



## VANDENILIO DUJŲ ĮTAKA DYZELINIO VIDAUS DEGIMO VARIKLIO EFEKTYVUMO RODIKLIAMS

Jurgis LATAKAS<sup>1</sup>, Saugirdas PUKALSKAS<sup>2</sup>, Alfredas RIMKUS<sup>3</sup>, Mindaugas MELAIKA<sup>4</sup>,  
Ričardas VĖGNERIS<sup>5</sup>, Paulius STRAVINSKAS<sup>6</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

*El. paštas: <sup>1</sup>jurgis.latakas@gmail.com; <sup>2</sup>saugirdas.pukalskas@vgtu.lt; <sup>3</sup>alfredas.rimkus@vgtu.lt;*

*<sup>4</sup>mindaugas.melaika@vgtu.lt; <sup>5</sup>vegneris.ricardas@gmail.com; <sup>6</sup>paulius.stravinskas@vgtu.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje pateikiamas dyzelinio variklio, veikiančio su vandenilio priedu (10, 20, 30 l/min), energetinių ir ekologinių rodiklių tyrimas. Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta, kad vandenilio dujų priedas pagerina dyzelino degimą, padidina indikatorinį slėgį, sumažina anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>), angliavandenilių (HC), kietųjų dalelių koncentraciją, sumažina degalų sąnaudas. Bandymo rezultatai parodė, kad vandenilio dujų priedas sumažino variklio indikatorinį slėgį kinetinės degimo fazės metu. CO<sub>2</sub> ir azoto oksidų (NO<sub>x</sub>) koncentracija nedaug sumažėjo, HC – padidėjo. Kietųjų dalelių koncentracija variklio išmetamosiose dujose itin sumažėjo. Tiekiant vandenilio dujas kaip priedą nedaug sumažėja dyzelino sąnaudos. AVL BOOST programa atlikta degimo proceso analizė. Nustatyta, kad siekiant optimizuoti variklio darbą, naudojant vandenilio priedą, būtina reguliuoti dyzelino įpurškimo paskubos kampą.

**Reikšminiai žodžiai:** vandenilis, išmetamosios dujos, slėginio uždegimo variklis, teršalai.

### Įvadas

Vandenilis yra energijos šaltinis, kurio panaudojimas gali radikaliai pakeisti energijos gamybos, perdavimo ir vartojimo sritis. Ypač daug vilčių teikiama sektoriui kuriant visiškai švarias transporto sistemas, nes galutinis vandenilio degimo produktas yra vandens garai. Šiuo metu atlikta daug tyrimų, bandant nustatyti, ar vandenilio (H<sub>2</sub>) naudojimas vidaus degimo variklyje yra ekonomiškai naudingas.

Mažos H<sub>2</sub> porcijos veikia kaip priedas, gerinantis degimo procesą ir lemiantis didesnę degalų mišinio liepsnos plitimo greitį (Bari *et al.* 2010).

Indikatorinis slėgis variklyje didėja, didėjant vandenilio kiekiui nuo 5 % iki 15 %, esant pastoviam dyzelino kiekiui, dėl geresnio vandenilio degimo. Mažas vandenilio kiekis paankstina dyzelino užsidegimą. Be to, jis mažina indikatorinio slėgio kilimo greitį cilindre degimo metu. Tai pastebima ankstyvoje degimo fazėje esant 5 % vandenilio priedui (Szwaja, Grab-Rogalinski 2009).

Naudojant vandenilį kaip priedą, pagreitėja dyzelino degimas ir degimo procesas priartėja prie pastovių greičio reikšmių. Nors visa degimo trukmė smarkiai nesikeičia, tačiau indikatorinio slėgio pikas cilindre yra aukštesnis (Szwaja, Grab-Rogalinski 2009).

Atliekant bandymus su tiesioginio įpurškimo varikliu yra du indikatorinio slėgio pikai cilindre dėl dvigubo dyzelino įpurškimo ciklo. Naudojant vandenilio priedą, slėgis cilindre padidėjo esant fiksuotai variklio apkrovai. Naudojant vandenilio priedą, slėgis cilindre pradeda didėti dar prieš stūmokliui pasiekiant viršutinį rimties tašką (VRT). Didėjant vandenilio kiekiui, indikatorinis slėgis cilindre didėja. Tai rodo, kad vandenilio priedas paveikia degiojo mišinio degimo procesą. Degalų mišinio užsidegimas yra lėtesnis dėl dujų recirkuliacijos sistemos (DRS). DRS dujų savybės sumažina maksimalų cilindro slėgį ir sulėtina slėgio kilimą cilindre, tačiau esant vandenilio priedui dyzelino degimas cilindre yra toks pat, kaip degant dyzelinui be DRS sistemos. Taip įvyksta dėl didesnio energijos išsiskyrimo įpurškiant vandenilį kaip priedą į variklį (Shin *et al.* 2011).

