

BIODEGALŲ IR VANDENILIO ĮTAKA KIBIRKŠTINIO UŽDEGIMO VARIKLIO VEIKIMO RODIKLIAMS

Martynas DAMAŠEVIČIUS¹, Alfredas RIMKUS², Mindaugas MELAIKA³,
Jonas MATIJOŠIUS⁴

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹martynas.damasevicius@gmail.com; ²alfredas.rimkus@vgtu.lt;

³mindaugas.melaika@vgtu.lt; ⁴jonas.matijosius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikiami kibirkštinio uždegimo variklio energinių ir ekologinių rodiklių tyrimo rezultatai, gauti varikliui veikiant benzino ir biobutanolio (10 % ir 20 % tūrio) mišiniais ir papildomai tiekiant elektrolizės būdu iš vandens išgautą deguonies ir vandenilio (HHO) dujų mišinį (3,6 l/min). Biobutanolio priedas mažina šilumos išsiskyrimo intensyvumą degimo metu, mažėja degimo temperatūra bei slėgis. Tai mažina azoto oksidų (NO_x) koncentraciją, tačiau didina anglies viendeginio (CO) koncentraciją išmetamosiose dujose. Dėl paprastesnės biobutanolio molekulinės struktūros ne iki galo sudegusių angliavandenių (CH) koncentracija deginiuose mažėja. Biobutanolis dėl mažesnio šilumingumo ir lėtesnio degimo mažina variklio efektyvų sukimo momentą ir didina lyginamąsias degalų sąnaudas. Biobutanolio paveiktus variklio energinius rodiklius galima iš dalies kompensuoti paankstinus uždegimo paskubos kampą. Eksperimentiniu tyrimu nustatyta, kad neigiamą biobutanolio priedo įtaką degalų degimo procesui ir variklio energiniams rodikliams galima kompensuoti papildomai tiekiant HHO dujas, kuriose esantis vandenilis greitina ir gerina degalų mišinių degimą. AVL BOOST programa atlikta degalų mišinių degimo proceso analizė. Įvertinus eksperimentinių tyrimų ir degimo proceso skaitinio modeliavimo rezultatus nustatyta, kad, naudojant suderintą biobutanolio ir vandenilio priedą, optimalūs energiniai ir ekologiniai rodikliai gali būti pasiekti varikliui veikiant benziniui optimaliu uždegimo paskubos kampu.

Reikšminiai žodžiai: biobutanolis, vandenilis, uždegimo paskubos kampas, energiniai ir ekologiniai rodikliai, skaitinis modeliavimas.

Įvadas

Šiuo metu aktualiausia transporto problema yra tarša, todėl dauguma mokslinių tyrimų atliekama tiriant naujos kartos degalus, modifikuojant įprasto tipo vidaus degimo variklius ir kuriant naujus vidaus degimo variklius, siekiant panaudoti atsinaujinančius energinius išteklius bei gauti ekonominės naudos. Šiuo metu atlikta daug tyrimų bandant nustatyti, ar vandenilio (H₂) ir biobutanolio priedo

kartu su benzinu naudojimas vidaus degimo variklyje yra ekonomiškai naudingas, tačiau nėra tyrinėtas vandenilio ir biobutanolio priedo naudojimas degiamame mišinyje kartu. Tiriamų degalų savybės pateiktos 1 lentelėje (Gupta 2008; Inchem 2001).

Lyginant su angliavandeningais degalais, vandenilis turi specifinių savybių ir neturi anglies (Momirla, Veziroglu 2005). Moksliniais tyrimais nustatyta, kad nedidelis H₂

1 lentelė. Degalų savybės

Table 1. Fuel characteristics

Parametras	Benzinas	Biobutanolis	Vandenilis
Cheminė formulė	C ₈ H ₁₅	C ₄ H ₉ OH	H ₂
Tankis, kg/m ³	790	809,8	0,05459
Žemutinis degalų šilumingumas H ₂ , MJ/kg	44	33	120
Oktaninis skaičius	95–98	90	130
Cheminė sudėtis, % (C, H ₂ , O ₂)	86,500 13,475 0,025	65 13,5 21,5	– 100 –
Oro masė, reikalinga 1 kg degalų sudeginti, kg	14,6	11,2	34,5
Savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra, °C	260–460	343	585

priedas, variklio įsiurbiamas oro ir degalų mišiniu, leidžia varikliui veikti su liesnesniu oro ir degalų mišiniu, dėl to kiek sumažėja azoto oksidų ir anglies dvideginio (CO₂) susidarymas (Suleiman, Sayel 2010). Yilmaz *et al.* (2010) nustatė galios priaugį naudojant H₂ priedą, ir to priežastis yra didesnis vandenilio šilumingumas, todėl iš to paties kiekio degalų išsiskiria didesnis energijos kiekis. Vandenilio naudojimas variklyje labai padidina degiojo mišinio degimo greitį, nes lengviau užsiliepsnoja ir turi didesnę liepsnos greitį.

