršai. Vieni automobilių gamintojai dėl to atsisako šių variklių naudojimo ateityje, kiti gamintojai ieško būdų, kaip galima būtų modernizuoti esamus variklius, kurti tobulesnes jų maitinimo sistemas. Vienas iš modernizavimo būdų ir yra *Dual fuel* maitinimo sistemų kūrimas ir taikymas, į variklį, kaip papildomus degalus, tiekiant gamtines dujas (GD). Tačiau slėginio uždegimo variklio energetiniai parametrai blogėja į variklį tiekiant didesnę dujų kiekį, nes dujos sumažina į cilindrą patenkančio oro kiekį, dujų ir dyzelino degimo procesas vyksta skirtingai. Siekiant sumažinti šiltnamio dujų emisiją gali būti naudojami alternatyvūs degalai. Dyzelinas gali būti keičiamas biodyzelinu, GD keičiamos biodujomis. Pažymėtina, kad 2009 m. balandžio 23 d. Lietuvoje priimtas teisės aktas 2009/28/EB, dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją. Pagal šią direktyvą Lietuvoje iki 2020 m. biodegalai turi sudaryti ne mažiau kaip 10 % bendro energijos suvartojimo transporto sektoriuje.

Todėl šio tyrimo tikslas yra atlikti slėginio uždegimo variklio, veikiančio įvairiais gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino mišiniais, eksperimentinių tyrimų rodiklių analizę ir skaitinį modeliavimą, optimizuojant mišinio sudėtį, degimo procesą ir siekiant didžiausio energetinio efektyvumo bei mažiausios aplinkos taršos.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino naudojimo slėginio uždegimo variklyje efektyvumo apžvalgą.
2. Atlikti degalų fizinių bei cheminių savybių analizę.
3. Atlikti slėginio uždegimo variklio, veikiančio įvairiais gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino mišiniais, eksperimentinius tyrimus.
4. Atlikti gautų rezultatų analizę skaitinio modeliavimo būdu, AVL BOOST programa, nustatant pagrindinius degimo proceso rodiklius
5. Apibendrinti atliktus eksperimentinius ir teorinius tyrimus ir pateikti išvadas.

Mišrios maitinimo sistemos *Dual fuel* naudojimas slėginio uždegimo variklyje

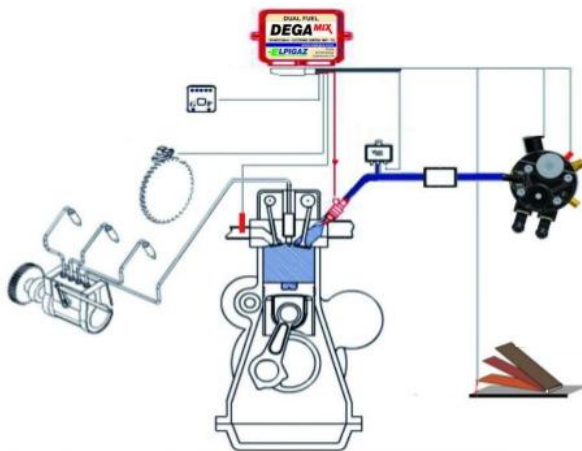
Dual fuel maitinimo sistemos yra skirtos slėginio ir kibirkštinio uždegimo varikliams. Jų dėka galima įvairiomis proporcijomis maitinti variklius skirtingais degalais. *Dual fuel* maitinimo sistemos dažniausiai naudojamos tiekti į variklį dujinius degalus ir yra montuojamos lygiagrečiai gamyklinei maitinimo sistemai, kuri skirta tiekti skystus degalus (1 pav.). *Dual fuel* sistema turi atskirus jutiklius, taipogi ji yra lygiagrečiai prijungiama prie gamyklinės maitinimo sistemos jutiklių, iš kurių gauna informaciją apie variklio sūkius, apkrovą ir paduodamą skystų degalų kiekį. Dujinių degalų kiekis yra reguliuojamas trumpiau ar ilgiau atidarant elektromagnetinius dujų padavimo purkštukus, o dyzelino kiekis gali būti mažinamas emuliuojant akseleratoriaus pedalo padėties jutiklio signalą arba degalų slėgio jutiklio signalą.

Naudojant *Dual fuel* sistemas su papildomai tiekiamomis GD ir keičiant skystų degalų įpurškimo momentą, kiekį ir slėgį, galima smarkiai pakeisti degimo procesą cilindre pagerinant ekologinius ir energetinius variklio rodiklius. (Liu et al., 2013) Dyzelino ir biodyzelino degimo procesas variklyje skiriasi ir maišant šiuos degalus su gamtinėmis dujomis. Galima pagerinti variklio darbo rodiklius, tačiau skystų degalų įpurškimo momento korekcija ne visada turi teigiamą poveikį ir tai priklauso nuo variklio sūkių ir apkrovos. Esant

didesnėms apkrovoms degimo procesas dyzelino ir gamtinių dujų mišiniais veikiančiame variklyje gerėja ir jo teršalų emisijos yra mažesnės nei tik dyzelinu varomo variklio. (Ryu, 2013b) Gamtinės dujos, dėl savo aukšto oktaninio skaičiaus, gali būti naudojamos dideliais kiekiais mišiniuose su dyzelinu slėginio uždegimo varikliuose. Tyrimais nustatyta, kad pirminis dyzelino ar biodyzelino įpurškimas turi vos apie 1 % įtaką variklio galiai bei energetiniam efektyvumui, bet jo pakanka kad būtų uždegtas gamtinių dujų mišinys slėginio uždegimo variklio cilindre ir tai leidžia dyzeliną, ar biodyzeliną pakeisti gamtinėmis dujomis iki 99 %. (Ryu, 2013a)

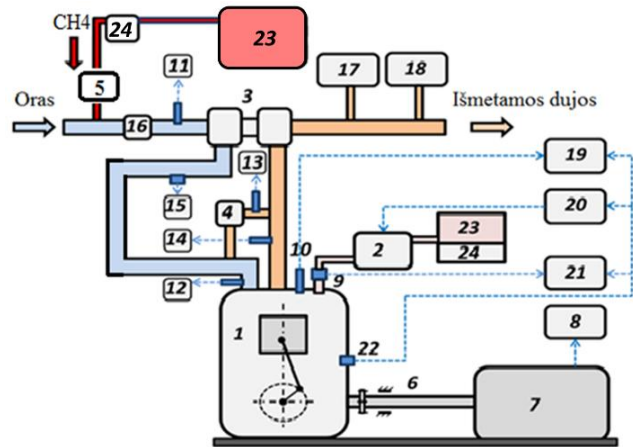
Tyrimų objektas ir metodai

Bandymai atlikti VGTU Automobilių inžinerijos katedros laboratorijoje naudojant slėginio uždegimo variklį 1.9 TDI (1Z), kuriame sumontuotas elektronikos valdomas BOSCH VP37 skirstomojo tipo degalų siurblys ir turbokompresorius (2 pav.). Taipogi šitam varikliui buvo sumontuota dujų maitinimo sistema Dual fuel (Elpigaz - Degamix). Variklio pagrindiniai parametrai pateikti 1 lentelėje.



