



16-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,**  
vykusios 2013 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2013, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2013 г., Вильнюс, Литва

## BIOMETANO IR BENZINO MIŠINIO ĮTAKOS KIBIRKŠTINIO UŽDEGIMO VARIKLIO VEIKIMO PARAMETRAMS TYRIMAI

Saugirdas Pukalskas<sup>1</sup>, Zenonas Bogdanovičius<sup>2</sup>, Jonas Matijošius<sup>3</sup>, Mindaugas Melaika<sup>4</sup>,  
Alfredas Rimkus<sup>5</sup>, Ričardas Vėgneris<sup>6</sup>, Paulius Stravinskas<sup>7</sup>, Rytis Zautra<sup>8</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup> Vilniaus Gedimino technikos universitetas

<sup>8</sup> Alytaus kolegija

El. paštas: <sup>1</sup>saugirdas.pukalskas@vgtu.lt; <sup>2</sup>zenonas.bogdanovicus@vgtu.lt; <sup>3</sup>jonas.matijosius@vgtu.lt;  
<sup>4</sup>mindaugas.melaika@dok.vgtu.lt; <sup>5</sup>alfredas.rimkus@vgtu.lt; <sup>6</sup>ricardas.vegneris@vgtu.lt;  
<sup>7</sup>paulius.stravinskas@vgtu.lt, <sup>8</sup>rytis.zautra@akolegija.lt

**Santrauka.** Straipsnyje pateikiamas kibirkštinio uždegimo (KU) variklio veikiančio biometano (metano (CH<sub>4</sub>) 85 % ir anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>) 15 %) dujomis ir benzino mišiniu energetinių ir ekologinių rodiklių tyrimas. Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta kad biometano dujų priedas sumažina CO<sub>2</sub>, CH ir NO<sub>x</sub> koncentraciją išmetamosiose dujose kadangi metano dujos geriau maišosi su oru ir sudaro homogeninį degųjų mišinį. Bandytųjų rezultatai parodė, kad biometano dujų priedas sumažina CH ir NO<sub>x</sub>, tačiau padidino CO koncentraciją išmetamosiose dujose. Dėl didesnio dujų šilumingumo sumažėjo lyginamosios degalų sąnaudos, tačiau variklio efektyvusis naudingumo koeficientas, padidinus metano masės dalį degaluose virš 30 %, sumažėjo. Panaudojant eksperimentų metu nustatytas degalų sąnaudas, galios rodiklius, naudoto degalų mišinio sudėties duomenis ir įvedant juos į *AVL BOOST* skaitinio modeliavimo programą, gautos variklio darbo ciklo indikatorinio slėgio ir temperatūros reikšmės. Skaitinis modeliavimas rodo, kad papildomai tiekiant biometano dujas keičiasi variklio degiojo mišinio degimo procesas ir, siekiant optimizuoti variklio darbą, būtina reguliuoti uždegimo paskubos kampą.

**Raktiniai žodžiai:** biometanas, išmetamosios dujos, kibirkštinio uždegimo vidaus degimo variklis, teršalai.

### Įvadas

Deginant iš Žemės išgaunamas iškaskas, į atmosferą išsiskiria dideli kiekiai pavojingų junginių, ore sparčiai didėja anglies dvideginio koncentracija, kuri didina šiltnamio efektą. Dėl šių priežasčių vis didesnis dėmesys skiriamas alternatyvioms degalų sudėtimis bei rūšims iš atsinaujinančių energijos šaltinių.

Biometano dujos yra išgaunamos iš atsinaujinančių energijos išteklių ir viena iš švariausių šiuo metu naudojamų automobilių degalų rūšių. Jos naudojamos kaip alternatyva mažinant kenksmingų išmetamųjų medžiagų kiekį. Ekologinė nauda naudojant biometano dujas yra neabejotina. Tai yra nebrangūs, švarūs, turintys aukštą oktanių skaičių degalai.

Biometano dujos išskiria daugiau energijos, nei benzinas ar dyzelinas. Jų apatinis šilumingumas 47,7 MJ/kg, benzino 44 MJ/kg (Matijošius *et al.* 2009).

ES Transporto sektoriui keliamas tikslas, kad 2020-aisiais metais alternatyvūs degalai sudarytų: gamtinės dujos – 10 %, vandenilis – 5 % kiekvienoje ES šalyje. 2010 metais – 2 % gamtinių dujų turėtų būti suvartojama transporto sektoriuje kiekvienoje ES šalyje.