Naudojant vandenilio priedą, pastebimas apie 19,1 % galios priaugis. Galios priaugio priežastis yra vandenilio koncentracijos padidėjimas degaluose, tai lemia geresnį degalų degimą ir didesnę išsiskiriantį energijos kiekį iš to paties kiekio degalų (Yilmaz *et al.* 2010). Didesnis degiojo mišinio liepsnos plitimo greitis sumažina degalų užsidegi-

mo gaisių ir trumpina degimo periodą, tai lemia mažesnius šilumos nuostolius per cilindro sienes. Didelis degalų mišinio degimo greitis lemia staigesnį slėgio ir temperatūros padidėjimą cilindre. Vandenilio panaudojimas variklyje žymiai padidina liepsnos išsiplėtimo zoną. Esant didesniems kaip  $1750 \text{ min}^{-1}$  variklio sukiamams vandenilio dalelės cilindre formuoja geresnį ir greičiau sudegantį degalų mišinį. Kadangi vandenilis turi žemą užsidegimo temperatūrą ir didelį liepsnos plitimo greitį, dyzelino ir vandenilio mišinys gali būti lengviau uždegamas ir greičiau sudeginamas. Vandenilio panaudojimas variklyje atliktais bandymais sumažino sunaudojamo dyzelino kiekį iki 14 % (Yilmaz *et al.* 2010).

HC koncentracijos sumažėjimas variklyje didžiausias esant dideliems variklio sukiamams. Tą lemia geresnis vandenilio dujų maišymasis su dyzelino garais. Tai galima paaiškinti tuo, kad, esant didesniems variklio sukiamams, dyzelinui sunkiau sudegti, tačiau įmaišius vandenilio dujų pagerėja degalų degimo savybės ir dėl to mažėja į aplinką išmetamų teršalų kiekis. Taip pat sumažėja degalų savaiminio užsidegimo temperatūra, dyzelinas anksčiau užsidega ir geriau sudega (Yilmaz *et al.* 2010).

Vidutinis CO dujų koncentracijos sumažėjimas yra apie 13,5 %. Mažiausia CO dujų koncentracija pasiekama esant vidutiniams ir dideliems variklio sukiamams. Anglies sumažėjimas ore dėl įsiurbiamo vandenilio yra pagrindinis veiksnys, lemiantis CO dujų sumažėjimą.

Pasirinktas tyrimo objektas – savaiminio užsidegimo vidaus degimo variklis su mažu vandenilio priedu. Vandenilis, kaip degalų priedas, yra tiekiamas į variklio oro įsiurbimo angą, pro kurią patekęs į degimo kamerą ir susimaišęs su pagrindiniu dyzelino kiekiu, pagerina degalų degimo savybes.

Šio darbo tikslas – patikrinti dyzelinio variklio efektyvumo rodiklius naudojant vandenilio dujas kaip dyzelino priedą. Tam reikia, papildomai tiekiant į variklį vandenilio dujas, nustatyti variklio energetinius ir ekologinius rodiklius.

## Tyrimo metodika

Bandymo metu buvo matuojami variklio dinaminiai, energetiniai ir ekologiniai rodikliai varikliui veikiant keturiais skirtingais degalų mišiniais. Bandymo metu variklio sukiai  $n$  buvo pastovūs –  $1900 \text{ min}^{-1}$ , variklio sukimo momentas  $M_e$  buvo keičiamas: 30, 60, 90, 120 Nm, vandenilio kiekis keičiamas 0, 10, 20, 30 l/min.

Standiniais tyrimais nustatyti variklio rodikliai: slėgis cilindre  $p_c$ , oro pripūtimo slėgis  $p_{komp}$ , deginių sudėtis (CO, CO<sub>2</sub>, CH ir NO<sub>x</sub> koncentracija) ir dūmingumas.

Vertinant variklio veikimo efektyvų naudingumo koeficientą, įvertinama vandenilio įtaka degalų žemutiniam šilumingumui. Vandenilio dujos tiekiamos į variklio cilindrą kartu su įsiurbiamu oru, maišosi su dyzelino garais ir sudaro degųjų mišinį. Vandenilio žemutinis šilumingumas ( $H_{z.H_2} = 120 \text{ MJ/kg}$ ) itin viršija dyzelino šilumingumą ( $H_{z.dyz.} = 42,5 \text{ MJ/kg}$ ). Degiojo mišinio žemutinė šilumingumo vertė apskaičiuojama taikant adityvumo principą.

$$H_{z.m} = \frac{H_{z.dyz.} \cdot Pr_{m.dyz.}}{100} + \frac{H_{z.H_2} \cdot Pr_{m.H_2}}{100}, \quad (1)$$

čia  $Pr_{m.dyz.}$  ir  $Pr_{m.H_2}$  – atitinkamai dyzelino ir vandenilio masės dalis degiajame mišinyje, %:

$$Pr_{m.H_2} = \frac{B_{H_2} \cdot 100}{B_{dyz.} + B_{H_2}}, \quad (2)$$

čia:  $B_{H_2}$  – valandinės vandenilio sąnaudos, kg/h;  $B_{dyz.}$  – valandinės dyzelino sąnaudos, kg/h.

