



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

## TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

## SKAITINĖ „AUDI COUPE“ 2,3 L KIBIRKŠTINIO UŽDEGIMO VARIKLIO, VEIKIANČIO VANDENILIO IR BENZINO MIŠINIAIS, ANALIZĖ

Donatas Kriauciūnas<sup>1</sup>, Saugirdas Pukalskas<sup>2</sup>, Mindaugas Melaika<sup>3</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

*El. paštas: <sup>1</sup>d.kriauciunas3626@gmail.com; <sup>2</sup>saugirdas.pukalskas@vgtu.lt; <sup>3</sup>mindaugas.melaika@vgtu.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje analizuojami automobilio AUDI COUPE 2,3 L kibirkštinio variklio parametrai jam veikiant įvairiais benzino ir vandenilio mišiniais. Aprašomi eksperimentinių bandymų ir skaitinio modeliavimo metu, naudojant programą AVL BOOST, gauti rezultatai. Pagrindinis tikslas – ištirti kaip kinta variklio charakteristikos ir išmetamųjų dujų sudėtis varikliui veikiant skirtingais benzino ir vandenilio mišiniais ir optimizuoti variklio veikimą minimaliomis degalų sąnaudomis. Šie duomenys gali būti pritaikyti siekiant naudoti vandenilį kaip benzino priedą kibirkštinio uždegimo varikliuose. Gauti rezultatai parodo degalų sąnaudų, variklio galios, sukimo momento ir išmetamųjų dujų sudėties pokyčius naudojant vandenilio ir benzino mišinius. Atlikus analizę suformuluotos išvados ir pasiūlymai.

**Reikšminiai žodžiai:** vandenilis, kibirkštinio uždegimo variklis, išmetamosios dujos, skaitinis modeliavimas, AVL BOOST, degalų sąnaudos.

### Įvadas

Automobiliuose naudojami degalai, dažniausiai – benzinas arba dyzelinas yra išgaunami iš naftos. Nafta yra priskiriama prie neatsinaujančių energijos šaltinių ir galų gale pasibaigs. Taip pat dėl naftos sudėties deginant jos produktus į atmosferą išskiriami žmonių ir gyvūnų sveikatai pavojingi junginiai. Dėl šių priežasčių kuriamos alternatyviais degalais arba elektra varomos transporto priemonės. Tačiau kol kas jos nėra populiaros ir nevisos gali prilygti automobiliams su vidaus degimo varikliais. Dėl to mokslininkai atlieka tyrimus, stengdamiesi automobilių transporte sumažinti degalų pagamintų iš naftos suvartojimą ir išmetamųjų dujų toksiskumą. Dažniausiai bandoma dalį benzino arba dyzelino pakeisti alternatyviais degalais.

Tyrimai su vandeniliu yra bene labiausiai pastaruju metu įvairių šalių remiami. Degant grynam vandeniliui nesusidaro pavojingų junginių, be to jis yra labiausiai paplitęs elementas žemėje.

Tačiau vandenilį reikia kažkaip patalpinti automobilyje ir tiekti vidaus degimo varikliui. Moksliniuose straipsniuose aprašomi du pagrindiniai vandenilio tiekimo būdai: tiekimas iš rezervuaro arba iš Brauno dujų generatoriaus. Abu būdai turi savo privalumų ir trūkumų. Tiekiant pirmuoju būdu neprarandama energijos vandenilio gamybai, paprasta pripildyti rezervuarą ir reguliuoti

vandenilio kiekį, o trūkumai, kad rezervuarai užima daug vietos, sunkūs ir mažos talpos (Negurescu *et al.* 2012). Antruoju būdu Brauno dujas gamina elektrolizės būdu Brauno dujų generatoriuje išvengiama sunkių rezervuarų ir kitų saugojimo aukštame slėgyje problemų. Brauno dujų generatoriaus talpa užpildoma elektrolitu, sudarytu iš 97 % distiliuoto vandens ir 3 % kalio hidroksido tirpalo. Iš 1 kg vandens pagaminama apie 1860 litrų Brauno dujų, kur H<sub>2</sub> ir O<sub>2</sub> dujų tūrių santykis yra 2:1. (Rimkus *et al.* 2012, Pukalskas *et al.* 2012).

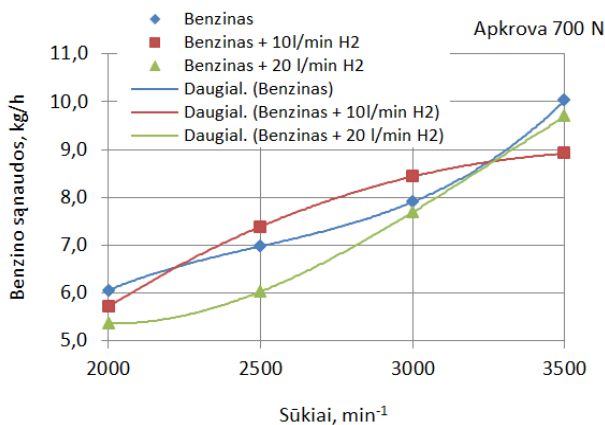
Pagamintas Brauno dujas arba vandenilį iš rezervuaro reikia tiekti vidaus degimo varikliui. Tam galima pasirinkti tiesioginį vandenilio įpurškimą į cilindrus arba įsiurbimo kolektorių. Tačiau dažnai eksperimentuose naudojamas paprastesnis ir mažiau modifikacijų reikalaujantis metodas, kai vandenilis tiekiamas į įsiurbimo kolektorių ir į cilindrus patenka kartu su įsiurbiamu oru. (Musmar *et al.* 2011, Rimkus *et al.* 2012, Yousufuddin *et al.* 2012).