1 pav. Dual fuel sistema

Šaltinis: Elpigaz



2 pav. Variklio bandymo įranga: 1 – variklis; 2 – aukšto slėgio degalų siurblys; 3 – turbokompresorius; 4 – deginių recirkuliacijos vožtuvas; 5 – dujų purkštuvai; 6 – jungiamasis velenas; 7 – variklio apkrovos įrenginys; 8 – variklio sūkių ir apkrovos įrašymo įranga; 9 – degalų įpurškimo momento matavimo įranga; 10 – slėgio cilindre jutiklis; 11 – įsiurbiamo oro temperatūros jutiklis; 12 – įsiurbiamo oro temperatūros jutiklis už turbokompresoriaus; 13 – temperatūros jutiklis; 14 – išmetamųjų deginių temperatūros jutiklis; 15 – įsiurbiamo oro slėgio jutiklis; 16 – oro masės matuoklė; 17 – išmetamųjų dujų analizatorius; 18 – dūmomatis; 19 – cilindro slėgio reikšmių įrašymo įranga; 20 – degalų įpurškimo kampo reguliavimo įranga TMW-1; 21 – degalų įpurškimo momento nustatymo įranga VAG -COM v11.2; 22 – alkūninio veleno padėties jutiklis; 23 – CH₄ dujų balionas; 24 – dujų matuoklė.

Šaltinis: sudaryta autorių

1 lentelė.

Slėginio uždegimo variklio 1Z pagrindiniai parametrai

Parametras	Vertė
Variklio darbinis tūris (cm ³)	1986
Cilindrų skaičius	4
Suslėgimo laipsnis	19,5
Stūmoklio skersmuo (mm)	79,5
Stūmoklio eiga (mm)	95,5
Galia (kW)	66 (4000 min ⁻¹)
Sukimo momentas (Nm)	182 (2000 – 2500 min ⁻¹)
Degalų purkštovo atsidarymo slėgis (bar)	190

Šaltinis: Elektroninė duomenų bazė Tolerance 2009.2

Variklio efektyvus sukimo momentas M_e ir veleno sūkliai n nustatyti apkrovos standu KI-5543, M_e matavimo paklaida $\pm 1,23$ Nm. Dyzelino valandinėms sąnaudoms matuoti naudotos elektroninės svarstyklės SK-5000 ir chronometras, degalų sąnaudų matavimo paklaida 0,5 %. CH₄ sąnaudos matuotos dujų masės matuokliu Massflowmeter Type RHM 015, tikslumas $\pm 0,1$ %. Įsiurbiamo oro masė matuota matuokle BOSCH HFM 5, kurios tikslumas 2 %. Slėgis cilindre fiksuotas kaitinimo žvakėje integruotu pjezoelektriniu jutikliu AVL GH13P, kurio jautrumas $15,84 \pm 0,09$ pC/bar. Slėgio reikšmės per 100 ciklų įrašytos naudojant AVL DiTEST DPM 800 osciloskopą ir LabView Real programinę įrangą. Slėgio matavimo tikslumas 1 %. Slėgis variklio įsiurbimo

kolektoriuje matuotas slėgio matuokliu Delta *OHM HD 2304.0*, matavimo paklaida $\pm 0,0002$ MPa. Temperatūra nustatoma K-tipo termoporomis, kurių tikslumas ± 1.5 °C. Teršalų koncentracija išmetamosiose dujose matuota naudojant *AVL DiCom 4000* deginių (CO, CO₂, CH, NO_x) analizatorių, o dūmingumas – *AVL DiSmoke* (2 pav.).

Variklio sūkliai bandymo metu $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, nes šiais sūkliais variklis dažnai veikia važiuojant miesto sąlygomis ir užmiestyje. Apkrova $M_e = 45 \text{ Nm}$, dažnai tenkanti varikliui eksploatavimo metu, važiojant miesto sąlygomis. Bandymai pradžioje atlikti su standartiškai veikiančia EGR sistema ir su atjungtu EGR vožtuvu. Kiekvieno režimo metu atlikta po penkis parametrų fiksavimo bandymus.

Eksperimentiniam tyrimui naudoti skysti degalai ir dvigubi (skysti ir dujiniai) degalai. Naudotas dyzelinas (žieminis, D klasės) ir II kartos biodyzelinas *B* (*Neste* firmos *NExBTL*), bei gamtinės dujos *M* (metanas ~98 % tūrio):

1. 100 % grynas dyzelinas *D100*;
2. 60 % dyzelino ir 40 % metano dujų *D60/M40*;
3. 40 % dyzelino ir 60 % metano dujų *D40/M60*;
4. 20% dyzelino ir 80 % metano dujų *D20/M80*;
5. 100 % grynas biodyzelinas *B100*;
6. 60 % biodyzelino ir 40 % metano dujų *B60/M40*;
7. 40 % biodyzelino ir 60 % metano dujų *B40/M60*;
8. 20% biodyzelino ir 80 % metano dujų *B20/M80*.

Degalų proporcijų nustatymui naudojama formulė, vertinanti metano (CH₄) energetinę dalį degalų mišinyje:

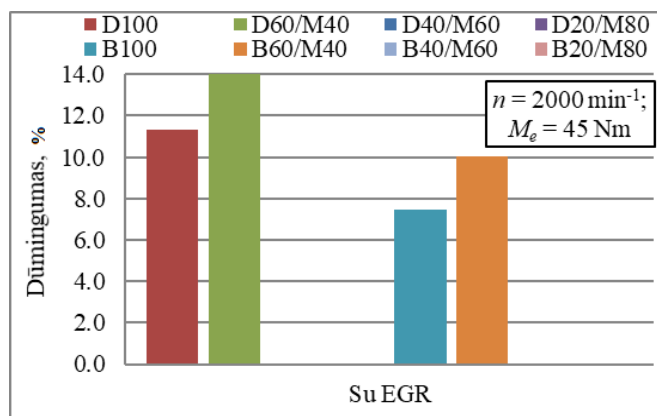
$$Pr_{CH_4} = \frac{B_{CH_4} \cdot H_{z_CH_4} \cdot 100}{B_{CH_4} \cdot H_{z_CH_4} + B_{Dyz} \cdot H_{z_Dyz}} \quad (1)$$

čia: B_{CH_4} – metano dujų valandinės sąnaudos (kg/h);
 B_{Dyz} – dyzelino valandinės sąnaudos (kg/h);
 $H_{z_CH_4}$ – metano dujų žemutinis šilumingumas (50 MJ/kg);
 H_{z_Dyz} – dyzelino žemutinis šilumingumas (43,6 MJ/kg).