Tiriamo variklio darbo ciklo skaitinis modeliavimas atliktas AVL BOOST programa. AVL BOOST programos BURN funkcija leidžia atlikti degimo proceso analizę. Ši analizė yra atvirkščias procesas atliekamiems degimo proceso skaičiavimams cilindre. Iš išmatuoto slėgio cilindre ir gautos indikatorinės slėgio diagramos bei suvestų degalų savybių, variklio cilindro rodiklių ir geometrinių duomenų išgaunamas šilumos išsiskyrimo intensyvumas (Vibe 1970).

Aproksimuojant variklio šilumos išsiskyrimo charakteristikas, taikoma Vibe funkcija (Vibe 1970):

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{a}{\Delta\varphi_c} \cdot (m_v + 1) \cdot y^{m_v} \cdot e^{-a \cdot y^{(m_v+1)}}, \quad (3)$$

$$dx = \frac{dQ}{Q}, \quad (4)$$

čia:  $Q$  – per darbo ciklą degalų išskirtas šilumos kiekis;  $\varphi$  – alkūninio veleno pasisukimo kampas;  $m_v$  – degimo intensyvumo formos rodiklis;  $a$  – Vibe konstanta, esant 99,9 % degalų sudegimui,  $a = 6,905$ ;  $y$  – santykinis degimo laikas:

$$y = \frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta\varphi_c}, \quad (5)$$

čia:  $\varphi_0$  – degimo pradžia;  $\Delta\varphi_c$  – degimo trukmė.

Integruojant Vibe funkciją apskaičiuojama degalų masės dalis, kuri sudegė nuo degimo proceso pradžios:

$$x = \int \frac{dx}{d\varphi} \cdot d\varphi = 1 - e^{-a \cdot y^{(m_v+1)}}. \quad (6)$$

## Eksperimentinė tyrimo įranga

Bandymui naudojamas 1992 metų gamybos, 1Z tipo, Audi 80, 4 taktų dyzelinis vidaus degimo variklis su turbiniu kompresoriumi. Variklis su vientisa, stūmoklyje esančia degimo kamera turi deginių recirkuliacijos sistemą.

Variklio techniniai rodikliai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Bandomojo variklio techniniai rodikliai

Table 1. Technical parameters of the experiment engine

Variklio tipas	Dyzelinis, turintis oro pripūtimo sistemą
Cilindrų skaičius	4
Cilindrų išdėstymas	Eilėje
Variklio darbinis tūris, cm <sup>3</sup>	1896
Suslėgimo laipsnis	19,5
Galia, kW	66 (4000 min <sup>-1</sup> )
Sukimo momentas, Nm	180 (2000–2500 min <sup>-1</sup> )
Cilindro skersmuo, mm	79,5
Stūmoklio eiga, mm	95,5

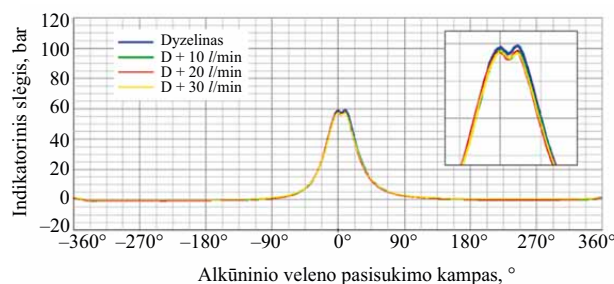
Bandymui naudojamas svarstyklinio dinamometro principu veikiantis elektrinis stendas KY–5543. Dujų analizatoriumi AVL DiCom 4000 nustatyta CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> ir NO<sub>x</sub> koncentracija išmetamosiose dujose, naudojant AVL DiSmoke 465 išmatuotas deginių dūmingumas.

Bandymo metu vandenilis buvo tiekiamas tiesiogiai į variklio oro įsiurbimo angą, dujų tūrio skaitikliu išmatuotas vandenilio srautas.