Musmar ir Al-Rousan (2011) atliktuose tyrimuose HHO dujų generavimo įranga buvo integruota į „Honda G 200“ variklį. Rezultatai parodė, kad NO_x koncentracija sumažėjo apie 50 %, CO – apie 20 %. Taip pat buvo pastebėta, kad sumažėjo suvartotų degalų kiekis, kuris svyravo tarp 20 % ir 30 %. Remiantis EL-Kassaby *et al.* (2016) tyrimų rezultatais, į degųjų mišinį tiekiant HHO dujas variklio šiluminis efektyvumas išaugo iki 10 %, degalų sąnaudos sumažėjo iki 34 %, o NO_x, CO ir CH dujų koncentracija sumažėjo atitinkamai iki 15 %, 18 % ir 14 %.

Indikatorinis slėgis variklyje ir variklio galia didėja, didėjant vandenilio kiekiui nuo 5 % iki 20 %, esant pastoviam benzino kiekiui, dėl geresnio vandenilio degimo. Viršijus 3000 min⁻¹ variklio sukis, pastebimas nepageidaujamas reiškinys – detonacija, todėl galia pradeda mažėti. Didinant vandenilio koncentraciją pastebimas angliavandenilių (CH) mažėjimas. Mažiausias CH kiekis pastebimas įpurškiant 25 % vandenilio ir neviršijus 3000 min⁻¹ sukį. Azoto oksidų (NO_x) kiekis augo, didėjant vandenilio dujų koncentracijai degalų mišinyje. Tai paaiškinama tuo, kad, vykstant efektyvesnei vandenilio dujų oksidacijai degimo kameroje, išsiskiria didesnis šilumos kiekis. Anglies viendeginio (CO) emisija mažėjo, didėjant vandenilio kiekiui degalų mišinyje, nes pasiekiamą didesnę temperatūrą degimo kameroje, kuri tinkama, kad CO galėtų iki galo oksiduotis ir prisijungti trūkstantą deguonies molekulę (Shivaprasad, Raviteja 2014). Wang ir kt. (2011) nustatė, kad vandenilio ir deguonies mišinio (HHO) priedas didina efektyvųjų naudingumo koeficientą ir vidutinį indikatorinį slėgį, palyginti su benzinu veikiančiu varikliu. HHO priedas išplėtė variklio ekonomišką veikimo ribas, prisidėjo ir prie CH ir CO koncentracijos sumažėjimo, bet padidino NO_x emisiją.

Panaudojus vidaus degimo variklyje biobutanolį, pastebimas galios mažėjimas, nes biobutanolio koncentracijos padidėjimas degaluose lemia mažesnę išskiriantį energijos kiekį iš to paties degalų kiekio. Naudojant benzino su biobutanoliu mišinį, degimas užsitęsia, todėl reikia anksti uždegimo paskubos kampa (Tornatore *et al.* 2012). Degant šiam mišiniui, pastebimas CH mažėjimas iki 12 %, kas paaiškinama paprastesne biobutanolio molekuline struktūra. Didinant biobutanolio koncentraciją benzine dėl

sumažėjusio degalų mišinio žemutinio šilumingumo, NO_x emisija mažėja apie ketvirtadalį. CO dalelėms oksiduotis iki CO₂ reikia tinkamos temperatūros ir tinkamo deguonies kiekio. Tam, kad CO prisijungtų trūkstantą deguonies molekulę, reikia aukštesnės nei 1000 °C temperatūros. Esant padidėjusiai biobutanolio koncentracijai benzine, oksidavimosi temperatūra nėra pasiekiamą, todėl pastebėta, kad CO emisija didėja (Renhua *et al.* 2013). Naudojant izobutanolio ir benzino mišinius (3, 7 ir 10 % izobutanolio benzine) dėl mažesnio anglies molekulių kiekio mišinyje (benzine yra 8, o izobutanolyje 4 (Mittal *et al.* 2013), jame susidaro nuo 27 iki 43 % mažesnė CO₂ emisija (Elfasakhany 2015).

Šio darbo tikslas – ištirti kibirkštinio uždegimo (KU) variklio energinius ir ekologinius rodiklius, papildomai į benzina įmaišant 10 % ir 20 % biobutanolio ir į įsiurbimo kolektorių tiekiant 3,6 l/min HHO dujų, bei nustatyti optimalių naudojamų mišinių uždegimo momentą.

Tyrimo metodika

Eksperimentiniams tyrimams naudotas automobilio „Nissan Qashqai“ HR 16DE kibirkštinio uždegimo (KU) variklis, valdomas programuojamu valdymo bloku MoTeC M800. Variklio techniniai rodikliai pateikti 2 lentelėje.

Išmetamųjų dujų emisija (CO, CO₂, HC ir NO_x koncentracija) matuota prieš katalizatorių naudojant AVL DiSmoke 4000 deginių analizatorių. AVL DiSmoke 4000 techniniai rodikliai pateikti 3 lentelėje.