Pasaulyje didėjant problemoms dėl energetinio saugumo ir išmetamų dujų emisijų iš mobilių taršos šaltinių, kurių didžiausią dalį virš 90 % sudaro transportas (Matijošius *et al.* 2009), nuolat auga alternatyvių degalų poreikis. Esant šioms problemoms, šiuolaikinė automobilių gamyba sprendžia vis didėjančią iššūkį tarp aukštesnės galios, geresnio degalų taupymo ir reikalavimų žemesnėms teršalų emisijoms (Stan 2002).

Egzistuoja kelios realiausios alternatyvos benzinui alternatyvių degalų srityje. Tai suslėgtos gamtinės dujos (SGD), kuriose vyraujantis komponentas yra metanas, suskystintos naftos dujos (SND), vandenilis, taip pat etanolis, metanolis ir butanolis. Jie gali būti panaudoti kaip sudėtinė degalų mišinio dalis, ar kaip benzino pakaitalas. Ekonominiu požiūriu pigiausiai naudoti SGD, dėl didelių resursų ir mažos kainos (Morita 2003).

SGD naudojimas turi šiuos pranašumus prieš tradicinius degalus: dėl didesnio oktano skaičiaus, kuris leidžia padidinti variklio suslėgimo laipsnį, pasiekiamas didesnis šiluminis naudingumo koeficientas; dėl mažėjančio anglies ir vandenilio santykio dujose pasiekama žemesnė CO<sub>2</sub> emisija (Shiga *et al.* 2002).

Lyginant papildomą SGD tiekiamą tiesioginio įpurškimo KU varikliui ir varikliui su karbiuratoriumi, pastebimas pirmojo pranašumas. Jis pasireiškė iki 8 % didesne išvystoma variklio galia ir geresniu mišinio maišymusi (Mohamad 2006).

SGD ir benzino teršalų emisijų palyginimas parodė kad, gaunant tą patį energijos kiekį, SGD emisija turi žymiai mažiau žalingų degimo produktų, tokių kaip iki 20 % CO<sub>2</sub>, iki 15 % NO<sub>x</sub> (Bradley, 1996) ir iki 87 % CH (Geok *et al.* 2009).

Papildomai naudojant SGD KU variklyje galima sumažinti lyginamąsias degalų sąnaudas vidutiniškai iki 22 % lyginant su gryno benzino naudojimu, bet tuo pačiu 8–16 % mažėja efektyvaus slėgio reikšmės variklyje (Geok *et al.* 2009).

Šio darbo tikslas – pagerinti KU variklio veikimą, papildomai tiekiant biometano dujas. Tam reikia, tiriant papildomai tiekiamų biometano dujų įtaką variklio energetiniams ir ekologiniams rodikliams, nustatyti racionalų tiekiamų dujų kiekį ir optimalų degiojo mišinio uždegimą.

## 1. Tyrimų metodika

Ekspirimentiniai bandymai atlikti VGTU, Transporto inžinerijos fakulteto, Automobilių transporto katedros, Vidaus degimo variklių laboratorijoje. Tyrimams buvo naudojamas benzinas ir papildomai į vidaus degimo variklio įsiurbimo traktą buvo tiekiamos biometano dujos, sudarytos iš 85 % metano (CH<sub>4</sub>) ir 15 % anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>) dujų. Biometanas įpurškiamas naudojant dujų įpurškimo sistemą OSCAR-N.

Benzino ir biometano dujų sąnaudos matuojamos atskirai ir perskaičiuojamos į valandines degalų sąnaudas, kg/h.

Bandomas variklis veikia pastoviais sūkais ( $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ), variklio efektyvusis sukimo momentas ir galia reguliuojami keičiant droselio sklendės padėtį.

Tiriamąjį variklio degimo proceso sintezę atlikta ši procesą modeliuojant *AVL BOOST* programa. Programoje panaudotas dviejų zonų degimo modelis (Stiesch *et al.* 2010). Atsižvelgiant į tiriamųjų degalų parametrus, bendru pavidalu nagrinėjama atvira termodinaminė sistema, kuri keičiasi mase ir energija su kitomis variklio sistemomis. Tai leidžia suformuoti darbo ciklo modelį, kaip tokių procesų submodelį: dujų kaitos procesų; slėgimo procesų; degimo ir išsiplėtimo procesų.