### Tyrimo rezultatai

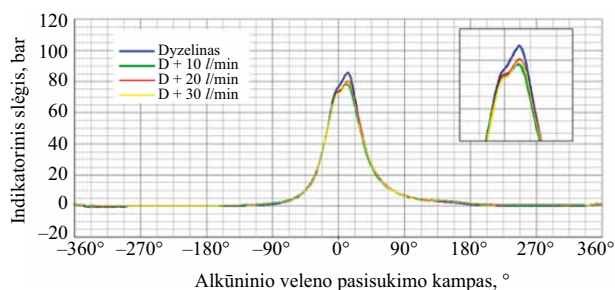
Pirmasis bandymo etapas buvo dyzelinio variklio rodiklių tyrimas, esant keturioms skirtingoms variklio apkrovoms (120 Nm, 90 Nm, 60 Nm, 30 Nm). Variklio sukurtas vidurinis efektyvusis slėgis  $p_e$  atitinkamai lygus 0,2 MPa, 0,4 MPa, 0,6 MPa ir 0,8 MPa. Analogiškai bandymai atlikti į variklio įsiurbimo kolektorių tiekiant 10, 20, 30 l/min vandenilio dujų.

Iš gautų indikatorinio slėgio cilindre grafikų matyti, kad dyzelinio variklio maksimalus indikatorinis slėgis, kai variklyje dega tik dyzelino ir oro mišinys, esant 1900 min<sup>-1</sup> ir 30 Nm apkrovai, yra apie 59 bar (1 pav.), o, esant 120 Nm apkrovai, yra apie 86 bar (2 pav.).



1 pav. Indikatorinio slėgio cilindre priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, esant 30 Nm variklio apkrovai

Fig. 1. Dependence of indicated pressure in a cylinder on crankshaft angle under the engine load 30 Nm



2 pav. Indikatorinio slėgio cilindre priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, esant 120 Nm variklio apkrovai

Fig. 2. Dependence of indicated pressure in a cylinder on crankshaft angle under the engine load 120 Nm

Papildomai tiekiant vandenilį kaip priedą į variklį, indikatorinis slėgis cilindre sumažėja. Esant 30 Nm apkrovai, cilindre degant dyzelinui su 10 l/min vandenilio priedu, indikatorinis slėgis cilindre yra apie 58 bar ir, didinant vandenilio kiekį iki 30 l/min, jis nekinta. Kai variklio apkrova yra 120 Nm, indikatorinis slėgis cilindre, tiekiant 10 l/min vandenilio kiekį, sumažėja iki 78 bar, tiekiant 20 ir 30 l/min vandenilio, pakyla iki 80 bar.

Mažas vandenilio kiekis, tikėtina, užsidega prieš dyzelino įpurškimą dėl aukštos suslėgto oro temperatūros. Dyzelino užsiliepsnojimo indukcijos periodas sutrumpėja, o tai lemia pirminės – kinetinės degimo fazės charakteristikas. Dėl sutrumpėjusio indukcijos periodo gaunamas mažesnis slėgio prieaugis cilindre.

Degant variklyje tik dyzelino ir oro mišiniui, CO<sub>2</sub> koncentracija, keičiantis variklio apkrovai nuo 30 Nm iki 120 Nm, didėja nuo 3,2 iki 7,9 % (3 pav.). Į variklio įsiurbimo kolektorių papildomai tiekiant vandenilio dujas, užfiksuotas nedidelis CO<sub>2</sub> koncentracijos mažėjimas (3 pav.). Esant 10 l/min vandenilio kiekiui CO<sub>2</sub> koncentracija atitinkamai variklio apkrovai kinta nuo 3,1 iki 7,7 %, esant 20 l/min vandenilio kiekiui kinta nuo 3 iki 7,6 %, esant 30 l/min vandenilio kiekiui kinta nuo 2,7 iki 7,4 %.

Kai vandenilio dujos yra įsiurbiamos pro įsiurbimo kolektorių, dalį įsiurbiamo oro pakeičia vandenilio dujos. Tokiu atveju degiojo mišinio sudėtyje mažėja anglies ir deguonies koncentracija. Didinant vandenilio dujų kiekį CO<sub>2</sub> koncentracija atitinkamai mažėja.

HC koncentracija išmetamosiose dujose svyruoja nuo 9,5 iki 7,5 ppm didinant variklio apkrovą (3 pav.). Tačiau į variklį papildomai tiekiant vandenilio priedą, HC koncentracija didėja (3 pav.). Keičiant variklio apkrovą nuo 30 Nm iki 120 Nm, vidutinė HC koncentracija, naudojant tik dyzeliną, svyruoja nuo 10 iki 7,5 ppm, o pridėjus vandenilio dujų, užfiksuotas HC koncentracijos padidėjimas. Su 10 l/min vandenilio priedu HC koncentracija yra apie 9 ppm, su 20 l/min vandenilio kiekiu HC koncentracija

kinta nuo 11 iki 9 ppm, tačiau esant efektyviam slėgiui 0,6 MPa, sumažėja iki 8 ppm. Tiekiant 30 l/min. vandenilio dujų, HC koncentracija išauga iki 11 ppm.