Vandenilio oktaninis skaičius 32–40 vienetų didesnis už benzino, tai reiškia, kad naudojant benziną kartu su vandeniliu būtų galima padidinti mišinio oktaninį skaičių. Taip pat vandenilio laminarinis degimo greitis didesnis už benzino apie 4,5 karto todėl dėl aktyvesnio, greitesnio degimo staigiau padidėja slėgis cilindre ir generuojama didesnė variklio galia. (Negurescu *et al.* 2012, Melaika *et al.* 2012).

Dėl išskirtinių vandenilio savybių kinta išmetamųjų dujų sudėtis, kadangi papildomai tiekiant vandenilį vyksta intensyvesnis degimas, padidėja slėgis ir temperatūra cilindre ir padidėja azoto oksidų ( $\text{NO}_x$ ) kiekis išmetamosiose dujose. (Nawazish Mehdi *et al.* 2008). Tačiau  $\text{NO}_x$  kiekio sumažėjimas pastebimas kai variklis veikia liesais mišiniais. (Negurescu *et al.* 2012).

Dalį degalų tenkančių į cilindrus pakeitus vandeniliu sumažėja anglies atomų kiekis degaluose, jie geriau susimaišo su oru ir degūs mišinys geriau sudega, dėl to susidaro mažiau CO ir angliavandenilių (CH). (Nawazish Mehdi *et al.* 2008, Yousufuddin *et al.* 2012).

Mokslinėje literatūroje nėra aiškiai suformuluota kaip kinta variklio galia, sukimo momentas ir išmetamosios dujos varikliui veikiant skirtingais benzino ir vandenilio mišiniais kintant variklio sūkiams nuo minimalių iki nominalių. Taip pat nėra nustatytas optimalus benzino ir vandenilio mišinys, kurį naudojant būtų galima išgauti mažiausias energetines sąnaudas.



1 pav. Benzino sąnaudų priklausomybė nuo sūkių, esant 700 N apkrovai

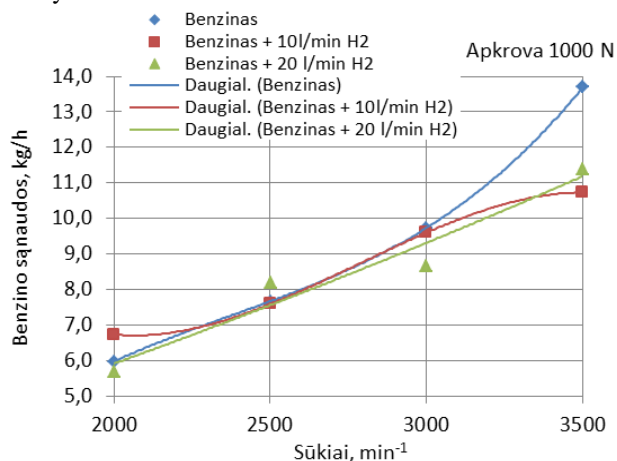
Todėl, šio darbo tikslas yra atlikus eksperimentinius ir skaitinius tyrimus su įvairiais vandenilio ir benzino mišiniais nustatyti optimalų benzino ir vandenilio mišinį leisiantį pasiekti mažiausias energetines sąnaudas.

## Eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentinių tyrimų tikslas ištirti kaip kinta kibirkštinio variklio išmetamosios dujos jam dirbant benzinu ir papildomai tiekiant vandenilį 10 l/min ir 20 l/min debitu. Prieš pradėdam tyrimus atlikau maksimalios galios matavimą varikliui naudojant benzina, taip bent dalinai įvertinant variklio ir transmisijos būklę.