2 lentelė. Variklio Nissan HR 16DE techniniai duomenys
Table 2. Engine Nissan HR 16DE technical data

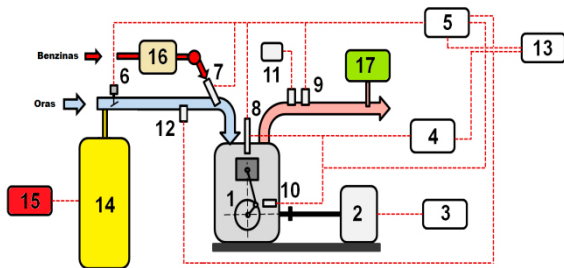
Parametras	Reikšmė
Cilindrų skaičius	4
Cilindro skersmuo, mm	78
Stūmoklio eiga, mm	83,6
Darbinis tūris, cm ³	1598
Vardinė galia, kW min ⁻¹	84 (6000)
Maksimalus sukimo momentas $M_{e\max}$, Nm min ⁻¹	156 (4400)
Suslėgimo laipsnis ϵ	10,7
Vožtuvų skaičius cilindrui	4

3 lentelė. Variklio išmetamųjų deginių analizatoriaus AVL DiSmoke 4000 techniniai duomenys

Table 3. Technical data of engine exhaust gas analyser AVL DiSmoke 4000

Parametras	Matavimo ribos	Paklaida
Azoto oksidai (NO _x)	0–5000 ppm	1 ppm
Angliavandeniliai (CH)	0–20 000 ppm	1 ppm
Anglies viendeginis (CO)	0–10 %	0,01 %
Anglies dioksidas (CO ₂)	0–20 %	0,1 %
Deguonis (O ₂)	0–25 %	0,01 %

Tyrimai atlikti naudojant laboratorinių tyrimų įrangą, kurios schema pateikta 1 pav. Matavimo duomenys perduodami į stendo elektroninio valdymo bloką, kuriame registruojami variklio veikimo parametrai: efektyvus sukimo momentas (M_e), veleno sūčiai (n , min^{-1}). Matuokle *AMX 212F* nustatytos degalų sąnaudos (B_p , kg/h). *BOSCH HFM 5* matuokle matuota išsiurbiamo oro masė (B_o , kg/h). Naudojant *AVL DiTEST DPM 800* įrenginį ir pjėzjutiklį *AVL ZI31-Y7S* uždegimo žvakėje, variklio cilindre matuotas indikatorinis slėgis (p , bar).

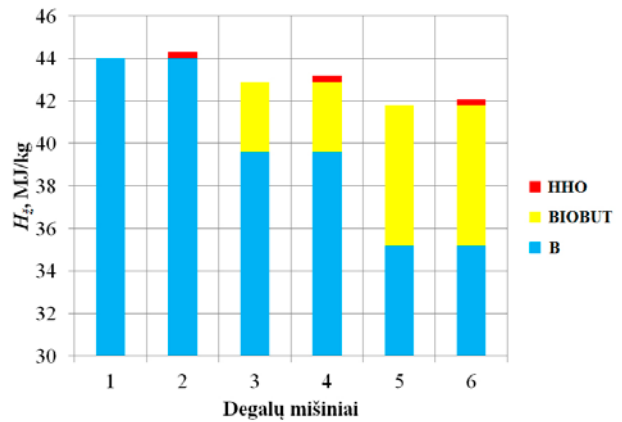


1 pav. Stendinių tyrimų įrangos schema: 1 – KU variklis *Nissan HR 16DE*; 2 – variklio apkrovos stendas *AMX 200/100*; 3 – apkrovos stendo elektroninio valdymo blokas; 4 – slėgio cilindre fiksavimo įranga *AVL DiTEST DPM 800*; 5 – variklio elektroninio valdymo blokas *MoTeC M800*; 6 – droselio valdymo servovariklis; 7 – benzino purkštuvai; 8 – uždegimo žvakė su integruotu slėgio jutikliu *AVL ZI31*; 9 – deguonies jutiklis; 10 – alkūninio veleno padėties jutiklis; 11 – išmetamųjų deginių temperatūros jutiklis; 12 – oro masės matuoklė; 13 – asmeninis kompiuteris; 14 – HHO dujų elektrolizės įrenginys; 15 – maitinimo šaltinis; 16 – benzino sąnaudų matavimo įrenginys *AMX 212F*; 17 – išmetamųjų dujų analizatorius *AVL DiSmoke 4000*

Fig. 1. Laboratory equipment scheme: 1 – SI engine *Nissan HR 16DE*; 2 – engine load stand *AMX 200/100*; 3 – engine load stand control unit; 4 – indicated pressure measurement equipment *AVL DiTEST DPM 800*; 5 – engine control unit ECU *MoTeC M800*; 6 – throttle control servomechanism; 7 – fuel injector; 8 – ignition spark with integrated pressure sensor *AVL ZI31*; 9 – oxygen sensor; 10 – engine crankshaft sensor; 11 – exhaust gas temperature sensor; 12 – air mass meter; 13 – PC computer; 14 – HHO gas equipment; 15 – electrical supply source; 16 – current clamps and multimeter; 17 – fuel tank and fuel consumption measurement equipment *AMX 212F*; 18 – exhaust gas analyser *AVL DiSmoke 4000*

HHO dujos išgaunamos elektrolizės būdu, naudojant 70 V nuolatinės įtampos srovės šaltinį. Generuojamas dujų kiekis (l/min) valdomas reguliuojant srovės stiprį (Rimkus 2013). Degiojo mišinio žemutinė šilumingumo vertė apskaičiuojama taikant adityvumo principą. Apskaičiuotas degalų mišinių šilumingumas pateiktas 2 pav.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti varikliui veikiant skirtingais uždegimo paskubos kampais (θ), kurie matuojami alkūninio veleno pasisukimo kampu prieš viršutinį galinį tašką ($^{\circ}\text{AV PVGT}$) esant 20 % atidarytam droseliui, kai $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ir oro pertekliaus koeficientas $\lambda = 1$, kurį padeda užtikrinti plačiajuostis lambda zondas. Naudoti šeši