HC koncentracija deginiuose yra nedidelė ir vandenilio priedas turi mažą įtaką. Angliavandenilių koncentracija, papildomai tiekiant vandenilį, nedaug didėja, nes mažėja pradinės dyzelino degimo fazės intensyvumas, pasiekama žemesnė degimo temperatūra ir HC junginiai blogiau sudega.

$\text{NO}_x$  koncentracija išmetamosiose dujose didėja, didėjant variklio apkrovai (3 pav.). Degant variklyje tik dyzelino ir oro mišiniui bei keičiantis variklio apkrovai nuo 30 Nm iki 120 Nm,  $\text{NO}_x$  koncentracija išmetamosiose dujose didėja nuo 197 iki 785 ppm. Į variklio įsiurbimo kolektorių papildomai tiekiant vandenilio dujų, matomas  $\text{NO}_x$  sumažėjimas (3 pav.). Esant 10 l/min vandenilio kiekiui  $\text{NO}_x$  koncentracija atitinkamai variklio apkrovai kinta nuo 130 iki 640 ppm, esant 20 l/min vandenilio kiekiui kinta nuo 130 iki 680 ppm, esant 30 l/min vandenilio kiekiui kinta nuo 125 iki 690 ppm.

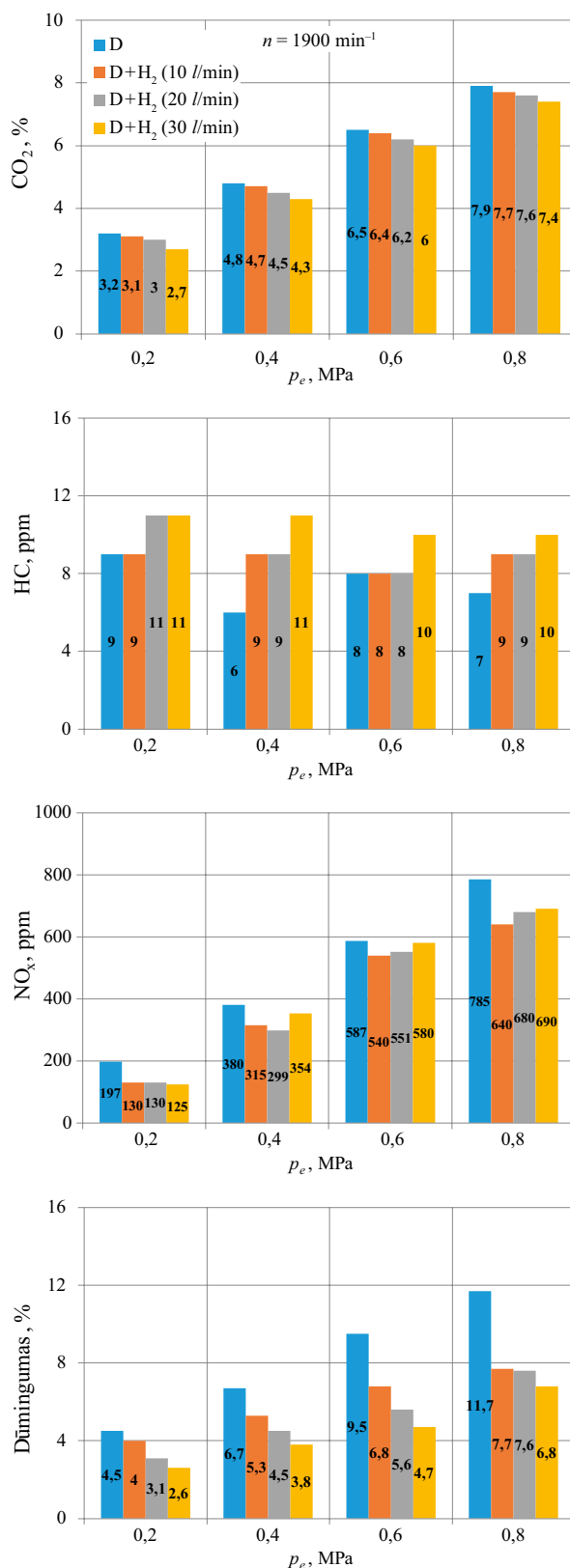
Pagal gautus rezultatus galima teigti, kad dėl sutrumpėjusio indukcijos periodo sumažėjo šilumos išsiskyrimas pradinėje degimo fazėje, degimo temperatūra variklyje sumažėjo. Dėl šios priežasties susidaro mažiau palankios sąlygos  $\text{NO}_x$  junginių formavimuisi ir  $\text{NO}_x$  koncentracija deginiuose sumažėja.