Bandymas atliktas ketvirta pavarai, kuri yra artimiausia tiesioginei pavarai, automobilis su standartiniais ratlankiais ir padangomis, kurias rekomenduoja gamintojas. Bandymas parodė, kad po dvidešimt metų automobilio eksploatacijos variklio galia 88,4 kW esant 5507 min<sup>-1</sup> sūkiams, sukimo momentas 174 Nm esant 3177 min<sup>-1</sup> sūkiams. Taip pat vandeniliui tiekti su įsiurbiamu oru bus naudojamas suskystintų dujų maišytuvas kuris montuojamas prieš droselinę sklendę. Maišytuvas ribos įsiurbiamą orą todėl pasikeis ir variklio greitinė charakteristika,

todėl sumontavus maišytuvą dar kartą išmatuota variklio galia ir sukimo momentas. Antras bandymas atliktas tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir pirmasis. Bandymas parodė, kad variklio galia su maišytuvu yra 72,3 kW (esant 5145 min<sup>-1</sup>), sukimo momentas 158 Nm (esant 2676 min<sup>-1</sup>). Matoma, kad įdėjus maišytuvą variklio galia sumažėjo 16,1 kW, o sukimo momentas – 16 Nm. Galia ir sukimo momentas didėja tolygiau, lyginant su pirmuoju bandymu.



2 pav. Benzino sąnaudų priklausomybė nuo sūkių, esant 1000 N apkrovai

Toliau atliekami bandymai ir matuojama išmetamųjų dujų sudėtis ir degalų sąnaudos. Matavimai atliekami ketvirta pavarai esant pastovioms 700N ir 1000N apkrovoms, keičiant variklio sūkius 2000, 2500, 3000 ir 3500 min<sup>-1</sup>. Pirmasis bandymas atliekamas varikliui dirbant benzinu, antras bandymas atliekamas papildomai per maišytuvą tiekiant vandenilį 10 l/min debitu, trečiojo bandymo metu vandenilis tiekiamas 20 l/min debitu. Vandenilio kiekis fiksuojamas dujų skaitikliu KG-0095-G06-94-10, kurio matavimo tikslumas 0,001 m<sup>3</sup>. Sunaudotas benzino kiekis fiksuojamas elektroninėmis svors-tyklėmis SK-5000, kurių matavimo tikslumas  $\pm 4$  g. Apkrovą generuoja automobilių traukos stendas MAHA LPS 3000, kurio matavimo tikslumas 2 % nuo išmatuotos reikšmės, o išmetamosios dujos fiksuojamos išmetamųjų dujų analizatoriumi AVL DICOM 4000.

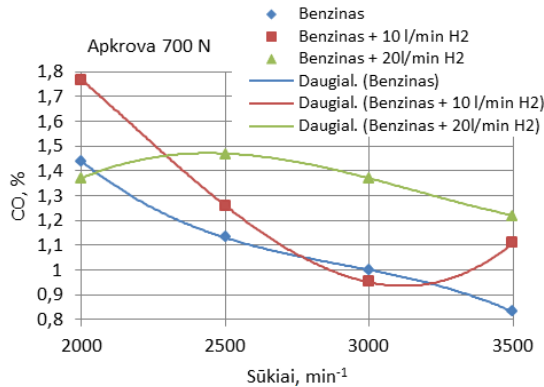
## Eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

Pirmas išmatuotas parametras – degalų sąnaudos. Bandymo metu buvo įrengtas išorinis degalų bakas su papildomu siurbliu. Degalai buvo sveriami ir fiksuojamas laikas per kurį sudeginama 100 gramų benzino. Tada perskaičiuoti duomenys, gaunama išraiška kiek kilogramų degalų sudega per valandą. Grafikai pateikti 1 paveiksle, kai apkrova 700 N ir 2 paveiksle kai apkrova 1000 N.

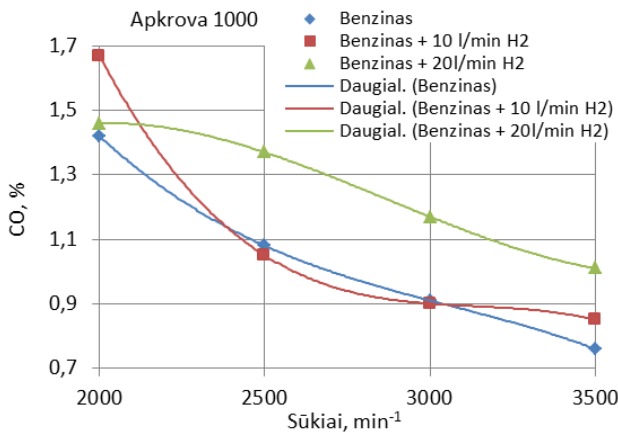
Iš šių grafikų matyti, kad didinant variklio sūkius ir apkrovą benzino sąnaudos didėja, o papildomai tiekiant vandenilį degalų sąnaudos mažėja. Didžiausias skirtumas užfiksuotas esant 3500 min<sup>-1</sup> sūkiams ir 1000 N apkrovai, šiuo atveju benzino sąnaudos sumažėja 1,7 kg/h.