2 pav. Apskaičiuotas tiriamų degalų mišinių žemutinis šilumingumas. 1 – B; 2 – B + HHO; 3 – B + B10 %; 4 – B + B10 % + HHO, HHO dujos; B + B20 %; 6 – B + B20 % + HHO

Fig. 2. Calculated lower heating value of investigated fuels. 1 – B; 2 – B+HHO; 3 – B+B10%; 4 – B+B10%+HHO, HHO dujos; B+B20%; 6 – B+B20%+HHO

skirtingi degalai (mišiniai) ir jų žymenys grafikuose: benzinas (B), benzinas + 3,6 l/min HHO dujų (B+HHO), benzinas + 10 % tūrio biobutanolio (B + B10 %), benzinas + 10 % tūrio biobutanolio ir HHO (B + B10 % + HHO), benzinas + 20 % tūrio biobutanolio (B + B20 %), benzinas + 20 % tūrio biobutanolio ir HHO (B + B20 % + HHO).

Vandenilis, kaip degalų priedas, HHO dujų sudėtyje yra tiekiamas į variklio oro išsiurbimo angą, pro kurią patekęs į degimo kamerą susimaišo su į kolektorių įpurkštu benzino ir biobutanolio mišiniu.

Tiriamąjo variklio degimo proceso analizė atlikta naudojant *AVL BOOST* programą. Programoje panaudotas dviejų zonų degimo modelis (Stiesch 2010).

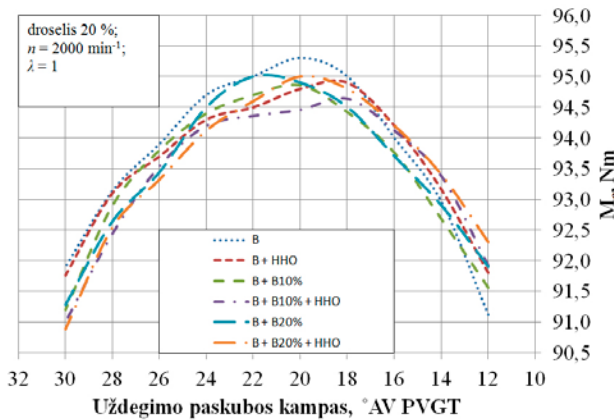
Tyrimų rezultatai ir jų analizė

Varikliui veikiant benzinu (B), esant 20 % atidarytam droseliui, kai $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ir $\lambda = 1$, didžiausias sukimo momentas ($M_e = 95,3 \text{ Nm}$) pasiekiamas esant $\theta = 20^{\circ}\text{AV PVGT}$ (3 pav.). Ankstinant uždegimą iki $\theta = 30^{\circ}\text{AV PVGT}$, sukimo momentas mažėja iki 91,9 Nm, vėlinant iki $\theta = 12^{\circ}\text{AV PVGT}$ mažėja iki 91,1 Nm. Veikiant B+HHO degalais, maksimalus 94,9 Nm sukimo momentas pasiekiamas esant $\theta = 18^{\circ}\text{AV PVGT}$. Sukimo momentas sumažėja $\approx 0,4 \%$, nes HHO dujos yra mažo tankio ir pablogina cilindrų pripildymą (Rimkus 2013), tačiau vandenilis greitina degimą ir uždegimą reikia vėlinti. Varikliui veikiant B + B10 % ir B + B20 % degalais, dėl mažesnio butanolio degimo greičio degimą reikia ankstinti iki 22°AV PVGT , siekiant maksimalių M_e reikšmių (94,9 Nm ir 95,3 Nm). B + B20 % + HHO degalų kaip ir benzino optimalus uždegimo paskubos kampas $\theta = 20^{\circ}\text{AV PVGT}$. Didesnis

vandenilio degimo greitis kompensuoja lėtesnį biobutanolio degimą, tačiau sukimo momentas sumažėja nuo 95,3 Nm iki 94,6 Nm ($\approx 0,7\%$) dėl mažesnio degalų mišinio šilumingumo (2 pav.) ir blogesnio cilindru pripildymo, kuri paveikė mažesnis HHO tankis.

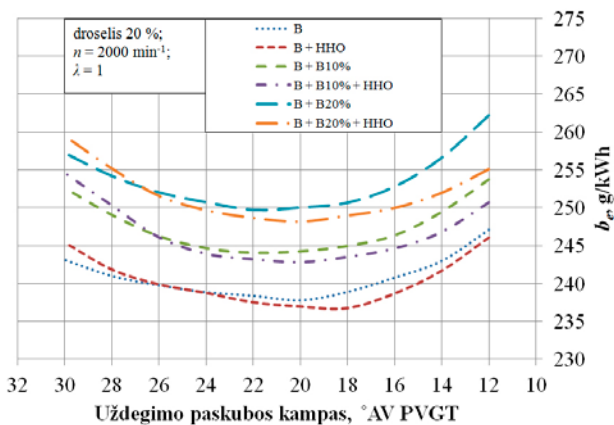
Varikliui veikiant B ir esant $\theta = 22^\circ\text{AV PVGT}$, gautos mažiausios lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos ($b_e = 238,1 \text{ g/kWh}$) (4 pav.). Tiekiant HHO dujas esant $\theta = 22^\circ\text{AV PVGT}$, b_e mažėjo iki 237,5 g/kWh. Norint kompensuoti dėl vandenilio išaugusį degimo greitį, uždegimo paskubos kampą reikia vėlinti.