Degant variklyje tik dyzelino ir oro mišiniui, variklio dūmingumas, keičiantis variklio apkrovai nuo 30 Nm iki 120 Nm, didėja nuo 4,5 iki 11,7 % (3 pav.). Į variklio įsiurbimo kolektorių tiekiant vandenilio dujas, dūmingumas sumažėja (3 pav.). Papildomai tiekiant 10 l/min vandenilio, dūmingumas atitinkamai variklio apkrovai kinta nuo 4 iki 7,3 %, dūmingumo sumažėjimas lyginant su dūmingumu degant dyzelinui – 26 %, tiekiant 20 l/min vandenilio – nuo 3,1 iki 7,6 %, dūmingumo sumažėjimas – 35 %, tiekiant 30 l/min vandenilio – nuo 2,6 iki 6,8 %, dūmingumo sumažėjimas – 44 %.

Mažas vandenilio dujų kiekis tikėtina cilindre užsidega prieš įpurškiant pagrindinę dyzelino porciją. Degant vandeniliui cilindre formuojasi vandens garai. Kai į cilindrą įpurškiama dyzelino porcija, dyzelinas „aplimpa“ vandens junginius. Dyzelinas, gaubiantis vandens mikrolašelius, lengviau pasiekiamas deguonies ir geriau sudega.

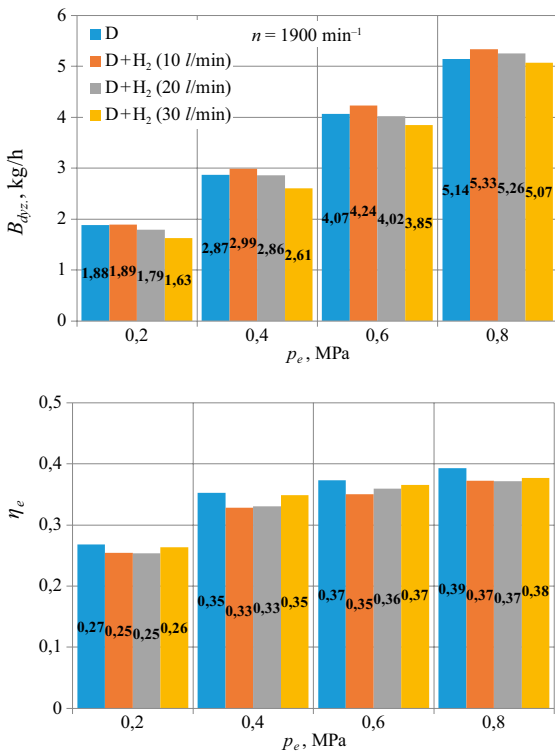
Dyzelino degimą gerina chemiškai aktyvios ir didelės difuzijos turinčios dar nesudegusios vandenilio dujos. Visa tai mažina kietųjų dalelių kiekį išmetamosiose dujose.

Degant variklyje tik dyzelino ir oro mišiniui, valandinės dyzelino sąnaudos  $B_{dyz.}$ , keičiantis variklio apkrovai nuo 30 Nm iki 120 Nm, didėja nuo 1,88 iki 5,14 kg/h (4 pav.). Esant 10 l/min vandenilio kiekiui  $B_{dyz.}$  atitinkamai variklio apkrovai kinta nuo 1,89 iki 5,33 kg/h, esant 20 l/min vandenilio kiekiui kinta nuo 1,79 iki 5,25 kg/h, esant 30 l/min vandenilio kiekiui kinta nuo 1,63 iki 5,07 %.



3 pav. Anglies dvideginio ( $\text{CO}_2$ ), angliavandenilių (CH) ir azoto oksidų ( $\text{NO}_x$ ) koncentracijos deginiuose bei dūmingumo priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio ( $p_e$ ) ir papildomai tiekiamo vandenilio kiekio

Fig. 3. Dependence of concentration of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), hydrocarbons (CH), nitrous oxides ( $\text{NO}_x$ ) in exhaust gases and smoke on mean effective pressure ( $p_e$ ) and amount of additionally supplied hydrogen



4 pav. Valandinių dyzelino degalų sąnaudų ( $B_{d_{yz}}$ ) ir variklio efektyviojo naudingumo koeficiento ( $\eta_e$ ) priklausomybė nuo vidutinio efektyviojo slėgio ( $p_e$ ) ir papildomai tiekiamo vandenilio kiekio

Fig. 4. Dependence of fuel consumption ( $B_{d_{yz}}$ ) and engine efficiency ( $\eta_e$ ) on mean effective pressure ( $p_e$ ) and amount of additionally supplied hydrogen

Vandenilio degimas cilindre trumpina dyzelino užsiliepsnojimo gaisrą ir keičia indikatorinio slėgio cilindre kitimo pobūdį (nukrypsta nuo optimalaus), todėl, tiekiant 10 l/min vandenilio, valandinės degalų sąnaudos nežymiai padidėja. Didėjant vandenilio koncentracijai, jo šiluminės energijos išsiskyrimas cilindre didėja ir  $B_{d_{yz}}$  pradeda mažėti.