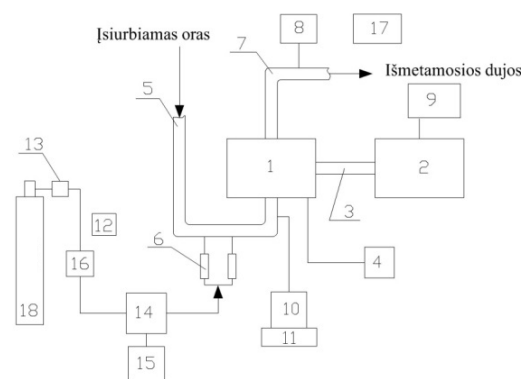
Šilumos išsiskyrimo intensyvumas ciklo metu nustatomas naudojant (Вибе 1962) šilumos išsiskyrimo funkciją:

$$\frac{dx}{d\varphi} = 6,908 \frac{m_v + 1}{\varphi_z} \left( \frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m_v} \exp \left[ -6,908 \left( \frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m_v + 1} \right];$$

čia:  $m_v$  – degimo charakterio koeficientas ( $m_v = 2 - 4$ );  $\varphi_z$  – degimo trukmė išreikšta alkūninio veleno pasisukimo kampų ( $\varphi_z = 40 - 60^\circ$ ).

## 2. Eksperimentinių tyrimų įranga

Ekspirimentiniai tyrimai atlikti naudojant laboratorinių tyrimų įrangą kuri susideda iš sukurinių srovių apkrovos stendo, kardanine pavara sujungto su KU vidaus degimo varikliu, benzino ir dujinių degalų padavimo ir sąnaudų matavimo įrangos, įrangos deginių sudėčiai matuoti. Laboratorinių tyrimų įrangos schema pateikta 1 pav.



**1 pav.** Laboratorinių tyrimų įrangos schema: 1 – KU variklis; 2 – variklio apkrovos stendas; 3 – kardaninis velenas; 4 – variklio valdymo blokas EVB; 5 – įsiurbimo kolektorius; 6 – dujų purkštuvai; 7 – išmetimo kolektorius; 8 – deginių analizatorius; 9 – apkrovos stendo valdymo blokas; 10 – degalų talpa; 11 – degalų sąnaudų matavimo prietaisas; 12 – chronometras; 13 – aukšto slėgio reduktorius; 14 – žemo slėgio reduktorius; 15 – dujinės įrangos valdymo blokas; 16 – dujų skaitiklis; 17 – personalinis kompiuteris; 18 – dujų balionas

KU variklis su sūkurinių srovių apkrovos stendu *AMX 200/100* sujungtas velenu, kurio abiejuose galuose yra lygių kampinių greičių lankstai. Sukimo momentas matuojamas dinamometrinio būdu su tenzometrinių jutiklių pagalba. Apkrovos momento duomenys perduodami į pagrindinį stendo elektroninio valdymo bloką kur registruojami variklio darbo parametrai: sukimo momentas, galia, veleno sūkliai, aplinkos oro temperatūra, slėgis ir drėgmė.

Tyrimams panaudotas automobilio *Nissan Qashqai* KU *HR 16* tipo vidaus degimo variklis valdomas programuojamu valdymo bloku *MoTeC M800*. Bandomo variklio techniniai duomenys lentelėje.

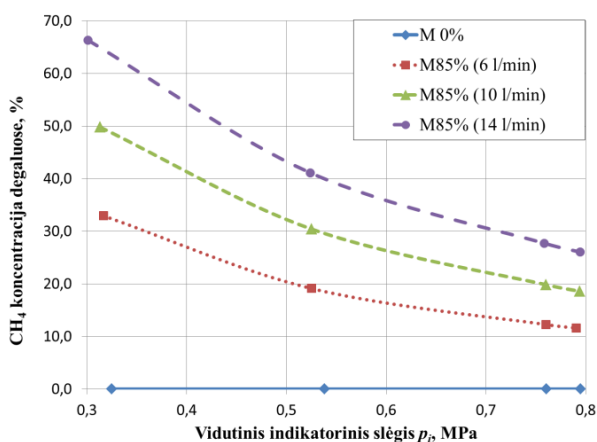
1 lentelė. Variklio *HR 16* techniniai duomenys

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

Išmetamųjų dujų emisija buvo matuojama prieš katalizatorių naudojant *AVL DiSmoke 4000* deginių analizatorių.

Benzino sąnaudos buvo matuojamos *AMX 212F* prietaisu, kuris automatiškai valdomas pagrindinio apkrovos stendo valdymo bloku.

