



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Vitalij Kabelis

**GAMTINIŲ DUJŲ IR BIODEGALŲ NAUDOJIMO SLĖGINIO UŽDEGIMO
VARIKLIUOSE EFEKTYVUMO TYRIMAS**

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

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Saugirdas Pukalskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

Vitalij Kabelis

**GAMTINIŲ DUJŲ IR BIODEGALŲ NAUDOJIMO SLĖGINIO UŽDEGIMO
VARIKLIUOSE EFEKTYVUMO TYRIMAS**

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

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. doc. Alfredas Rimkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lektorė Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Saugirdas Pukalskas

(Vardas, pavardė)

2019-05-20

(Data)

Vitalij Kabelis

GAMTINIŲ DUJŲ IR BIODEGALŲ NAUDOJIMO SLĖGINIO UŽDEGIMO
VARIKLIUOSE EFEKTYVUMO TYRIMAS

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

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. doc. Alfredas Rimkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

2019-05-17

Lietuvių kalbos konsultantė

lektorė Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

2019-05-14

Vilnius, 2019

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Saugirdas Pukalskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2017-11-..... Nr.

Vilnius

Studentui

Vitalijui Kabeliui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Gamtinių dujų ir biodegalų naudojimo slėginio uždegimo varikliuose efektyvumo tyrimas

patvirtinta 2017 m. spalio mėn. 26 d. dekanų potvarkiu Nr. 487ti.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės mėn. 17 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Panaudojant mokslinę literatūrą atlikti gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino naudojimo slėginio uždegimo variklyje efektyvumo apžvalgą. Formuluoti tyrimo problemą, tikslą, sprendimo būdus.
2. Atlikti degalų fizinių bei cheminių savybių analizę.
3. Parengti eksperimentinių tyrimų metodiką ir atlikti variklio, veikiančio įvairiais gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino mišiniais, energetinių ir ekologinių rodiklių standinius tyrimus.
4. Atlikti slėginio uždegimo variklio, veikiančio įvairiais gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino mišiniais, termodinaminių rodiklių skaitinį modeliavimą (eksperimentinių tyrimų analizę), Apibendrinti atliktus eksperimentinius ir teorinius tyrimus ir pateikti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Vadovas

.....

(Parašas)

dr. doc. Alfredas Rimkus

(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....

(Parašas)

Vitalij Kabelis

(Vardas, pavardė)

.....

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Saugirdas Pukalskas

(Vardas, pavardė)

2019-05-13

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2017-11-30 Nr. 09

Vilnius

Studentui

Vitalijui Kabeliui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Gamtinių dujų ir biodegalų naudojimo slėginio uždegimo varikliuose efektyvumo tyrimas

patvirtinta 2017 m. spalio mėn. 26 d. dekanų potvarkiu Nr. 487ti.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės mėn. 17 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Panaudojant mokslinę literatūrą atlikti gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino naudojimo slėginio uždegimo variklyje efektyvumo apžvalgą. Formuliuoti tyrimo problemą, tikslą, sprendimo būdus.
2. Atlikti degalų fizinių bei cheminių savybių analizę.
3. Parengti eksperimentinių tyrimų metodiką ir atlikti variklio, veikiančio įvairiais gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino mišiniais, energetinių ir ekologinių rodiklių standinius tyrimus bei pateikti rezultatų analizę.
4. Atlikti slėginio uždegimo variklio, veikiančio įvairiais gamtinių dujų ir dyzelino/biodyzelino mišiniais, termodinaminių rodiklių skaitinį modeliavimą (eksperimentinių tyrimų analizę).
5. Apibendrinti atliktus eksperimentinius ir teorinius tyrimus ir pateikti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

(Parašas)

dr. doc. Alfredas Rimkus

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

Vitalij Kabelis

(Vardas, pavardė)

2012-12-06

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Automobilių inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data*.....*.....

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Gamtinių dujų ir biodegalų naudojimo slėginio uždegimo varikliuose efektyvumo tyrimas**