Tai kaip kito CO koncentracija išmetamosiose dujose pateikta 3 ir 4 paveiksle. Matoma, kad didinant apkro-

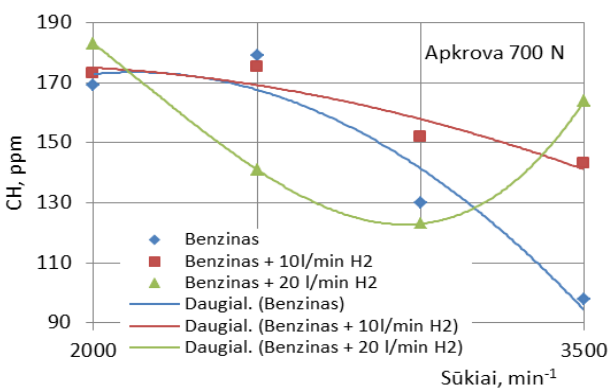
vą mažėja CO koncentracija išmetamose dujose, veikiant benzinu, vidutiniškai sumažėja 0,058 %, kai vandenilis tiekiamas 10 l/min debitu – 0,155 % ir kai vandenilis tiekiamas 20 l/min debitu – 0,105 %. Taip pat CO koncentracija mažėja didinant variklio sūkius.



3 pav. CO koncentracijos priklausomybė nuo sūkių, esant 700 N apkrovai



4 pav. CO koncentracijos priklausomybė nuo sūkių, esant 1000 Nm apkrovai

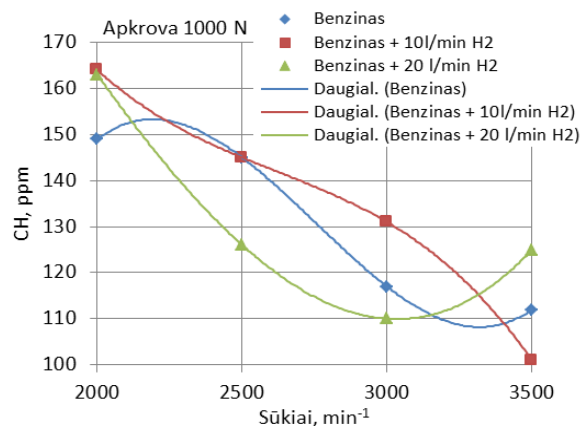


5 pav. CH koncentracijos priklausomybė nuo sūkių, esant 700 N apkrovai

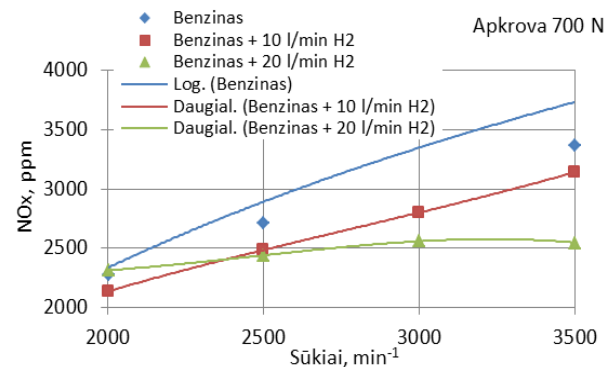
Tačiau papildomai tiekiant vandenilį CO koncentracija padidėja, tai galima paaiškinti tuo, kad maišytuvus kuris naudojamas vandenilio tiekimui į įsiurbimo kolektorių riboja patenkančią orą. Kai variklis veikia benzinu į cilindrus patenka didesnis oro kiekis nei tada kai per maišytuvą tiekiamas vandenilis, kuris pakeičia dalį oro įsiur-

biamo į cilindrus ir dėl to išmetamosiose dujose padidėjo CO koncentracija.

Taip pat aktualu palyginti tai, kaip kito angliavandenių koncentracija išmetamosiose dujose keičiant apkrovą ir vandenilio kiekį. 5 ir 6 paveikslė matoma, kad didinant apkrovą mažėja CH koncentracija išmetamose dujose, veikiant benzinu, vidutiniškai sumažėja 13,3 ppm, kai vandenilis tiekiamas 10 l/min debitu – 25,5 ppm ir kai vandenilis tiekiamas 20 l/min debitu – 21,8 ppm. Didžiausias CH kiekis fiksuojamas kai variklis veikia 2500 min<sup>-1</sup> sūkiams esant 700 N apkrovai ir vandenilis papildomai netiekiamas. Esant tam pačiam režimui, tik papildomai tiekiant vandenilį CH kiekis sumažėjo atitinkamai 4 ppm ir 38 ppm papildomai 10 l/min ir 20 l/min tiekiant vandenilį.



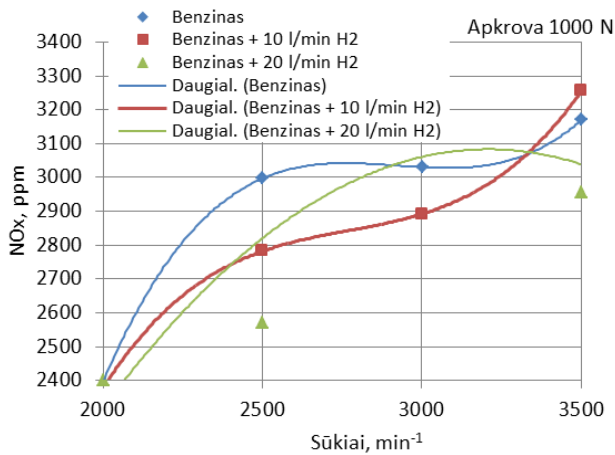
6 pav. CH koncentracijos priklausomybė nuo sūkių, esant 1000 N apkrovai