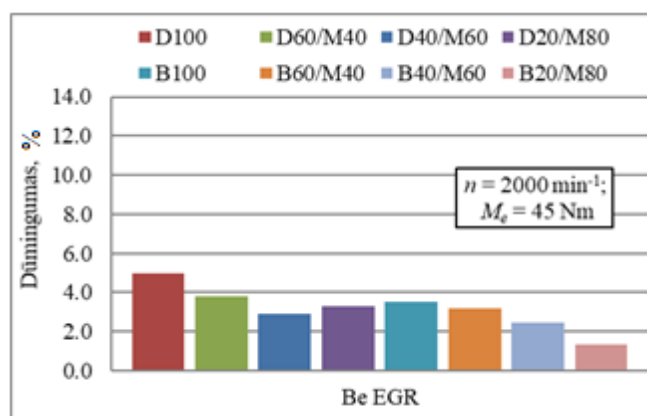
Pirmoje tyrimo dalyje bandyti visi mišiniai, antroje tyrimo dalyje – mišiniai *D40/M60* ir *B40/M60*, kurių ekologiniai ir energetiniai variklio darbo rodikliai buvo lyginami su grynais *D100* ir *B100* degalais, atjungus EGR. Kadangi gamtinių dujų savybės ženkliai skiriasi nuo dyzelino, sumaišius tuos degalus, variklyje pasikeičia degimo proceso rodikliai. Pradiniai bandymai atlikti su gamintojo numatytu degalų įpurškimo pradžios momentu kuris, varikliui veikiant dyzelinu yra 3° alkūninio veleno (AV) pasisukimo kampo prieš stūmoklio viršutinį galinį tašką (VGT). Teoriškai žinoma, kad didžiausias variklio sukimo momentas gaunamas maksimaliam slėgiui cilindre esant 10 – 12° AV po VGT. Norint ištirti ir atrasti optimalius variklio valdymo parametrus tiriamam varikliui buvo keičiamas dyzelinių degalų tiekimo pradžios momentas intervalais kas 3° AV tarp 18° ir 0° AV iki VGT.

Tyrimo rezultatai ir jų analizė

Varikliui veikiant su EGR (3 pav.) sistema paaiškėjo, kad, padidinus gamtinių dujų koncentraciją mišinyje iki 60 %, variklio dūmingumas labai išaugo (iki 99 %) ir, toliau didinant gamtinių dujų koncentraciją mišinyje iki 80 %, variklio darbas darėsi nestabilus, buvo juntami detonacijos požymiai. Remiantis stebėtais parametrais daroma išvada, kad tai vyksta dėl EGR. Paduodant daugiau gamtinių dujų varikliui ir išlaikant tą patį apkrovos režimą $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $M_e = 45 \text{ Nm}$, maitinimo sistemos elektroninio valdymo blokas pagal, gamintojo surašytą programą, mažino dyzelino padavimą, vėlino dyzelino įpurškimo pradžios momentą ir atidarydavo labiau EGR vožtuvą, ko pasėkoje sumažėdavo šviežio oro vartojimas ir mišinys smarkiai riebėjo, kaito ir prasidėjo nekontroliuojamas jo degimas. Atjungus EGR, didėjanti metano koncentracija degaluose mažino dūmingumą (4 pav.). Tai paaiškinama paprastesne dujų molekuline grandine, mažesniu gamtinių dujų C/H santykiu, užsitęsusi degimu. Palyginus dūmingumą, degant dyzelinui su CH₄ ir biodyzelinui su CH₄ matome, kad, naudojant *NExBTL* biodyzeliną, visų mišinių dūmingumas yra ~16 % mažesnis. To priežastis yra mažesnis biodyzelino C/H santykis, palyginus su mineraliniu dyzelinu.



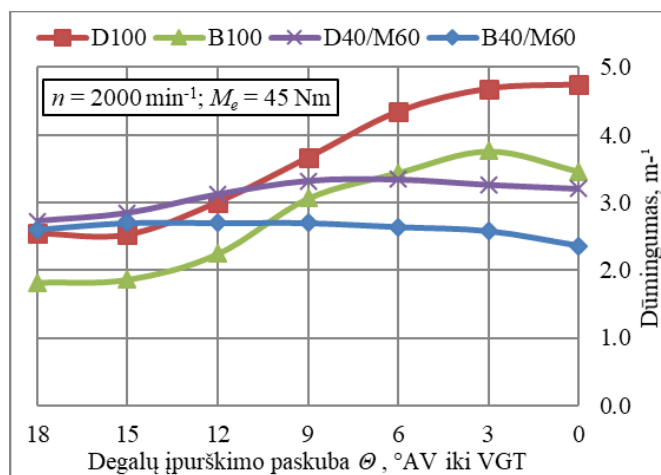
3 pav. Tiriamo variklio dūningumas veikiant skirtingais degalų mišiniais su veikiančiu EGR. D40M60, B40M60, D20M80 ir B20M80 mišinių dūningumas artimas 99 %.
Šaltinis: sudaryta autorių



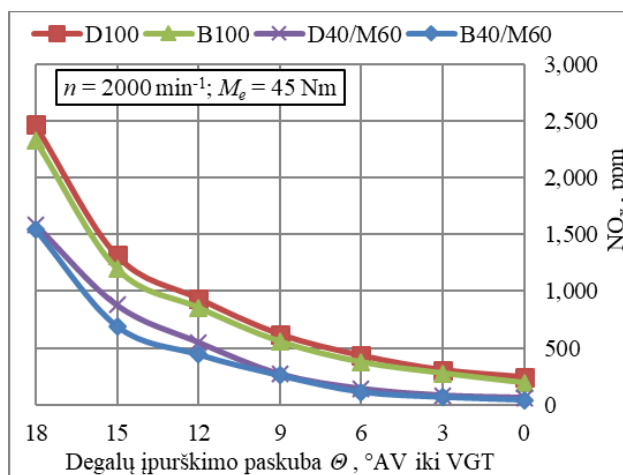
4 pav. Tiriamo variklio dūningumas veikiant skirtingais degalų mišiniais su atjungta EGR sistema.
Šaltinis: sudaryta autorių

Esant nustatytam variklio apkrovos režimui ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $M_e = 45 \text{ Nm}$), degalų įpurškimo pradžios momentas turi didesnę įtaką dūningumui varikliui veikiant gryniais degalais, negu mišiniais su gamtinėmis dujomis (degaluose esant 60 % metano) (5 pav.), nes dujos cilindre dega ilgiau ir per tą laiką spėja geriau sudegti kartu degantys dyzeliniai degalai. Dyzeliną pakeitus biodyzelinu su 60 % metano, palyginus su grynu dyzelinu, esant degalų įpurškimo paskubai 3° AV iki VGT, dūningumas sumažėja ~51 %.