Autorius **Vitalij Kabelis**

Vadovas **Alfredas Rimkus**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas slėginio uždegimo variklio energetinių ir ekologinių rodiklių pokytis, dyzeliną pakeitus biodyzelinu ir gamtinėmis dujomis. Išanalizuota skirtingų biodyzelino rūšių ir gamtinių dujų naudojimo įtaka degimo procesui slėginio uždegimo varikliuose. Atliktas eksperimentinis stendinis tyrimas slėginio uždegimo varikliui veikiant skirtingais gamtinių dujų ir dyzelino bei biodyzelino mišiniais ir keičiant skystų degalų įpurškimo pradžios momentą, siekiant nustatyti optimalią gamtinių dujų ir biodyzelino mišinio sudėtį, turinčią įtakos variklio energetiniams ir ekologiniams rodikliams. Remiantis AVL BOOST programa atliktu variklio termodinaminių procesų skaitiniu modeliavimu nustatyti degimo proceso pokyčiai ir įvertintos priežastys. Pateikiamos apibendrintos eksperimentinių ir teorinių tyrimų išvados ir siūlymai.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros šaltinių apžvalga, tyrimų metodika, tyrimų rezultatai ir jų vertinimas, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 45 p. teksto be priedų, 28 iliustracijos, 10 lentelių, 36 bibliografinių šaltinių.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: slėginio uždegimo variklis, biodyzelinas, gamtinės dujos, energetinis efektyvumas, ekologiniai rodikliai, NExBTL, Dual fuel.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Automobile Engineering

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Transport Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **The research of the usage efficiency of natural gas and biofuels in the compressed ignition engines**

Author **Vitalij Kabelis**

Academic supervisor **Alfredas Rimkus**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The master thesis examines the change in the energy and ecological performance of the compression ignition engine by replacing diesel with biodiesel and natural gas. Influence of different types of biodiesel and natural gas on combustion process in compression ignition engines. Experimental bench testing of compression ignition engine with different blends of natural gas and diesel and biodiesel and changing the start point of liquid fuel injection to determine the optimum composition of the natural gas and biodiesel mixture, affecting the energy and ecological characteristics of the engine. Based on the AVL BOOST program, mathematical modeling of engine thermodynamic processes has been used to determine the changes in the combustion process and to evaluate the causes. The conclusions and suggestions of experimental and theoretical studies are summarized.

Structure: introduction, sources review, research methodology, research results and their evaluation, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 45 p. text without appendixes, 28 pictures, 10 tables, 36 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: Compression ignition engine, biodiesel, compressed natural gas, energetic indicators, environmental indicators, NExBTL, Dual fuel.

TURINYS

UŽDUOTIS	4
TURINYS	8
Paveikslų sąrašas	9
Lentelių sąrašas.....	11
SANTRUMPOS	12
ĮVADAS.....	13
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA.....	15
1.1. Priežastys bei problemos, skatinančios biodegalų panaudojimą ir gamybą.....	15
1.2. Biodegalai	15
1.2.1. Pirmos kartos biodyzelinas (RRME)	16
1.2.2. Bioetanolis	18
1.3. Antros kartos biodegalai	18
1.3.1. Antros kartos biodyzelinas (<i>NExBTL</i>)	19
1.4. Kokybės reikalavimai slėginio uždegimo variklių degalams.....	21
1.5. Suskystintos gamtinės dujos	23
1.6. Dujų maitinimo sistemos slėginio uždegimo varikliams	25
1.7. Degimo proceso charakteristika.....	26
1.8. Degalų tiekimo parametrų įtaka degimo procesui	28
1.7. Deginių recirkuliacija	30
2. TYRIMŲ METODIKA	31
2.1. Eksperimentinė įranga	31
2.2. Tyrimo režimai ir tiriami degalai	34
2.3. Variklio rodiklių skaičiavimo metodika	34
2.4. Skaitinio modeliavimo AVL BOOST programa metodika	35
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS	37
3.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė	37
3.2. Degimo proceso skaitinio modeliavimo rezultatai ir jų analizė	40
IŠVADOS	44
LITERATŪROS SĄRAŠAS	45
PRIEDAI	48

Paveikslų sąrašas

Nr.	Paveikslo pavadinimas	psl.
1	RRME pagrindiniai rodikliai	
2	NE _x BTL pagrindiniai rodikliai	20
3	Dual fuel sistema	24
4	Aukšto slėgio Dual fuel tiesioginio įpurškimo schema	25
5	Dual fuel karšto paviršiaus inicijuoto slėginio uždegimo schema	25
6	Slėgis cilindre ir šilumos išsiskyrimas esant skirtingai GD koncentracijai 2000 min ⁻¹ , 80 % apkrova	25
7	Slėgis cilindre ir šilumos išsiskyrimas esant skirtingai GD koncentracijai 1500 min ⁻¹ , 80 % apkrova	26
8	Šilumos išsiskyrimo rodiklio dx/dφ greičio maksimumo pasiskirstymas (a) šilumos išsiskyrimo metu priklausomai nuo m parametro reikšmės ir pilnutinio degalų degimo charakteristika (b)	27
9	Slėgio cilindre ir degimo proceso šilumos išsiskyrimas (a), NO _x ir HC kiekiai (b) esant pastoviems 1400 min ⁻¹ sukiamis ir apkrovai 1000 Nm bei keičiant pirminio įpurškimo momentą	27
10	Slėgio cilindre ir degimo proceso šilumos išsiskyrimas (a), NO _x ir HC kiekiai (b) esant pastoviems 1400 min ⁻¹ sukiamis ir apkrovai 1000 Nm bei keičiant pirminio įpurškimo kiekį	28
11	Slėgio cilindre ir degimo proceso šilumos išsiskyrimas (a), NO _x ir HC kiekiai (b) esant pastoviems 1400 min ⁻¹ sukiamis ir apkrovai 600 Nm bei keičiant dyzelino įpurškimo slėgį	28
12	EGR sistemos įtaka ekologiniams rodikliams, varikliui veikiant skirtingais degalais	29
13	Bandomojo variklio schema	30
14	Tiriamą variklio modelis AVL BOOST programoje	35
15	Tiriamą variklio dūmingumas veikiant skirtingais degalų mišiniais su veikiančiu EGR	36
16	Tiriamą variklio dūmingumas veikiant skirtingais degalų mišiniais su atjungta EGR sistema	36
17	Tiriamą variklio Dūmingumas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	37
18	Tiriamą variklio NO _x koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	37
19	Tiriamą variklio naudingumo koeficientas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	37