7 pav. NO<sub>x</sub> koncentracijos priklausomybė nuo sūkių, esant 700 N apkrovai

Ketvirtas užfiksuotas parametras – NO<sub>x</sub>. 7 ir 8 paveikslė matoma, kad esant tai pačiai apkrovai ir nekeičiant variklio sūkių, tačiau papildomai tiekiant vandenilį NO<sub>x</sub> koncentracija sumažėja. Didžiausias sumažėjimas fiksuojamas kai variklio sūkiams 3000 min<sup>-1</sup>, apkrova 700 Nm ir vandenilis tiekiamas 20 l/min debitu.

Esant šiems parametrams NO<sub>x</sub> koncentracija sumažėja net 1393 ppm, lyginant su NO<sub>x</sub> koncentracija kai variklis veikė benzinu. Tačiau pastebimas ir kiekio padidėjimas papildomai tiekiant vandenilį. Jis fiksuojamas taip pat kai vandenilis tiekiamas 20 l/min debitu.



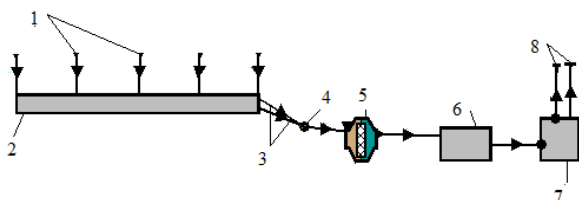
8 pav. NO<sub>x</sub> koncentracijos priklausomybė nuo sūkių, esant 1000 N apkrovai

### AVL BOOST modeliavimas

Pagrindiniai variklio duomenys reikalingi modeliui sudaryti pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Audi variklio duomenys

Stūmoklio diametras, mm	82,48
Stūmoklio eiga, mm	86,4
Suslėgimo laipsnis	1:10
Švaistiklio ilgis, mm	144,0
Išsiurbimo vožtuvo diametras, mm	40,5
Išsiurbimo vožtuvo laisvumas, mm	0,15
Išsiurbimo vožtuvo atsідarymo momentas, °	3,9 prieš VGT
Išsiurbimo vožtuvo užsidarymo momentas, °	4,2 po AGT
Išsiurbimo vožtuvo atsідarymo trukmė, °	225,1
Išmetimo vožtuvo diametras, mm	33,5
Išmetimo vožtuvo laisvumas, mm	0,25
Išmetimo vožtuvo atsідarymo momentas, °	45,9 prieš AGT
Išmetimo vožtuvo užsidarymo momentas, °	4,9 po VGT
Išmetimo vožtuvo atsідarymo trukmė, °	221
Cilindrų veikimo eiliškumas	1–2–5–3–4
Alkūninio veleno švaistiklinių kakliukų išdėstymas, °	144
Uždegimo kampas, °	13–17 prieš VGT

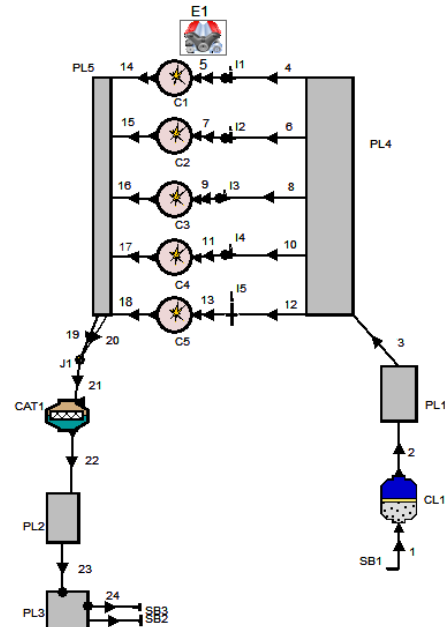


9 pav. Išmetimo sistema: 1 – išmetimo kanalai variklio galvutėje; 2 – išmetimo kolektorius; 3 – nuo kolektoriaus einantys du vamzdžiai; 4 – 3 vamzdžiai susijungia į vieną; 5 – katalitinis deginių neutralizatorius; 6 ir 7 – kiti išmetimo sistemos bakeliai; 8 – antgaliai dujų išmetimui

Šioje programoje modeliuojamas variklis kartu su išsiurbimo ir išmetimo kolektoriais. Pradėjau nuo išmetimo kolektoriaus. Kadangi jis yra išlietas iš ketaus ir kana-

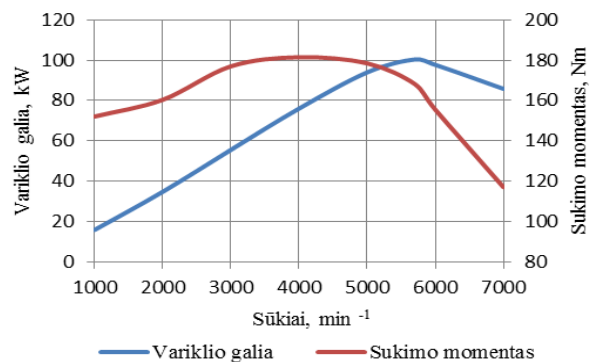
lai viduje susijungia išmetimo kolektoriui pakeisti atskiras vamzdžiai neišeis. Dėl to jį pakeičiau bendru plenumu 9 paveikslas. Likęs išmetimo sistemos vamzdynas kaip įmanoma tiksliau atkartotas programoje.