Azoto oksidų (NO_x) koncentracijos kitimo grafikas (6 pav.) rodo, kad 60 % metano priedas NO_x koncentraciją sumažina ~80 %. NExBTL biodyzelinas taip pat mažina NO_x koncentraciją, tik šis efektas nėra ryškus. Ankstinant degalų įpurškimo pradžios momentą iki 9° AV iki VGT, NO_x koncentracija tame taške ne viršija variklio, veikiančio grynu dyzelinu, esant degalų įpurškimo pradžiai 3° AV iki VGT koncentracijos. Taip paankstinus degalų įpurškimo pradžią, variklio, veikiančio dyzelinu ir metanu (60 %), energetinis efektyvumas išauga ~8 % (7 pav.).



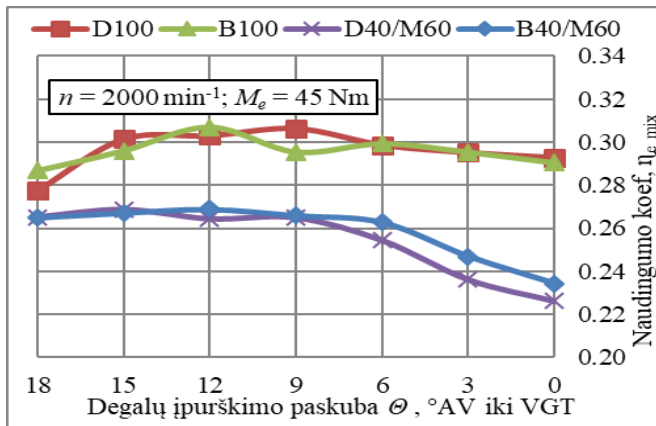
5 pav. Tiriamo variklio Dūningumas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.
Šaltinis: sudaryta autorių



6 pav. Tiriamo variklio NO_x koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.
Šaltinis: sudaryta autorių

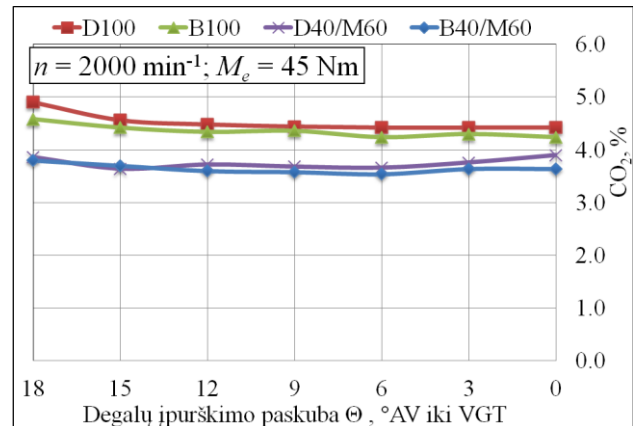
Tyrimu nustatyta, kad variklio energetinio naudingumo parametrai blogėja didinant gamtinių dujų koncentraciją mišinyje. Variklio, veikiančio grynu dyzelinu ir biodyzelinu, degalų įpurškimo pradžios momento

korekcija naudingumo koeficientui didelės įtakos neturi (7 pav.). Varikliui veikiant dvigubų degalų mišiniu, esant gamintojo numatytam degalų įpurškimo pradžios momentui (3° AV iki VGT), jo naudingumo koeficientas krenta ~20 %. Įpurškimo paankstinimas iki 9° AV iki VGT leidžia atgauti ~13 % prarasto energetinio naudingumo. Grafike matome, kad biodyzelinas su gamtinėmis dujomis turi geresnį energetinį efektyvumą, negu mineralinis dyzelinas ir dujos, tačiau paankstinus degalų įpurškimą, skirtumas sumažėja.



7 pav. Tiriama variklio naudingumo koeficientas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.

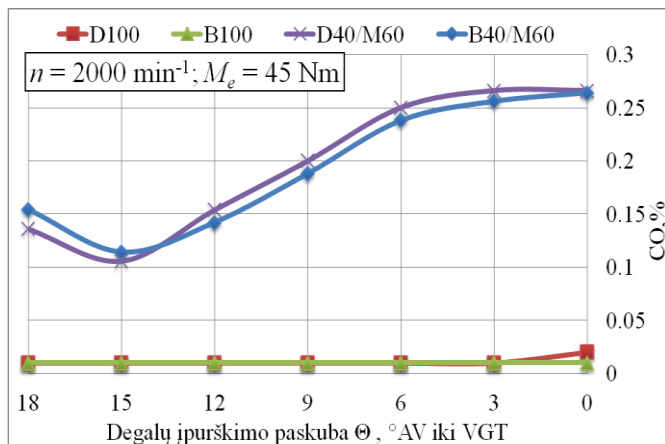
Šaltinis: sudaryta autorių



8 pav. Tiriama variklio CO₂ koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.