Naudojant B + HHO, efektyviausiai degalų šiluminė energija paverčiama į mechaninę esant $\theta = 20^\circ\text{AV PVGT}$ ($b_e = 236,8 \text{ g/kWh}$) ir lyginamosios degalų sąnaudos sumažėja $\approx 0,5\%$. Varikliui veikiant B + B10%, b_e lyginant su B, išauga nuo 238,8 g/kWh iki 244,4 g/kWh ($\approx 2,3\%$), kai $\theta = 20^\circ\text{AV PVGT}$. Didinant biobutanolio koncentraciją



3 pav. Variklio sukimo momento M_e priklausomybė nuo uždegimo paskubos kampo ir degalų sudėties

Fig. 3. Engine torque M_e dependance on spark timing and fuel composition

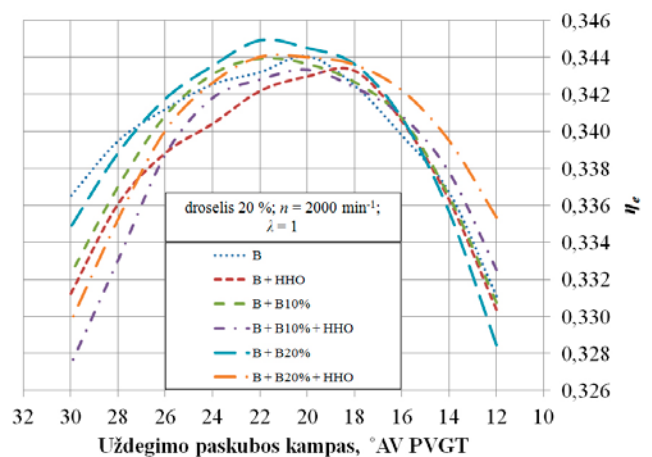


4 pav. Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų (b_e) priklausomybė nuo uždegimo paskubos kampo ir degalų sudėties

Fig. 4. Effective specific fuel consumption (b_e) dependance on spark timing and fuel composition

iki 20% (B + B20%), lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos auga nuo 238,8 g/kWh iki 250,0 g/kWh ($\approx 4,5\%$). Didesnės b_e gaunamos dėl mažesnio butanolio šilumingumo (Heywood 1988). Kai degalų mišinyje yra 10% ir 20% biobutanolio ir tiekiant HHO, pastebimas b_e mažėjimas atitinkamai nuo 244,4 g/kWh iki 243 g/kWh ($\approx 0,6\%$ ir nuo 250,0 g/kWh iki 249,1 g/kWh ($\approx 0,4\%$)).

Didžiausias efektyvusis naudingumo koeficientas η_e pasiekiamas, varikliui veikiant B + B20% degalų mišiniu ir, palyginti su benzinu, išauga nuo 0,343 iki 0,345, kai $\theta = 22^\circ\text{AV PVGT}$ (5 pav.). Naudojant HHO dujas, dėl didesnio vandenilio šilumingumo pastebimas naudingumo koeficiento mažėjimas. Didžiausias efektyvumas naudojant HHO gaunamas pavėlinus degimą iki $\theta = 18^\circ\text{AV PVGT}$ ir siekia 0,343.



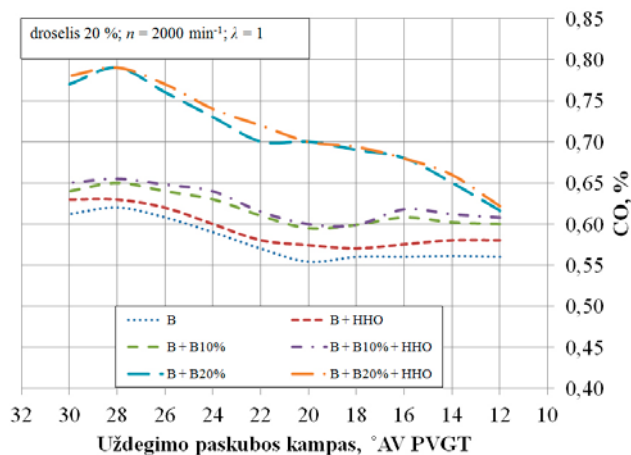
5 pav. Efektyviojo naudingumo koeficiento η_e priklausomybė nuo uždegimo paskubos kampo ir degalų sudėties

Fig. 5. Efficiency coefficient η_e dependance on spark timing and fuel composition

Varikliui veikiant B + B20% + HHO mišiniu, η_e siekia 0,344 ir prilygsta benzino efektyvumui, kai $\theta = 20^\circ\text{AV PVGT}$ (2 pav.). HHO dujos padeda pasiekti geresnį naudingumo koeficientą, nes kompensuoja lėtesnį biobutanolio degimą. Tačiau, lyginant variklio energinius rodiklius, papildomai naudojant biobutanolį ir HHO dujas, matyti, kad rodiklių pokyčiai mažesni už matavimų paklaidas ir todėl galima konstatuoti tik šių rodiklių pokyčių tendencijas.