Sudaromas visas variklio su kolektoriais, išmetimo, išsiurbimo sistemomis, purkštuvais, cilindrais modelis (10 pav.).



10 pav. AVL BOOST variklio modelis

Išmatavau modelio variklio galią ir sukimo momentą. Gamintojo duomenimis variklio galia turi būti 100 kW esant 5700 min<sup>-1</sup> sūkiams, o sukimo momentas 180 Nm esant 4000 min<sup>-1</sup> sūkiams. Modelio greitinę charakteristiką pateikiau 11 paveiksle.

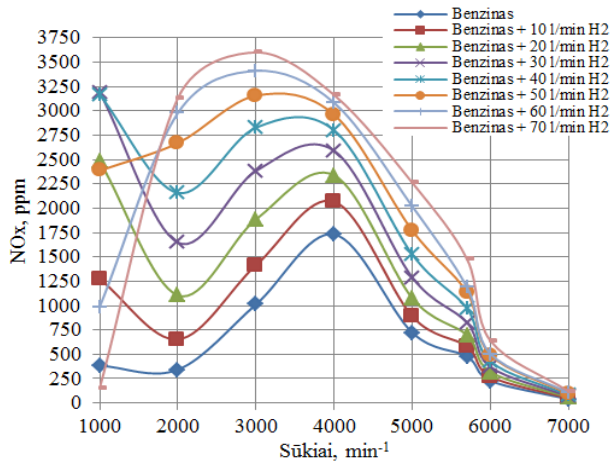


11 pav. Variklio modelio greitinė charakteristika

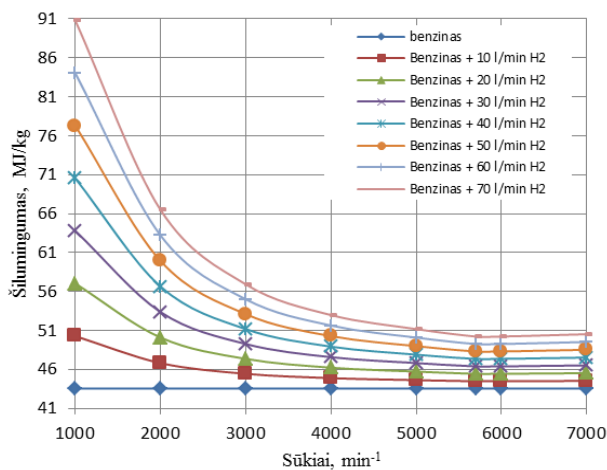
Analogiškai bandymui atliekama išmetamųjų dujų analizė. Tiriamosi NO<sub>x</sub>, CO ir CH koncentracijos išmetamosiose dujose varikliui veikiant nuo 1000 min<sup>-1</sup> iki maksimalių sūkių – 7000 min<sup>-1</sup>. Pirmas išmatuotas parametras NO<sub>x</sub> koncentracija (12 pav.)

Iš 12 paveikslu matyti, kad NO<sub>x</sub> koncentracija didinant variklio sūkius iki 4000 min<sup>-1</sup> auga, o po to pradeda mažėti, tačiau kai vandenilis tiekiamas didesniu nei 40 l/min debitu pikas persislenka į žemesnių sūkių zoną. Taip pat didinant vandenilio kiekį pastebimas NO<sub>x</sub> kon-

centracijos didėjimas kai variklio sūkliai  $1000 \text{ min}^{-1}$ . O likusioje grafiko dalyje, nuo  $4000 \text{ min}^{-1}$  iki  $7000 \text{ min}^{-1}$   $\text{NO}_x$  koncentracijos padidėjimas nedidelis, tik apie 50 ppm. Šį grafiko netolygumą galima paaiškinti benzino ir vandenilio kiekio santykiu. Tai gerai galima pamatyti per mišinio patenkančio į cilindrus šilumingumą (13 pav.).