Biometano sąnaudos buvo matuojamos dujų skaitikliu *KG-0095-G06-94-10*, kurio:  $Q_{min} = 0,06$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{max} = 10,00$  m<sup>3</sup>/h, matavimo paklaida 0,001 m<sup>3</sup>.



2 pav. Metano koncentracijos degalų mišinyje priklausomybė nuo vidutinio indikatorinio slėgio  $p_i$  ir biometano kiekio

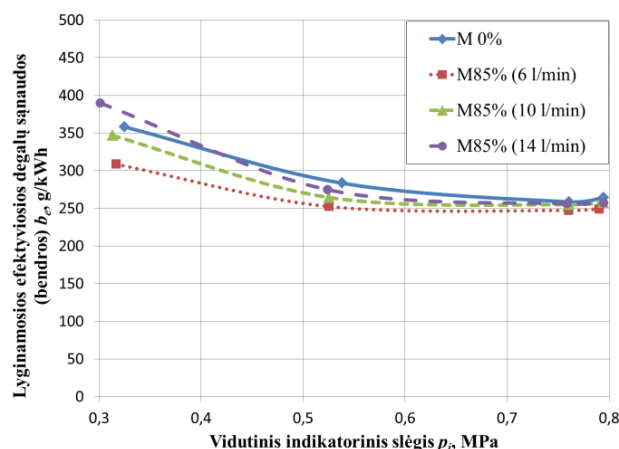
### 3. Tyrimų rezultatai

Rezultatai gauti tiekiant 6 l/min biometano dujų diagramose pažymėti M85 % (6 l/min), tiekiant 10 l/min dujų – M85 % (10 l/min), tiekiant 14 l/min dujų – M85 % (14 l/min), be papildomo dujų tiekimo – M0 %.

Į variklio įsiurbimo kolektorių tiekiant pastovų biometano kiekį (0 l/min, 6 l/min, 10 l/min ir 14 l/min) ir didinant variklio apkrovą, suvartojamo benzino kiekis didėja. 2 pav. matome procentinę metano (CH<sub>4</sub>) masės dalį priklausomai nuo tiekiamo dujų kiekio ir variklio apkrovos.

Didinant variklio apkrovą nuo vidutinio indikatorinio slėgio 0,3 iki 0,75 MPa benzino lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos  $b_e$  sumažėjo nuo 358,4 iki 258,7 g/kWh (27 %) ir pasiekė mažiausią reikšmę (3 pav.). Toliau didinant apkrovą iki  $p_i = 0,8$  MPa,  $b_e$  išauga iki 264,3 g/kWh (2 %). Taip pat ir naudojant tiriamus benzino ir biometano mišinius esant  $p_i \approx 0,75$  MPa apkrovos pasiekiamos mažiausios bendros benzino ir biometano lyginamosios degalų sąnaudos. Tai reiškia, kad šiame darbo režime paruošiamas optimalios sudėties darbinis mišinys, nustatytas tinkamas uždegimo paskubos kampas išauga variklio mechaninis naudingumo koeficientas  $\eta_m$  ir variklis efektyviausiai degalų šiluminę energiją paverčia į mechaninę.

Į įsiurbimo kolektorių papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų bendros mišinio  $b_e$  visame apkrovos diapazone yra mažiausios lyginant su kitais degalų mišiniais (3 pav.). Palyginus su benzinu, esant  $p_i = 0,32$  MPa, bendros  $b_e$  sumažėja nuo 358,4 iki 308,8 g/kWh (14 %), esant  $p_i = 0,53$  MPa sumažėja nuo 283,5 iki 252,5 g/kWh

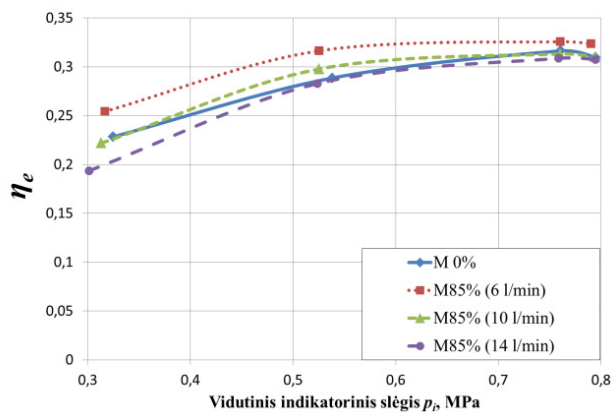


3 pav. Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų priklausomybė nuo vidutinio indikatorinio slėgio  $p_i$  ir biometano kiekio

(11 %), esant  $p_i = 0,8$  MPa sumažėjo nuo 264,3 iki 249,2 g/kWh (6 %). Papildomai įpurškiant 10 l/min biometano dujų,  $b_e$  yra mažesnės nei naudojant tik benzina, bet sąnaudų sumažėjimas nėra toks ženklus, kaip papildomai tiekiant 6 l/min dujų.