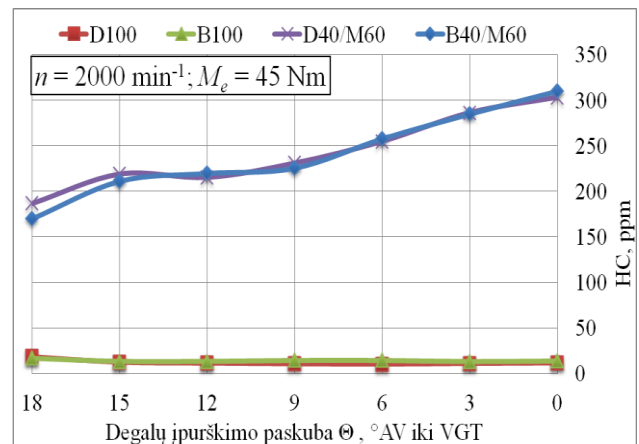
Šaltinis: sudaryta autorių

CO₂ koncentracija deginiuose, varikliui veikiant biodegalais ir dujomis, yra ~15 % mažesnė palyginus su dyzelinu (8 pav.), nes ir NExBTL biodyzelinas ir metanas, palyginus su dyzelinu, turi mažesnę C/H santykį. Tačiau papildomai tiekiamos dujos labai padidina nepilno degimo produktų emisijas. Esant degalų įpurškimo pradžios momentui 3° AV iki VGT, CO koncentracija išauga ~27 kartus (9 pav.), nes dujos užima įsiurbiamo oro tūrį ir sumažina oro perteklių. HC koncentracija išauga ~30 kartų (10 pav.). Tai dalinai įtakoja sumažėjęs oro kiekis cilindre, tačiau didžiausią įtaką turi metano dujų patekimas į išmetamąsias dujas vožtuvų perdengimo fazės metu, įsiurbiama orą su dujomis į cilindrą pučiant turbokompresoriui. Ankstinant degalų įpurškimą, CO ir CH emisijos mažėja, nes kyla degimo temperatūra ir gerėja degimas.



9 pav. Tiriama variklio CO koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.

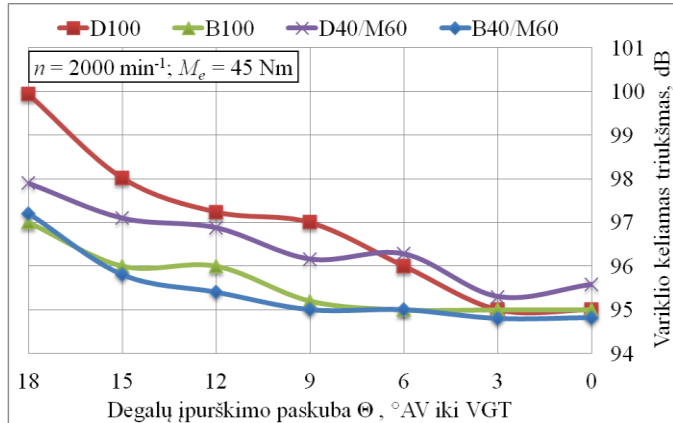
Šaltinis: sudaryta autorių



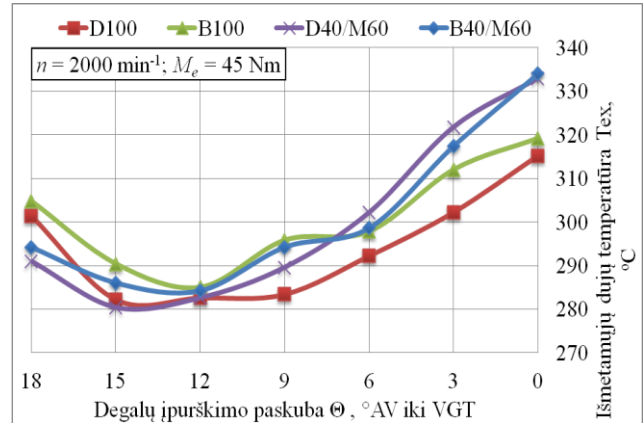
10 pav. Tiriama variklio HC koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.

Šaltinis: sudaryta autorių

Varikliui veikiant biodegalais ir dujomis (*B40/M60*) yra skleidžiamas mažiausias triukšmas. Didžiausias triukšmas skleidžiamas varikliui veikiant dyzelinu (11 pav.). Tai įtakoja didesnis *NExBTL* biodyzelino cetaninis skaičius, palyginus su dyzelinu. Tai sutrumpina *NExBTL* uždegimo gaišties fazę ir yra mažesnis šilumos išsiskyrimas ir slėgio prieaugis intensyvaus degimo pirminėje (pastovaus tūrio) fazėje (15 pav.). Metanas turi mažesnę degimo greitį ir papildomai mažina šilumos išsiskyrimą ir slėgio prieaugį cilindre bei skleidžiamą triukšmą.



11 pav. Tiriama variklio keliamas triukšmas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.
Šaltinis: sudaryta autorių

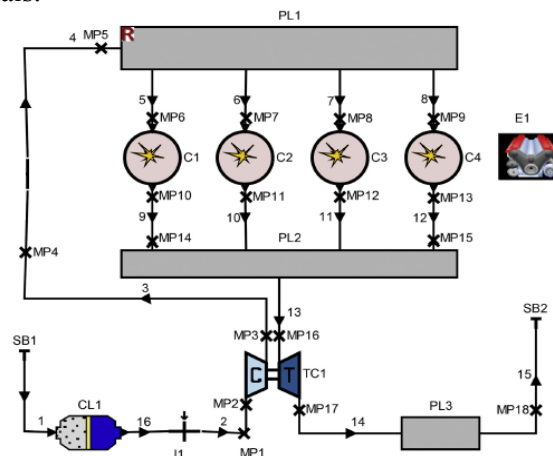


12 pav. Tiriama variklio išmetamųjų dujų temperatūra veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema.
Šaltinis: sudaryta autorių

Varikliui veikiant gamintojo numatytu režimu (degalų įpurškimo pradžia 3° AV iki VGT) žemiausia išmetamųjų dujų temperatūra yra naudojant dyzeliną (12 pav.). Naudojant *NExBTL* biodyzeliną deginių temperatūra pakyla ~10°C, nes šiuo atveju intensyvesnis šilumos išsiskyrimas vyksta antroje intensyvaus degimo (pastovaus slėgio) fazėje. Varikliui veikiant *B40/M60* degalų mišiniu, deginių temperatūra dar papildomai pakyla ~10°C, nes, dėl lėtesnio metano degimo, šilumos išsiskyrimas pasislenka į išmetimo pusę (15 pav.) ir temperatūra cilindre degimo pabaigoje yra aukštesnė (16 pav.).

Degimo proceso skaitinė analizė AVL BOOST programa

Siekiant išsamesnės variklyje vykstančio degimo proceso analizės ir jo optimizavimo galimybių tyrimo AVL BOOST programoje buvo sukurtas tiriama variklio skaitinis modelis (13 pav.). Į šį modelį įkėlus eksperimentinių tyrimų informaciją (degalų ir oro sąnaudos, slėgis cilindre ir kt.) apskaičiuoti degimo rodikliai varikliui veikiant įvairiais degalais.