Įvertinus degalų (dyzelino ir vandenilio) šiluminę energiją ir variklio atliekamą darbą, apskaičiuotas variklio efektyvusis naudingumo koeficientas  $\eta_e$ . Degant variklyje tik dyzelino ir oro mišiniui, efektyvusis naudingumo koeficientas  $\eta_e$  didėjant variklio apkrovai nuo 30 Nm iki 120 Nm, didėja nuo 0,27 iki 0,39 (4 pav.). Papildomai tiekiant 10 l/min ir 20 l/min vandenilio kiekį,  $\eta_e$  sumažėja nuo 0,27 iki 0,37 (4 pav.). Energetinis variklio efektyvumas santykinai sumažėja iki 7 %. Esant 30 l/min vandenilio kiekiui,  $\eta_e$  kinta nuo 0,26 iki 0,38 – energetinis efektyvumas iš dalies tampa, koks buvo, tačiau išlieka mažesnis nei varikliui veikiant grynu dyzelinu.

Papildomai tiekiant vandenilio dujas, jos tikėtina pradeda degti dar prieš suslėgimo takto pabaigą, dėl to trumpėja dyzelino užsiliepsnojimo gaisrų periodas, pakinta šilumos išsiskyrimo cilindre intensyvumas. Išankstinis

vandenilio užsiliepsnojimas ir degimo slėgio pokytis, kurio neįvertina variklio valdymo algoritmas, mažina variklio efektyvųjį naudingumo koeficientą. Didėjant vandenilio kiekiui,  $\eta_e$  didėja, tačiau vis tiek išlieka mažesnis, lyginant su dyzelino  $\eta_e$ .

Atlikus eksperimentinių tyrimų metu gautų indikatorių diagramų analizę AVL BOOST programos BURN priedu, nustatyta degimo pradžia, degimo trukmė, formos rodiklis (apibūdinantis degimo intensyvumą), naudojant skirtingus degalus ir jų kiekius (2 lentelė).

Iš gautų rezultatų matyti, kad, varikliui veikiant dyzelinu, degimo pradžia yra 0,225° alkūninio veleno pasisukimo kampo (°AV), už viršutinio galinio taško (VGT). Papildomai tiekiant vandenilį, degimo pradžia prasideda anksčiau – prieš VGT. Galima teigti, kad dėl anksčiau prasidėjusio degimo dyzelino užsiliepsnojimo indukcijos periodas sutrumpėja, o tai lemia pirminės – kinetinės degimo fazės charakteristikas. Dėl sutrumpėjusio indukcijos periodo, per kurį įpurškiama mažiau pagrindinių degalų (dyzelino), gaunamas mažesnis slėgio prieaugis cilindre (1, 2 pav.). Tai sutrumpina kinetinę degimo fazę, kurios metu sudega mažiau degalų. Dėl šios priežasties susidaro mažiau kenksmingų deginių (NO<sub>x</sub>, kietųjų dalelių) (3 pav.).

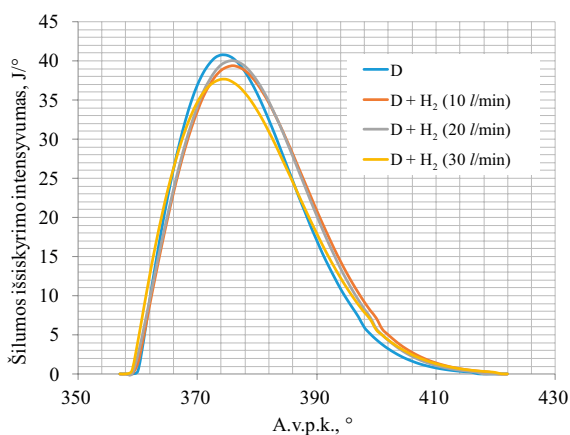
2 lentelė. Degimo proceso rodikliai

Table 2. The parameters of combustion process

Degalai	D	D + H <sub>2</sub> (10 l/min)	D + H <sub>2</sub> (20 l/min)	D + H <sub>2</sub> (30 l/min)
Degimo pradžia $\phi_0$ , (°AV)	0,225	-0,195	-0,616	-0,7
Degimo trukmė $\Delta\phi_c$ , (°AV)	55,7	59,8	58	61
Formos parametras $m_v$	0,931	0,993	1,05	0,9
Lyginamosios degių sąnaudos $b_e$ , g/kWh	214,9	216,9	216,1	216,2

Skaitinio modeliavimo rezultatai rodo, kad, papildomai naudojant vandenilį, degimo trukmė pailgėja, nes vandenilis paankstina dyzelino užsiliepsnojimą. Degimo trukmė pailgėja nuo 55,7 (°AV) (kai naudojamas dyzelinas) iki 61 (°AV) (kai naudojamas dyzelinas ir 30 l/min vandenilio).