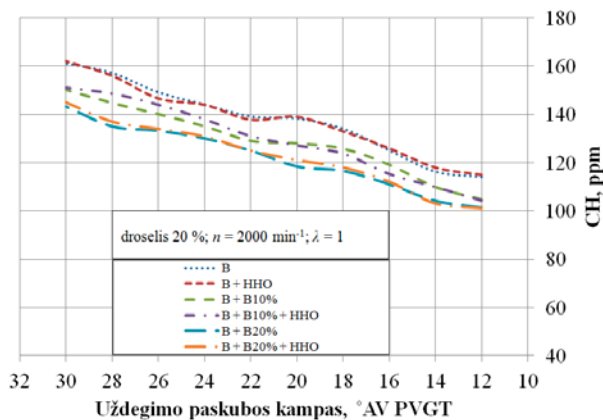
Analizuojant CO koncentraciją išmetamosiose dujose, matomas neigiamas efektas papildomai naudojant ir biobutanolį, ir tiekiant HHO dujas (6 pav.). Didžiausios CO koncentracijos deginiuose užfiksuotos esant ankstyvam uždegimui.

CO koncentracija, varikliui veikiant benzinu, yra mažiausia, kai $\theta = 20^\circ\text{AV PVGT}$, ir siekia 0,55%, papildomai tiekiant HHO dujas, išauga visu paskubos kampo keitimo diapazonu ir mažiausia (0,57%) yra, kai $\theta = 18^\circ\text{AV PVGT}$. Įdėjus 10% ir 20% biobutanolio priedo į



6 pav. Anglies monoksido (CO) koncentracijos deginiuose priklausomybė nuo uždegimo paskubos kampo ir degalų sudėties

Fig. 6. Carbon monoxide (CO) concentration in exhaust gas dependence on spark timing and fuel composition

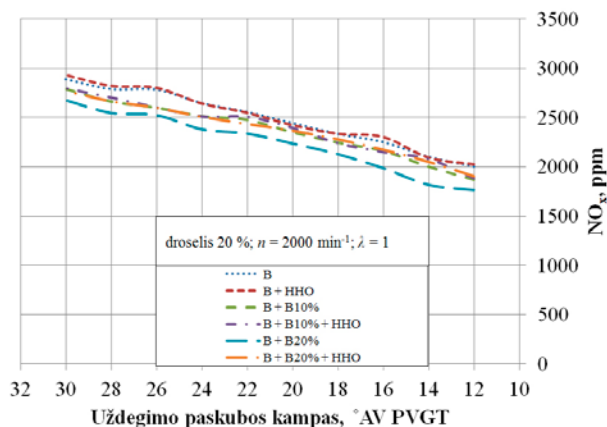


7 pav. Angliavandenilių (CH) koncentracijos deginiuose priklausomybė nuo uždegimo paskubos kampo ir degalų sudėties

Fig. 7. Hydrocarbon (CH) concentration in exhaust gas dependence on spark timing and fuel composition

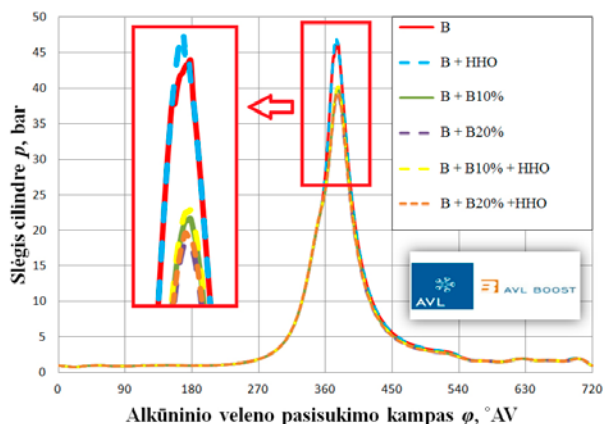
benziną, CO emisija išauga atitinkamai 0,60 % ir 0,70 % (iki 1,3 karto), $\theta = 20^\circ \text{AV PVGT}$. CO koncentracijos augimą lemia žemesnė degimo temperatūra. Tam, kad CO galėtų prisijungti trūkstamą deguonies molekulę, reikia aukštesnės nei 1000°C temperatūros (Renhua *et al.* 2013). Naudojant butanolio priedą, degalų mišinio žemutinis šiluminumas ir degimo temperatūra mažėja ir tai didina CO koncentraciją, naudojant biobutanolį kaip priedą degaluose. Naudojant HHO dujas CO koncentracija mažai kinta, nes, viena vertus, HHO blogina cilindrų pripildymą, kita vertus, gerina (katalizuoja) degimo procesą.

Visu tirtu θ diapazonu, benziną papildžius biobutanoliu (10 % ir 20 % tūrio), CH koncentracija išmetamosiose dujose atitinkamai ≈ 10 ppm ($\approx 8\%$) ir ≈ 20 ppm ($\approx 14\%$) sumažėja (7 pav.). Tai paaiškinama paprastesne biobutanolio



8 pav. Azoto oksidų (NO_x) koncentracijos deginiuose priklausomybė nuo uždegimo paskubos kampo ir degalų sudėties

Fig. 8. Nitrous oxide (NO_x) concentration in exhaust gas dependence on spark timing and fuel composition



9 pav. Slėgio cilindre priklausomybė nuo degalų sudėties ir alkūninio veleno pasisukimo kampo

Fig. 9. In cylinder pressure dependence on crank angle and fuel composition

molekuline struktūra (Renhua *et al.* 2013). HHO dujos CH koncentraciją mažai veikia, nors vandenilis ir gerina CH junginių oksidaciją, tačiau dėl blogesnio cilindrų pripildymo mažėja degimo temperatūra.