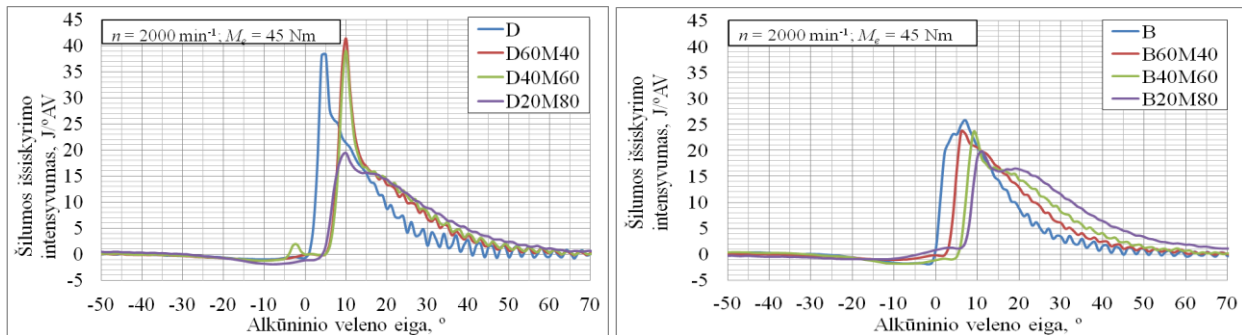


13 pav. Tiriama variklio modelis AVL BOOST programoje: I1 – gamtinių dujų tiekimo purkštukas; SB1-2 – aplinkos sąlygos; PL1 – įsiurbimo kolektorius; PL2 – išmetimo kolektorius; PL3 – duslintuvas;

CL1 – oro filtras; MP1-18 – matavimo vietos; C1-4 – variklio cilindrai; 1-15 – jungiamieji vamzdžiai;
TC1 – turbokompresorius.

Šaltinis: sudaryta autorių

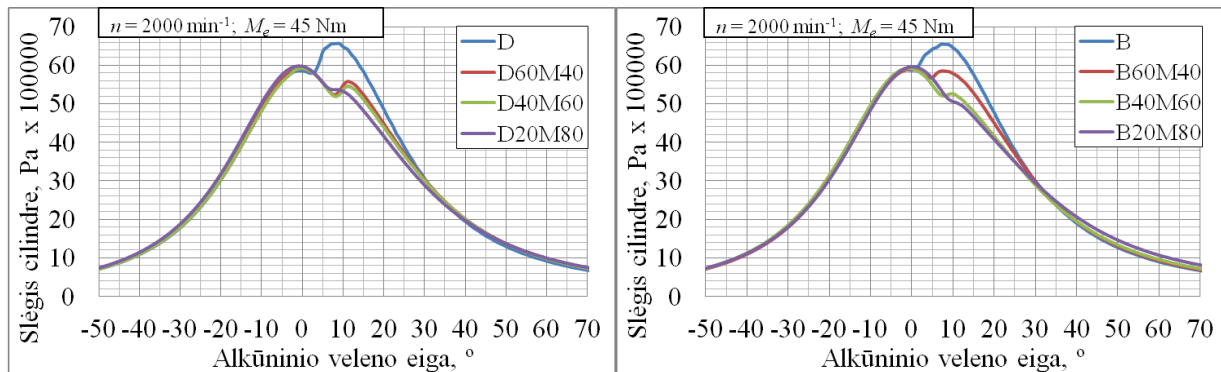
Dyzeliną pakeitus *NExBTL* biodyzelinu, maksimalus šilumos išsiskyrimas intensyvaus degimo pirminėje fazėje sumažėja nuo $38,5 \text{ J}^\circ\text{AV}$ iki $26 \text{ J}^\circ\text{AV}$ ($\sim 32\%$), nes didesnis *NExBTL* cetaninis skaičius sutrumpina užsiliepsnojimo gaisties fazę. Didinant metano energijos koncentraciją degalų mišinyje, dėl lėtesnio dujų degimo šilumos išsiskyrimo pikas mažėja ir persislenka į išmetimo pusę. Degalų mišinio *B20/M80* maksimalus šilumos išsiskyrimas nustatytas $20 \text{ J}^\circ\text{AV}$ ir yra $\sim 30\%$ mažesnis palyginus su *NExBTL* (14 pav.). Didelę įtaką degimo procesui ir šilumos išsiskyrimui turėjo ir tai, kad, didinant metano koncentraciją mišinyje (40 %, 60 % ir 80 %), variklio elektroninis valdymo blokas mažino aukšto slėgio siurblio tiekiamą degalų ciklinį kiekį ir vėlino degalų įpurškimo pradžią nuo 3°AV iki VGT iki atitinkamai $1,32^\circ \text{AV}$ iki VGT, $1,30^\circ \text{AV}$ iki VGT ir $0,46^\circ \text{AV}$ iki VGT.

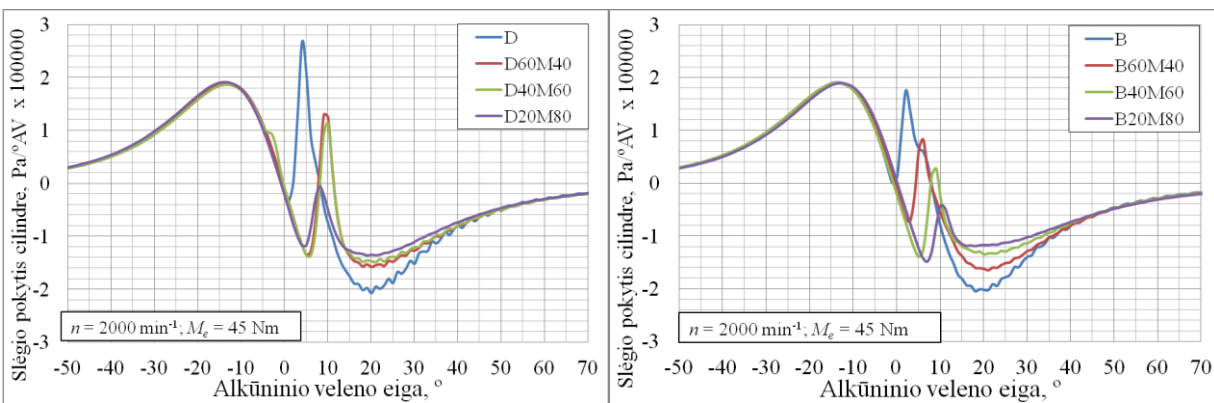


14 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo kitimas priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema.