12 pav.  $\text{NO}_x$  koncentracijos išmetamosiose dujose modeliavimo rezultatai



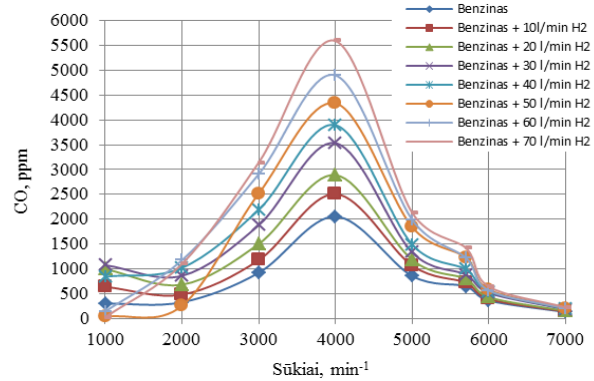
13 pav. Mišinio šilumingumas

Matoma, kad mišinio šilumingumas esant žemiems variklio sūkliais, kai iki 60 % benzino masės pakeičiama vandeniliu, didėja maždaug po 5–7 MJ/kg. Vandenilį tiekiant 50 l/min debitu varikliui dirbant  $1000 \text{ min}^{-1}$  sūkliais degalų masės dalys pasiskirsto 50 % vandenilio ir 50 % benzino. Dėl padidėjusio šilumingumo ir pakilo  $\text{NO}_x$  koncentracija esant žemiems sūkliais. O kai vandenilio tiekama daugiau nei 50 % varikliui dirbant  $1000 \text{ min}^{-1}$   $\text{NO}_x$  koncentracija drastiškai krenta, net iki 1000 ppm.

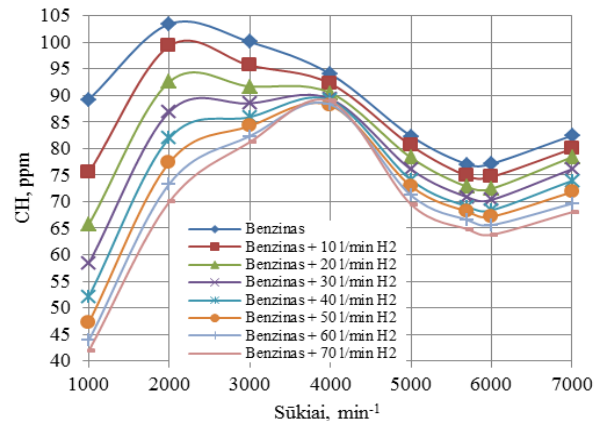
Anglies dioksido koncentracija išmetamosiose dujose (14 pav.) iki  $4000 \text{ min}^{-1}$  sūklių, kai pasiekiamas maksimalus sukimo momentas didėja, o po to krenta. Taip pat didinant vandenilio kiekį CO koncentracija didėja iki tol kol vandenilio ir benzino santykis yra 50–50 varikliui veikiant  $1000 \text{ min}^{-1}$  sūkliais.

Papildomai tiekiant vandenilį visame variklio veikimo diapazone matomas CH koncentracijos sumažėjimas (15 pav.). Daugiausiai CH koncentracija sumažėja kai

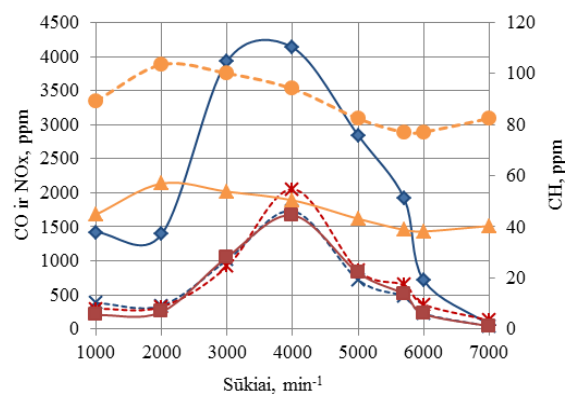
variklio sūkliai kinta nuo  $1000 \text{ min}^{-1}$  iki  $4000 \text{ min}^{-1}$ . Esant šiems variklio sūkliais CH vidutiniškai sumažėja 7 ppm vandenilį tiekiant iki 40 l/min debitu, toliau didinant vandenilio kiekį CH sumažėja tik apie 4 ppm. Nuo  $4000 \text{ min}^{-1}$  iki  $7000 \text{ min}^{-1}$  sūklių papildomai tiekiant vandenilį CH koncentracija vidutiniškai sumažėja 2,5 ppm.



14 pav. CO koncentracijos išmetamosiose dujose modeliavimo rezultatai



15 pav. CH koncentracijos išmetamosiose dujose modeliavimo rezultatai



16 pav. CH, CO ir  $\text{NO}_x$  koncentracijų išmetamosiose dujose kai (vandenilio ir benzino masių santykis 50%–50%) modeliavimo rezultatai

Kaip parodė eksperimentiniai bandymai,  $\text{NO}_x$  koncentracija mažėja papildomai tiekiant vandenilį, tačiau modeliavimo metu gauti rezultatai rodo, kad  $\text{NO}_x$  kon-

centracija didėja ir geriausias rezultatas gali būti pasiektas tik kai vandenilio ir benzino santykis artimas 50 %–50 %. 16 paveiksle pateiktas išmetamųjų dujų kitimas kai vandenilio ir benzino santykis 50 %–50 %.