Įpurškiant 14 l/min dujų kiekį ir esant apkrovimui  $p_i = 0,3$  MPa bendros  $b_e$  išauga 8% lyginant su grynu benzinu, esant  $p_i = 0,53$  MPa  $b_e$  sumažėja 3%. Tai paaiškinama tuo, kad metano koncentracijai degaluose viršijus 50% (2 pav.) ženkliai pasikeičia darbinio mišinio degimo pobūdis (išauga degimo trukmė, pasikeičia degimo charakteris) (8 pav.). Maksimalus slėgis cilindre pasiekiamas alkūniniam velenui pasisukus daugiau kaip  $15^\circ$  už viršutinio rimties taško (VRT) ir degalų slėgis neefektyviai paverčiamas į mechaninę energiją (Moreno *et al.* 2012).

Papildomai tiekiant mažesni biodegalų kiekį ir metano koncentracija degaluose neviršijant 30 %, dujos ženkliai neįtakoja degiojo mišinio degimo pobūdžio, t.y. maksimalus degimo slėgis pasiekiamas ties optimaliu alkūninio veleno pasisukimo kampu ( $12^\circ$ – $15^\circ$  už VRT). Kadangi metanas yra dujiniame pavidale, jo išgarinimui nereikia papildomos energijos ir laiko, bei šių dujų šilumingumas yra didesnis už benzino, tai sumažina lyginamąsias degalų sąnaudas.

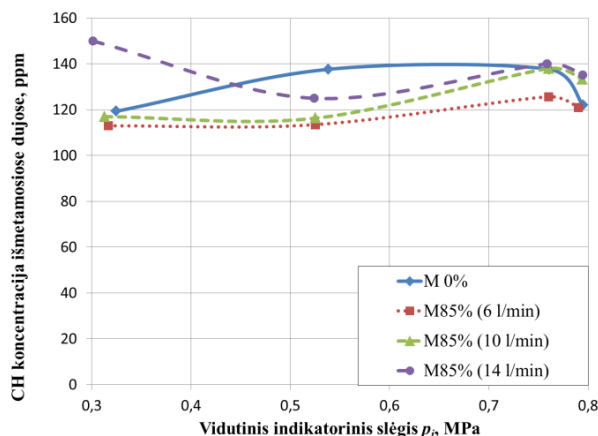


4 pav. Efektyviojo naudingumo koeficiento priklausomybė nuo vidutinio indikatorinio slėgio  $p_i$  ir biometano kiekio

Efektyvusis naudingumo koeficientas  $\eta_e$  (4 pav.) tiesiogiai priklauso nuo lyginamųjų degalų sąnaudų kitimo, degalų šilumingumo ir mechaninio naudingumo koeficiento  $\eta_m$ . Didžiausias  $\eta_e$  pasiekiamas papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų. Esant  $p_i = 0,32$  MPa palyginus su grynu benzinu  $\eta_e$  išauga nuo 0,228 iki 0,254 (10 %), esant  $p_i = 0,53$  MPa – nuo 0,289 iki 0,316 (9 %). Toliau didinant apkrovą  $\eta_e$  priaugis, papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų, mažėja ir esant  $p_i = 0,8$  MPa  $\eta_e$  išauga nuo 0,310 iki 0,323 (4 %). Papildomai tiekiant didesni

biodujų kiekį, palyginus su 6 l/min,  $\eta_e$  sumažėja visame apkrovų diapazone, nes išauga lyginamosios degalų sąnaudos ir degalų mišinio šilumingumas.

Visame apkrovos diapazone  $p_i = 0,3 - 0,8$  MPa įsiurbimo kolektorių papildomai įpurškiant 6 l/min ir 10 l/min biometano dujų (metano koncentracijai degaluose neviršijant 30 %), užfiksuotas CH koncentracijos išmetamosiose dujose sumažėjimas (5 pav.).