Šaltinis: sudaryta autorių

15 paveiksle pateikti slėgio cilindre ir slėgio pokyčio grafikai koreliuoja su aukščiau pateikta informacija apie šilumos išsiskyrimą. Dyzeliną pakeitus didesnio cetaninio skaičiaus *NExBTL* degalais ir didinant metano koncentraciją, dėl ko vėlinama degalų įpurškimo pradžia, slėgio prieaugis degimo metu sumažėja iki 3 kartų. Dėl užsitęsusio degimo (maksimalaus slėgio pikas vėluoja) mažėja variklio šiluminis efektyvumas (7 pav.).

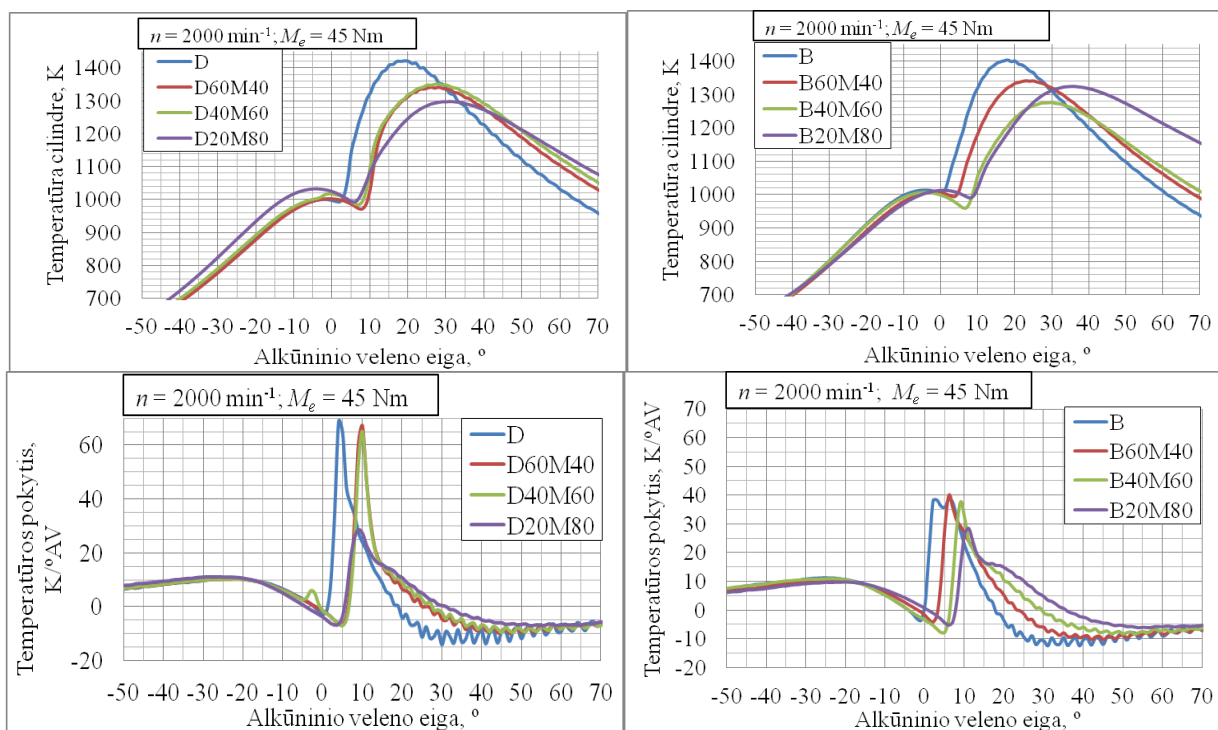




15 pav. Slėgis cilindre ir jo kitimas priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema.

Šaltinis: sudaryta autorių

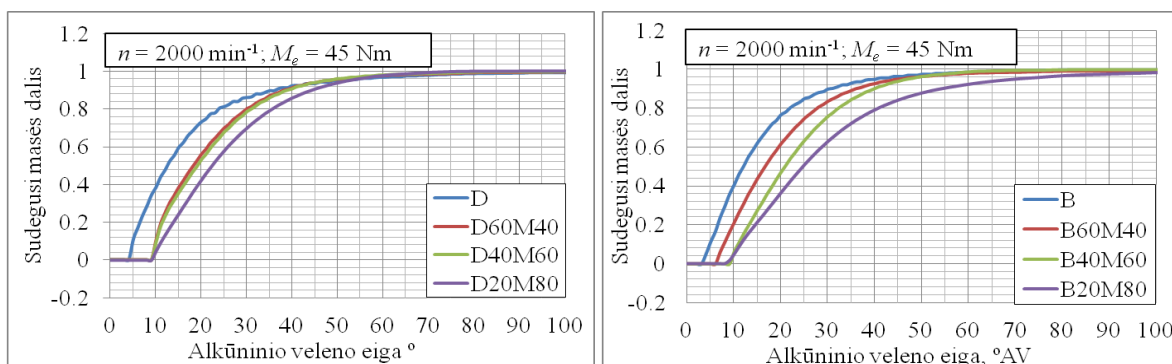
Varikliui veikiant biodyzelinu, dėl lėtesnio šilumos išsiskyrimo, palyginus su dyzelinu, maksimalus temperatūros prieaugis sumažėja nuo 70 K/°AV iki 40 K/°AV (~42 %). Degalų mišinio B20/M80 maksimalus temperatūros prieaugis 30 K/°AV ir yra ~25 % mažesnis palyginus su NExBTL (16 pav.). Naudojant biodyzeliną ir metaną sumažėja ir maksimali temperatūra cilindre, bei jos pikas pasislenka išmetimo pusėn. Dėl apie 100 K sumažėjusios degimo temperatūros deginiuose padidėjo CO ir HC koncentracija (9 pav. ir 10 pav.). Tačiau užsitęsęs degimas padidino deginių temperatūrą (12 pav.), bei turėjo įtakos dūmingumo sumažėjimui (5 pav.).



16 pav. Temperatūra cilindre ir jos kitimas priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema.

Šaltinis: sudaryta autorių

Remiantis termodinaminės degimo proceso analizės, atliktos AVL BOOST programa, rezultatais, galima matyti, kad degalų degimo greitis smarkiai lėtėja, didėjant gamtinių dujų (metano) energijos koncentracijai Dual fuel degalų mišinyje. Teoriškai teigiama, kad, norint efektyviausiai išnaudoti degalų energiją 50 % degalų esančių degimo kameroje masės turi būti sudegę alkūniniam velenui esant ~10° AV už VGT. Sudegusios degalų masės dalies grafike (17 pav.) matosi, kad, varikliui veikiant be dujų priedo (degalai pradėdami purkšti 3° AV iki VGT), pasiekiamas rezultatas, artimas optimaliam.



17 pav. Sudegusi degalų masės dalis priklausomai nuo degalų mišinio sudėties (be EGR).