Vertinant formos rodiklį  $m_v$ , kuris nusako šilumos išsiskyrimo intensyvumą, iš gautų rezultatų matyti, kad vandenilio priedas šilumos išsiskyrimo intensyvumą pradinėje degimo fazėje šiek tiek sumažina (5 pav.). Tą lemia mažiau intensyvi kinetinė degimo fazė ir pailgėjusi degimo proceso trukmė.



5 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo ir papildomai tiekiamo vandenilio kiekio

Fig. 5. Dependence of heat release intensity on crankshaft angle and amount of additionally supplied hydrogen

Skaitinio modeliavimo būdu nustatyta, kad vandenilis padidina lyginamąsias dyzelino sąnaudas ( $b_e$ ), nes vandenilis keičia šilumos išsiskyrimo cilindre intensyvumą, todėl, norint gauti geresnį variklio efektyvųjį naudingumo koeficientą ir mažesnes degalų sąnaudas, būtina reguliuoti dyzelino įpurškimo pradžios momentą.

## Išvados

Atlikus dyzelinio variklio, papildomai maitinamo vandeniliu, eksperimentinius tyrimus ir modeliavimą AVL BOOST programa nustatyta, kad:

1. Tiekiant 10 //min  $H_2$  apie 10 % sumažėja indikatorinis slėgis cilindre. Tiekiant 20 ar 30 //min  $H_2$  indikatorinis slėgis sumažėja apie 6 %, lyginant su varikliu, veikiančiu tik dyzelinu.
2. Naudojant  $H_2$  priedą,  $CO_2$  koncentracija deginiuose mažėja proporcingai  $H_2$  kiekiui ir sumažėja iki 18 %,  $NO_x$  – iki 35 %, dūmingumas – iki 2 kartų, HC koncentracija didinant  $H_2$  kiekį didėja iki 30 % (nuo 8 ppm iki 11 ppm).
3. Valandinės dyzelino sąnaudos  $B_{diz.}$ , naudojant 10 //min  $H_2$  priedą, nežymiai padidėja, o naudojant 20 ir 30 //min pradeda mažėti.
4. Naudojant  $H_2$  priedą variklio veikimo efektyvūs naudingumo koeficientas  $\eta_e$  sumažėja, lyginant su varikliu, veikiančiu vien tik dyzelinu.
5.  $H_2$ , patekęs į variklio cilindrą, dėl mažos jo savaiminio užsiliepsnojimo temperatūros užsidega anksčiau nei dyzelinas, todėl sutrumpėja dyzelino ir oro mišinio indukcijos periodas bei kinetinė degimo fazė ir sumažėja šilumos išsiskyrimo intensyvumas šioje degimo fazėje. Tai padeda sumažinti  $NO_x$  koncentraciją, tačiau sumažėja variklio energetinis efektyvumas.

6. Chemiškai aktyvus ir didelę difuziją turintis vandenilis pagerina dyzelino degimą ir sumažina kietųjų dalelių kiekį deginiuose.

## Padėka

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

## Literatūra

- Bari, S.; Esmaeil, M. 2010. Effect of  $H_2/O_2$  addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine, *Fuel* 89: 378–383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.030>
- Yilmaz, A. C.; Uludamar, E.; Aydin, K. 2010. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 11366–11372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.040>
- Shin, B.; Cho, Y.; Han, D.; Song, S.; Min Chun, K. 2011. Investigation of the effects of hydrogen on cylinder pressure in a split-injection diesel engine at heavy EGR, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 13158–13170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.050>
- Szwaja, S.; Grab-Rogalinski, K. 2009. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 4413–4421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020>
- Vibe, I. I. 1970. *Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren*. Berlin: Verlag Technik. 286 p.

## THE INFLUENCE OF HYDROGEN GAS ON THE MEASURES OF EFFICIENCY OF DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE

J. Latakas, S. Pukalskas, A. Rimkus, M. Melaika, R. Vėgneris, P. Stravinskas

### Abstract

In this research paper energy and ecological parameters of diesel engine which works under addition of hydrogen (10, 20, 30 //min) are presented. A survey of research literature has shown that addition of hydrogen gases improve diesel combustion; increase indicated pressure; decrease concentration of carbon dioxide ( $CO_2$ ), hydrocarbons (HC), particles; decrease fuel consumptions. Results of the experiment revealed that hydrogen gas additive decreased pressure in cylinder in kinetic combustion phase. Concentration of  $CO_2$  and nitrous oxides ( $NO_x$ ) decreased not significantly, HC – increased. Concentration of particles in engine exhaust gases significantly decreased. In case when hydrogen gas as additive was supplied, the fuel consumptions decreased a little. Using AVL BOOST software combustion process analysis was made. It was determined that in order to optimize engine work process under hydrogen additive usage, it is necessary to adjust diesel injection angle.

**Keywords:** hydrogen, exhaust gases, compression ignition engine, pollutants.