Šiuo atveju benzino sąnaudos sumažinamos per pusę, tačiau sumažėja variklio galia ir sukimo momentas. Dabar esant  $5700 \text{ min}^{-1}$  sūkių variklio galia 92,7 kW, o sukimo momentas 164 Nm esant  $4000 \text{ min}^{-1}$  sūkiams. Anglies monoksido kiekis vidutiniškai sumažinamas 411 ppm, CH – 45 ppm. Tai yra apie 50 %. Tačiau azoto oksidų kiekis vistiek padidėja apie 28 %.

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.

### Išvados

Atlikus eksperimentinius tyrimus ir kompiuterinį modeliavimą matoma, kad vieni duomenys neprieštarauja kitiems ir galime formuluoti šias išvadas:

– Didinant vandenilio kiekį degalų sąnaudos sumažėja. Vandenilį tiekiant 10 l/min debitu vidutiniškai 2,5 %, o 20 l/min debitu – 9 %. Tai patvirtina ir modeliavimo rezultatai tiekiant vandenilį 10 l/min debitu degalų sąnaudos vidutiniškai sumažėja 3 %, o 20 l/min debitu –

10 %. Modeliavimo duomenimis benzino sąnaudas galima sumažinti iki 50 %.

– Įsiurbiant vandenilį kartu su oru vandenilis pakeičia dalį oro ir padidėja CO koncentracija išmetamosiose dujose. Vandenilį tiekiant 10 l/min debitu CO koncentracija vidutiniškai sumažėja – 12 %, o 20 l/min debitu – 22 %. Tai patvirtina ir modeliavimo rezultatai: tiekiant vandenilį 10 l/min debitu CO koncentracija vidutiniškai sumažėja – 25 %, o 20 l/min debitu – 48 %.

– Mažėjant benzino kiekiui, mažėja ir CH koncentracija išmetamosiose dujose. Vandenilį tiekiant 10 l/min debitu CH koncentracija vidutiniškai sumažėja – 10,6 %, o 20 l/min debitu – 4,5 %. Tai patvirtina ir modeliavimo rezultatai: tiekiant vandenilį 10 l/min debitu CH koncentracija vidutiniškai sumažėja – 5,2 %, o 20 l/min debitu – 9,5 %.

– Vandenilio priedas  $\text{NO}_x$  koncentraciją padidina. Vandenilį tiekiant 10 l/min debitu  $\text{NO}_x$  koncentracija vidutiniškai padidėjo 11,5 %, o 20 l/min debitu – 18,3 %. Tai patvirtina ir modeliavimo rezultatai: tiekiant vandenilį 10 l/min debitu  $\text{NO}_x$  koncentracija vidutiniškai padidėjo 32,2 %, o 20 l/min debitu – 61,7 %.

– Taigi, norint dalį benzino pakeisti vandeniliu tai reikėtų daryti santykiu 50 %–50 %, tada benzino sąnaudos sumažėja 50 %, CH – 49 %, CO koncentracija analogiška kai variklis veikė benzinu, o  $\text{NO}_x$  padidėja 76 %.

### Literatūra

- Negurescu, N.; Pana, C.; Cernat, A. 2012. Aspects of using hydrogen in SI engine, iš *U.P.B. Sci Bull. Series D* 74(1): 11–20. Bucharest.
- Rimkus, A.; Ulickas, T.; Matijošius, J.; Pukalskas, S.; Stravinskas, P. 2012. Brauno dujų panaudojimas aliejuje veikiančiame dyzeliniame variklyje, iš *Mokslas – Lietuvos ateitis straipsniu rinkinys*, Vilnius, p. 376–380.
- Pukalskas, S.; Rimkus, A.; Matijošius, J.; Biedrzycki, J. 2012. Dyzelino variklio ekologinių ir energetinių rodiklių tyrimas naudojant dyzelino, biobutanolio ir brauno dujų mišinį, iš *Aleksandro Stulginskio Universiteto mokslo darbai* 44 (1–3): 72–83. Vilnius.
- Musmar, S. A.; Al-Rousan, A. 2011. Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines, iš *IJ Fuel* 90 (2011): 3066–3070.
- Yousufuddin, S.; Venkateswarlu, K.; Sastry, G. R. K. 2012. Effect of compression ratio and equivalence ratio on the emission characteristics of a hydrogen-ethanol fuelled spark ignition engine, iš *Internal journal of advanced science and technology* 40: 91–100. March, 2012.
- Melaika, M.; Rimkus, A. 2012. Variklio darbo modeliavimas naudojant skirtingus suslėgtų gamtinių dujų ir vandenilio degalų mišinį, iš *Mokslas – Lietuvos ateitis straipsniu rinkinys*, Vilnius, p. 306–311.
- Nawazish Mehdi, S.; Yousufuddin, S. 2008. Exhaust emission analysis of an internal combustion engine fuelled with hydrogen-ethanol dual fuel, iš *IJE Transactions B* 21(2): 203–210. August 2008.