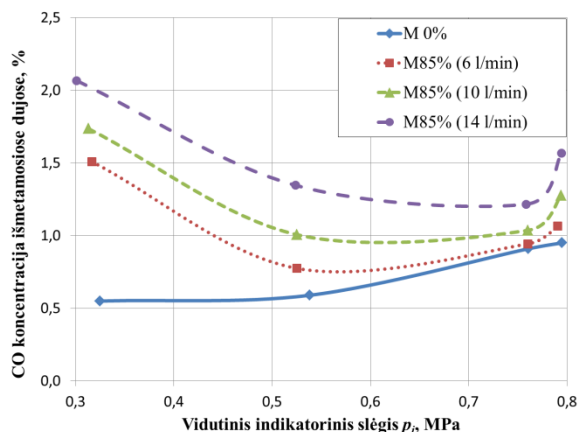


5 pav. Angliavandenilų koncentracijos išmetamosiose dujose priklausomybė nuo vidutinio indikatorinio slėgio  $p_i$  ir biometano kiekio

Didžiausias efektas pasiektas papildomai tiekiant 6 l/min biometano esant  $p_i = 0,53$  MPa (metano koncentracija degaluose 20%). Esant šių sąlygų CH koncentracija deginiuose sumažėjo nuo 138 ppm iki 113 ppm (18%) ir tai paaiškinama aukščiau aprašytu efektyviu degimo procesu, lyginamųjų degalų sąnaudų sumažėjimu. Tačiau esant  $p_i = 0,3$  MPa, papildomai įpurškiant 14 l/min biometano (metano koncentracija degaluose 65%), CH koncentracija išauga nuo 119 ppm iki 150 ppm ir yra 20% didesnė nei varikliui veikiant tik benzino degalais. Metano koncentracijai degaluose viršijus 30%, CH koncentracija deginiuose didėja, nes benzinui nustatytas uždegimo paskubos kampas yra per mažas šiam degalų mišiniui (Moreno *et al.* 2012), degimas užsitęsia, cilindre maksimali temperatūra krinta (8 pav.) ir angliavandeniliai pilnai nesudega.

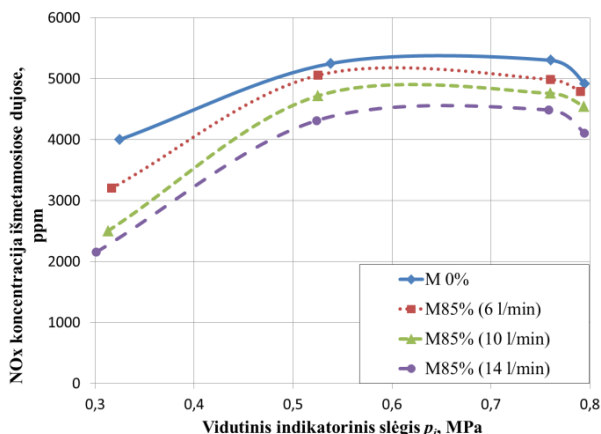
Analizuojant anglies viendeginio CO koncentraciją išmetamosiose dujose yra matomas neigiamas efektas papildomai tiekiant biometano dujas (6 pav.). Didžiausias CO koncentracijos padidėjimas deginiuose užfiksuota esant mažoms apkrovoms. Esant  $p_i \approx 0,3$  MPa varikliui dirbant benzinu nustatyta 0,6% CO koncentracija. Prie šios apkrovos, papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų, CO koncentracija deginiuose išauga iki 1,5%

(150 %); tiekiant 10 l/min dujų, CO koncentracija išauga iki 1,74 % (183 %); tiekiant 14 l/min biometano dujų, CO koncentracija išauga iki 2,07 % (245 %). Tai paaiškinama tuo, kad biometano sudėtyje esančios CO<sub>2</sub> dujos mažina darbinio mišinio degimo temperatūrą, dėl mažesnio metano degimo greičio degimas užsitęsia (8 pav.) ir tai blo-gina anglies oksidaciją. Didinant variklio apkrovimą ir mažėjant biometano daliai degaluose CO koncentracijos deginiuose priaugis mažėja, bet  $p_i$  viršijus 0,75 MPa, dėl biometano CO koncentracija vėl pradeda augti.