Šaltinis: sudaryta autorių

Didinant metano koncentraciją mišinyje (40 %, 60 % ir 80 %), variklio elektroninis valdymo blokas mažino aukšto slėgio siurblio tiekiamą degalų ciklinį kiekį ir veleno degalų įpurškimo pradžią iki atitinkamai 1,32° AV iki VGT, 1,30° AV iki VGT ir 0,46° AV iki VGT. Dėl šios priežasties ir dėl lėtesnio metano degimo 50 % degalų masės sudega žymiai vėliau: esant 60 % metano prie 20° AV už VGT, esant 80 % metano prie 23 – 25° AV už VGT. Tai leidžia daryti prielaidą, kad, paankstinus skystų degalų įpurškimo pradžios momentą, galima padidinti variklio efektyvųjį naudingumo koeficientą. Tai ir buvo patvirtinta praktinio bandymo metu (7 pav.).

Išvados

Atlikus dyzelino bei biodyzelino ir jų mišinių su gamtinėmis dujomis (*Dual fuel*) slėginio uždegimo variklyje efektyvumo tyrimą ir gautų rezultatų analizę pateikiamos šios apibendrintos išvados:

1. Slėginio uždegimo varikliui veikiant biodyzelino – gamtinių dujų (60 % energijos) *Dual fuel* mišiniu, variklio dūmingumas, lyginant su įprastiniu dyzelinu, sumažėja virš 50 %, o NO_x koncentracija sumažėja ~80 %, nes didesnis NExBTL biodyzelino cetanis skaičius ir mažesnis dujų degimo greitis sumažina šilumos išsiskyrimo intensyvumą bei prailgina degimo laiką. Dūmingumą sumažina ir mažesnis alternatyvių degalų C/H santykis.

2. Didinant gamtinių dujų dalį ir išmetamųjų dujų recirkuliaciją (EGR) degalų mišinyje pradeda trūkti oro, labai išauga deginių dūmingumas. Dėl išaugusios temperatūros cilindre prasideda nekontroliuojamas gamtinių dujų degimas.

3. Naudojant dyzeliną/biodyzeliną ir gamtines dujas (60 %) sumažėja maksimali temperatūra cilindre, bei jos pikas pasislenka į išmetimo pusę, ko pasekoje deginiuose daug kartų padidėjo CO ir HC koncentracija, bet dėl užsitęsusio degimo sumažėja dūmingumas. HC emisiją didina ir vožtuvų perdengimas, nes tuo metu turbokompresorius per vožtuvus, kartu su oru, prapučia ir nesudegusias gamtines dujas. Tačiau mažesnis alternatyvių degalų C/H santykis CO₂ koncentraciją sumažina ~15 %.

4. Gamtinėms dujoms sudarant 60 % *Dual fuel* energijos ir ankstant biodyzelino įpurškimo pradžios momentą iki 9° AV prieš VGT (gamintojo numatyta 3° AV prieš VGT), galima atgauti 13 % iš 20 % dėl *Dual fuel* prarasto energetinio naudingumo, nepabloginant ekologinių rodiklių.

5. Siekiant optimaliai išnaudoti slėginio uždegimo variklį, veikiant biodyzelino ir gamtinių dujų *Dual fuel* mišiniais, reikia optimizuoti degalų mišinio energetinę sudėtį, biodyzelino įpurškimo pradžios momentą, EGR sistemos veikimą ir kitus reguliuojamus parametrus, priklausomai nuo variklio veikimo režimo.

Literatūra

1. AVL BOOST v 2011.2. AVL BOOST users guide. Austria: Graz, 2011.
2. *Dual fuel* įrangų gamintojo tinklapis, 2018: <http://www.elpigaz.com/pl/index/>.
3. Elektroninė duomenų bazė Tolerance data 2009.2.
4. Europos parlamento ir tarybos direktyva dėl alternatyviųjų degalų infrastruktūros diegimo, 2013. Briuselis: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094>.
5. Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M., Hao, S., 2013. Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG/diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing. *Applied Energy*, 110: 201–206.

6. Ryu, K., 2013a. Effects of pilot injection pressure on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel. *Energy Conversion and Management*, 76: 506–516.
7. Ryu, K., 2013b. Effects of pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel. *Applied Energy*, 111: 721–730.

Padėka

Straipsnyje atlikti tyrimo rezultatai gauti naudojant AVL BOOST vidaus degimo variklių modeliavimo programą, įsigyta pasirašius bendradarbiavimo sutartį tarp AVL Advanced Simulation Technologies ir VGTU Transporto inžinerijos fakulteto.

THE RESEARCH OF THE USAGE EFFICIENCY OF NATURAL GAS AND BIOFUELS IN THE COMPRESSED IGNITION ENGINES

Summary

Dual fuel: diesel (D)/Biodiesel (B) and compressed natural gas (CNG) was tested used compression-ignition (CI) engine. Was investigated the energetic and environmental indicators. By performance of the bench testing it was found that an additional supply of CNG affects the combustion process of combustible mixture and reduces the thermal efficiency of the CI engine. The variation in the composition of a combustible mixture increases the amount of incomplete combustion products: the concentration of carbon monoxide (CO) and hydrocarbons (HC) in the exhaust gas and smoke, but reduces nitrogen oxides (NO_x) and carbon dioxide (CO₂) emissions. Using the dual B and CNG fuel and by optimizing the diesel injection timing, the engine performance is close to diesel fuel, the concentration of incomplete combustion product decreases, but are higher the emissions, when engine used pure diesel.

Key words: compression ignition engine, compressed natural gas, biodiesel, energetic indicators, environmental indicators.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Vitalij Kabelis.

Mokslo laipsnis ir vardas: studentas, magistrantas.

Darbo vieta ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Transporto inžinerijos fakulteto Automobilių inžinerijos katedros magistrantas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.

Telefonas ir el. pašto adresas: +37067526710, vitalijkabelis@gmail.com

Autoriaus vardas, pavardė: Alfredas Rimkus.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas.

Darbo vieta ir pozicija: VGTU, Automobilių inžinerijos katedros docentas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 61571161, alfredas.rimkus@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Vitalij Kabelis.

Science degree and name: student, postgraduate.

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering faculty, Automobile Engineering department department master student.

Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.

Telephone and e-mail address: +37067526710, vitalijkabelis@gmail.com

Author name, surname: Alfredas Rimkus.

Science degree and name: associated professor.

Workplace and position: VGTU, Automobile Engineering department associated professor.

Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.

Telephone and e-mail address: +370 61571161, alfredas.rimkus@vgtu.lt