Didinant uždegimo paskubos kampą θ , degimo temperatūra didėja ir išauga NO_x emisija (Heywood 1988) (8 pav.). Varikliui veikiant benzinu ir papildomai pradėjus tiekti HHO, pastebimas NO_x koncentracijos augimas ($\approx 1,5\%$). Tai veikia HHO dujose esantis vandenilis, kuris aktyviai dalyvauja degimo reakcijose ir didina degimo temperatūrą bei slėgį (9 pav.). Didžiausias NO_x koncentracijos mažėjimas (nuo 2444 ppm iki 2234 ppm ($\approx 8\%$)), pasiektas naudojant B + B20 % degalų mišinį ($\theta = 20^\circ \text{AV PVGT}$), nes biobutanolio specifinė garavimo šiluma yra didesnė nei benzino (biobutanolio – $430,3 \text{ kJ/l}$, benzino – $223,3 \text{ kJ/l}$)

(American Chemistry Council's... 2007), o šilumingumas mažesnis. HHO dujos NO_x koncentraciją vėl padidina iki 2300 ppm.

Slėgio cilindre priklausomybė nuo variklio alkūninio veleno pasisukimo kampo φ , naudojant įvairios sudėties degalus ir esant $\Theta = 20^\circ \text{AV}$ PVGT, nustatyta naudojant skaitinio modeliavimo programą *AVL BOOST* (9 pav.). Naudojant benzina, cilindre pasiekama maksimali 2013 K temperatūra ir 46,1 MPa slėgis ($\varphi = 376^\circ \text{AV}$). Papildomai į cilindrus tiekiant HHO, pasiekama aukštesnė 2102 K temperatūra ir 47,2 MPa slėgis ($\varphi = 375,2^\circ \text{AV}$).

Varikliui veikiant B + B10 % degalais, maksimali temperatūra mažėja iki 1813 K, o slėgis – iki 39,9 MPa ($\varphi = 376,7^\circ \text{AV}$). Naudojant B + B10 % + HHO pasiekama 1845 K temperatūra ir 40,1 MPa slėgis ($\varphi = 375,8^\circ \text{AV}$). Padidinus biobutanolio koncentraciją ir naudojant B + B20 %, maksimali degimo temperatūra mažėja iki 1769 K, slėgis – iki 39,0 MPa ($\varphi = 377,1^\circ \text{AV}$), bet, tiekiant HHO, temperatūra išauga iki 1800 K, o slėgis – iki 39,3 MPa ($\varphi = 376,2^\circ \text{AV}$). Dėl mažesnio biobutanolio šilumingumo maksimali degimo temperatūra ir slėgis pasiekiami mažesni, o vandenilis spartina degimą ir didina degimo temperatūrą bei slėgį.

Išvados

Atlikus kibirkštinio uždegimo variklio, veikiančio $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ sukiais, esant 20 % atidarytam droseliui ir $\lambda = 1$, naudojant benzino, biobutanolio (10 % ir 20 % tūrio) bei HHO dujų (3,6 l/min) mišinius, eksperimentinius tyrimus bei skaitinį modeliavimą *AVL BOOST* programa, nustatyta, kad:

1. HHO dujose esantis vandenilis didina degalų mišinio degimo greitį ir, siekiant didžiausio energinio efektyvumo, uždegimą reikia vėlinti $\approx 2^\circ \text{AV}$ (nuo $\Theta = 20^\circ \text{AV}$ PVGT iki $\Theta = 18^\circ \text{AV}$ PVGT).
2. HHO dujos dėl mažo tankio veikia variklio cilindrų pripildymo, sukimo momento M_e ir efektyviojo naudingumo koeficiento η_e mažėjimą, tačiau užfiksuoti pokyčiai neviršija matavimo paklaidų ribų.
3. 20 % biobutanolio benzine lėtina degalų mišinio degimo greitį ir uždegimą reikia ankstinti $\approx 2^\circ \text{AV}$. Palyginti su benzinu, butanolis turi mažesnę šilumingumą ir tai η_e nedaug padidina (nuo 0,344 iki 0,343).
4. Naudojant B + B20 % + HHO degalų mišinį uždegimo paskubos kampo reguliuoti nereikia, nes lėtesnį benzino ir biobutanolio mišinio degimą pagreitina vandenilis ir šiuo atveju variklio efektyvumas naudingumo koeficientas nekinta.