6 pav. CO koncentracijos išmetamosiose dujose priklausomybė nuo vidutinio indikatorinio slėgio  $p_i$  ir biometano kiekio

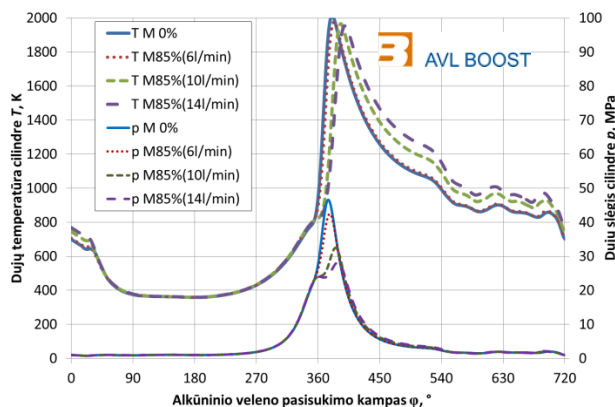
Azoto oksidų NO<sub>x</sub> susidarymas tiesiogiai priklauso nuo temperatūros variklio cilindre ir deguonies kiekio. Didinant papildomai tiekiamų biometano dujų kiekį degijame mišinyje azoto oksidų NO<sub>x</sub> koncentracija deginiuose mažėja (7 pav.).



7 pav. Azoto oksidų koncentracijos išmetamosiose dujose priklausomybė nuo vidutinio indikatorinio slėgio  $p_i$  ir biometano kiekio

Papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų visame apkrovimų diapazone NO<sub>x</sub> koncentracija deginiuose sumažėjo 4 %–20 %; tiekiant 10 l/min dujų NO<sub>x</sub> koncentracija sumažėjo 6 %–37 %; tiekiant 14 l/min dujų NO<sub>x</sub> koncentracija sumažėjo 15 % – 46 %. Tai galima paaiškinti tuo, kad papildomai tiekiamose biometano dujose yra 15 % CO<sub>2</sub> dujų kurios degimo reakcijoje nedalyvauja ir mažina degimo temperatūrą. Taip pat metano dujų liepsnos temperatūra yra mažesnė lyginant su benzino (Soberanis *et al.* 2010) ir maksimali dujų temperatūra cilindre sumažėja (8 pav).

Dujų temperatūros ir slėgio cilindre priklausomybė nuo variklio alkūninio veleno pasisukimo kampo  $\varphi$  nustatyta naudojant skaitinio modeliavimo programą AVL BOOST (8 pav.). Modeliavimas atliktas esant  $p_i = 0,53$  MPa variklio apkrovai, 12° uždegimo paskubos kampui ir įvertinus degalų elementinę cheminę sudėtį. Nustatyta, kad naudojant benzina cilindre pasiekama maksimali 2013 K temperatūra esant  $\varphi = 381^\circ$ ; papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų – 1978 K esant  $\varphi = 384^\circ$ ; tiekiant 10 l/min dujų – 1966 K esant  $\varphi = 393^\circ$ ; tiekiant 14 l/min dujų – 1956 K esant  $\varphi = 399^\circ$ . Dėl didėjančio CO<sub>2</sub> kiekio cilindre ir žemesnės metano degimo temperatūros ir mažesnio greičio darbinio mišinio degimas lėtėja, užsitęsia ir cilindre mažėja maksimali dujų temperatūra, tačiau išmetami karštesni deginiai.



8 pav. Dujų temperatūros ir dujų slėgio cilindre priklausomybė nuo biometano kiekio ir alkūninio veleno pasisukimo kampo

Skaitiniu modeliavimu nustatyta, kad naudojant benzina esant  $p_i = 0,53$  MPa cilindre pasiekiamas maksimalus 46,6 MPa slėgis esant  $\varphi = 375^\circ$ ; papildomai tiekiant 6 l/min biometano dujų – 42,5 MPa esant  $\varphi = 377^\circ$ ; tiekiant 10 l/min dujų – 32,5 MPa esant  $\varphi = 385^\circ$ ; tiekiant 14 l/min dujų – 28,2 MPa esant  $\varphi = 389^\circ$  (8 pav.). Didėjant biometano dujų kiekiui darbiniam mišinyje, dėl lėtesnio mišinio degimo maksimalus dujų slėgis cilindre

mažėja, pasiekiamas vėliau nei 15° VRT ir mažiau efektyviai paverčiamas į mechaninį darbą. Siekiant padidinti variklio veikimo efektyvumą, priklausomai nuo degalų sudėties reikia reguliuoti uždegimo paskubos kampą.

## Išvados

Atlikus kibirkštinio uždegimo variklio, veikiančio biometano dujų ir benzino mišiniu, eksperimentinius tyrimus bei degimo proceso sintezę skaitinio modeliavimo programa *AVL BOOST* nustatyta, kad:

1) efektyviausia metano koncentracija, nekoreguojant uždegimo paskubos kampo, yra iki 30 % nuo bendro degalų kiekio. Viršijus šį kiekį variklio naudingojo veikimo koeficientas  $\eta_e$  mažėja;

2) tiekiant 6 l/min biometano gauta mažiausia CH koncentracija deginiuose. Didinant biometano kiekį, CH koncentracija didėja, o tiekiant 14 l/min ji viršija net variklio veikiančio grynu benzinu CH koncentraciją;

3) NO<sub>x</sub> koncentracija deginiuose tiesiogiai priklauso nuo biometano koncentracijos degaluose: kuo didesnis biometano kiekis, tuo mažesnė NO<sub>x</sub> koncentracija deginiuose;

4) CO koncentracija variklio deginiuose didėja, didinant biometano kiekį bendrame degalų mišinyje. Ypačingai CO koncentracijos padidėjimas juntamas mažose apkrovose. Tai įtakoja biometano sudėtyje esančios CO<sub>2</sub> dujos, mažinančios degiojo mišinio degimo temperatūrą ir dėl mažesnio metano degimo greičio užsitęsiančio degimo, bloginančio anglies oksidaciją;

5) dėl didėjančio CO<sub>2</sub> kiekio cilindre, žemesnės metano degimo temperatūros ir mažesnio greičio darbinio mišinio degimas lėtėja, užsitęsia ir cilindre mažėja maksimali dujų temperatūra, tačiau išmetami aukštesnės temperatūros deginiai;

6) siekiant padidinti variklio veikimo efektyvumą, priklausomai nuo degalų sudėties reikia reguliuoti uždegimo paskubos kampą.

## Padėka

Šis darbas atliktas vykdant Europos socialinio fondo projektą „Transporto statinių, transporto priemonių ir jų srautų inovatyvių tyrimo metodų ir sprendimų kūrimas bei taikymas“, projekto kodas VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-020.

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.

Eksperimentiniams tyrimams atlikti naudota UAB „Autodujos“ dujų įpurškimo sistema *OSCAR-N*.

## Literatūra

Stiesch, G. 2010. *Modeling Engine spray and combustion processes*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 282 p. ISBN 978-3-642-05629-1.

Вибе, И. И. 1962. *Новое о рабочем цикле двигателя*. Свердловск: Машгиз.

Moreno, F.; Arroyo, J.; Munoz, M.; Monne, C. 2012. Combustion analysis of a spark ignition engine fueled with gaseous blends containing hydrogen. *International journal of hydrogen energy* 37: 13564–13573.

Soberanis, E. M. A.; Fernandez, A. M. 2010. A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. *International journal of hydrogen energy* 35: 12134 – 12140.

Bradley, D.; Gaskell, P.H. & Gu, X.J. (1996). Burning Velocities, Markstein Lengths, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flames: A Computational Study, *Combustion and Flame*, Vol. 104: 176-198.

Geok, H., Mohamad, T., Abdullah, S., Ali, Y., Shamsudeen, A., Adril, E. 2009. Experimental investigation of performance and emission of a sequential port injection natural gas engine. *European Journal of Scientific Research* Vol.30 No.2: 204-214.

Matijošius, J.; Sokolovskij, E. 2009. Research into the quality of fuels and their biocomponents. *Transport*, Vol. 24, No. 3: 212-217.

Mohamad, T. I.; M. Jermy and M. Harrison. 2003. Direct Injection of Compressed Natural Gas in Spark Ignition Engine, *Proceedings of the International Conference of Advanced and Strategies Technologies (ICAST 2003)*, Kuala Lumpur, Malaysia: 1-7.

Morita, K. 2003. Automotive power source in 21st century. *JSAE Review*, Vol. 24: 3-7.

Shiga, S. S.; Ozone, H. T. C.; Machacon, T.; Karasawa, H.; Nakamura, T.; Ueda, N.; Jingu, Z.; Huang, M. 2002. A Study of the Combustion and Emission Characteristics of Compressed-Natural-Gas Direct-Injection Stratified Combustion Using a Rapid-Compression-Machine, *Combustion and Flame* 129: 1-10.

Stan, C. 2002. Direct Injection Systems: The Next Decade in Engine Technology, *SAE International*, Warrendale, PA. ISBN 0-7680-1070-5. SAE Order No. R-347. p. 121.