5. Didinant biobutanolio koncentraciją degalų mišinyje iki 20 %, CO koncentracija išmetamosiose dujose didėja iki 1,3 karto, nes mažėja degalų mišinio šilumingumas bei degimo temperatūra ir tai blogina degimo procesus. HHO dujų priedas CO koncentraciją mažai veikia, nes, viena vertus, HHO blogina cilindrų pripildymą, kita vertus, gerina (katalizuoja) degimo procesą.
6. Padidinus biobutanolio koncentraciją iki 20 %, visu uždegimo paskubos kampų keitimo diapazonu, CH koncentracija išmetamosiose dujose santykinai sumažėjo $\approx 14\%$ dėl paprastesnės biobutanolio molekulinės struktūros. HHO dujos CH koncentraciją mažai veikia, nors vandenilis ir gerina CH junginių oksidaciją, tačiau dėl blogesnio cilindrų pripildymo mažėja degimo temperatūra ir blogėja degimas.
7. Labiausiai NO_x koncentracija išmetamosiose dujose mažėja ($\approx 8\%$) naudojant B + B20 % degalų mišinį, nes mažesnis biobutanolio šilumingumas ir didesnė specifinė garavimo šiluma sumažina maksimalią degimo temperatūrą. HHO dujos NO_x koncentracijai, varikliui veikiant benzinu, daro mažą poveikį, tačiau, degalų mišinyje didinant biobutanolio koncentraciją, vandenilis NO_x koncentraciją didina intensyviau, nes gerina dėl biobutanolio pablogėjusį degimo procesą.

Padėka

Straipsnyje atlikto 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

- Elfasakhany, A. 2015. Experimental investigation on SI engine using gasoline and a hybrid iso-butanol/gasoline fuel, *Energy Conversion and Management* 95: 398–405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.022>
- EL-Kassaby, M. M.; Eldrainy, Y. A.; Khidr, M. E.; Khidr, K. I. 2016. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions, *Alexandria Engineering Journal* 55: 243–251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.016>
- Gupta, R. G. 2008. *Hydrogen fuel: production, transport and storage*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420045772>
- Heywood, J. B. 1988. *Internal combustion engine fundamentals*. 1st ed. New York: McGraw-Hill.
- Inchem. 2001. *n-Butyl Alcohol CAS No: 71–36–3. SIDS Initial Assessment Report for SIAM 13* [online]. International Programme on Chemical Safety [cited October 2016].

Available from Internet: <http://www.inchem.org/documents/sids/sids/71363.pdf>

- 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(20): 11366–11372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.040>
- Mittal, N.; Athony, R. L.; Bansal, R.; Kumar, C. R. 2013. Study of performance and emission characteristics of a partially coated LHR SI engine blended with n-butanol and gasoline, *Alexandria Engineering Journal* 52(3): 285–293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2013.06.005>
- Momirlan, M.; Veziroglu, T. N. 2005. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a clean planet, *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 795–802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.011>
- Musmar, S, A.; Al-Rousan, A. A. 2011. Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines, *Fuel* 90: 3066–3070. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.013>
- Renhua, F.; Jing, Y.; Daming, Z.; Banglin, D.; Jianqin, F.; Jingping, L.; Xiaoqiang, L. 2013. Experimental study on SI engine fuelled with butanol–gasoline blend and H₂O addition, *Energy Conversion and Management* 74: 192–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.021>
- Rimkus, A. 2013. *Vidaus degimo variklio darbo efektyvumo didinimas panaudojant Brauno dujas*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 156 p.
- Shivaprasad, K. V.; Raviteja, S. 2014. Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on combustion performance and emissions characteristics of a spark ignition high speed gasoline engine, *Procedia Technology* 14: 141–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.019>
- Stiesch, G. 2010. *Modeling Engine spray and combustion processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Suleiman, Q. A.; Sayel, M. F. 2011. Experimental Hydrogen Booster Model, *World Applied Sciences Journal* 15(8): 1168–1171.
- Tornatore, C.; Marchitto, L.; Valentino, G.; Corcione, F. E.; Merola, S. S. 2012. Optical diagnostics of the combustion process in a PFI SI boosted engine fueled with butanole – gasoline blend, *Energy* 45(1): 277–287. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.006>
- Wang, S.; Ji, C.; Zhang, J.; Zhang B. 2011. Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogen-oxygen mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy* 36(17): 11164–11173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.138>

BIOFUEL AND HYDROGEN INFLUENCE FOR OPERATION PARAMETERS OF SPARK IGNITION ENGINE

M. Damaševičius, A. Rimkus, M. Melaika, J. Matijošius

Abstract

Paper presents research of efficient and ecological parameters of gasoline engine working with biobutanol (10% and 20% by volume) and additionally supplying oxygen and hydrogen (HHO) gas mixture (3.6 l/min), which was obtained from water by electrolysis. Biobutanol addition decreases rate of heat release, the combustion temperature and pressure are lower, which has an influence on lower nitrous oxide (NO_x) emission in exhaust gases. However, biobutanol increases carbon monoxide (CO) concentration. Biobutanol fuel has a simpler molecular structure, therefore the concentration of HC in the exhaust gas is decreasing. Due to lower heating value of biobutanol fuel and slower combustion process, the engine efficiency decreases and specific fuel consumptions increase. The change of engine energetical indicators due to biobutanol, can be compensated with advanced ignition angle. Using experimental investigation, it was determined, that negative biobutanol influence for the combustion process and engine efficient indicators can be compensated also by additional supplied HHO gas, in which the hydrogen element improve fuel mixture combustion. Fuel combustion process analysis was carried out using *AVL BOOST* software. Experimental research and combustion process numerical simulation showed that using balanced biobutanol and hydrogen addition, optimal efficient and ecological parameters could be achieved, when engine is working for petrol fuel typical optimal spark timing.

Keywords: biobutanol, hydrogen, advanced ignition angle, efficient and ecological indicators, numerical simulation.