20	Tiriamo variklio CO ₂ koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	37
21	Tiriamo variklio CO koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	38
22	Tiriamo variklio HC koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	38
23	Tiriamo variklio keliamas triukšmas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	39
24	Tiriamo variklio išmetamųjų dujų temperatūra veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema	39
25	Šilumos išsiskyrimo intensyvumo kitimas priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema	40
26	Slėgis cilindre (a) ir slėgio pokytis (b) priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema	40
27	Temperatūra cilindre (a) temperatūros pokytis (b) priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema	41
28	Sudegusi degalų masės dalis priklausomai nuo degalų mišinio sudėties (be EGR)	41

Lentelių sąrašas

Nr.	Lentelės pavadinimas	psl.
1	Biodegalų rūšys ir gamybos būdai	15
2	Biodyzelino ir mineralinio dyzelino kokybės reikalavimai	20
3	Degalų tyrimų kokybės rezultatai	21
4	Pagrindinės gamtinių dujų fizikinės savybės	23
5	1Z Variklio pagrindiniai parametrai	31
6	Tyrimo metu matuojami parametrai ir naudojama įranga	31
7	Variklio apkrovos stendo (KI-5543) techninės charakteristikos	32
8	Pagrindinės išmetamųjų dujų analizatoriaus <i>AVL DiCom 4000</i> techninės charakteristikos	32
9	Pagrindinės dujų srauto matuoklės <i>RHEONIK RHM 015</i> techninės charakteristikos	32
10	Pagrindinės suodžių indikatorius (<i>AVL DiSmoke</i>) techninės charakteristikos	32

SANTRUMPOS

BTL – biomasė į skystį (angl. *biomass to liquid*);

SGD – suslėgtos gamtinės dujos;

GD – gamtinės dujos;

CH₄ – metanas;

CO – anglies monoksidas;

CO₂ – anglies dioksidas;

EGR – išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema (angl. *exhaust gas recirculation*);

HC – angliavandeniliai;

N₂ – azotas;

NExBTL – antros kartos biodezylinas;

NO_x – azoto oksidai;

O₂ – deguonis;

TDI – turbokompresorinio variklio tiesioginio įpurškimo sistema;

VDV – vidaus degimo variklis;

VGT – viršutinis galinis taškas;

°AV – alkūninio veleno pasisukimas laipsniais;

Dual fuel – lygiagretaus tiekimo dujų maitinimo sistema, skirta dyzeliniams varikliams;

RRME – riebiųjų rūgščių metilo esteris;

SNG – sintetinės gamtinės dujos;

bioDME – biodimetilesteris;

FT – Fischerio-Tropscho dyzelinas;

RME – rapso metilo esteris;

FAME – riebios rūgšties metilo esteris;

FAEE – riebios rūgšties etilo esteris;

bio-ETBE – tetrabutil etilo esteris.

IVADAS

Globaliniai Žemės klimato pokyčiai, kuriuos pastaruoju metu tiria daugelis pasaulio mokslininkų, susiję su intensyvia pramonine ir žemės ūkio veikla bei neleistinai didele atmosferos tarša. Atmosferos oro tarša išlieka ypač aktuali labiausiai išsivysčiusiose šalyse. Jau senokai susirūpinta dėl susidariusios ekologinės situacijos planetoje, kurios būklė artėja link kritinės, ir galimomis šios situacijos pasekmėmis. Kadangi daugiau kaip 80 % aplinkos taršos su išmetamais deginiais tenka vidaus degimo varikliams, tai biodegalų naudojimas VDV efektyviai spręstų šią problemą (Aplinkos apsaugos agentūra). Tačiau taikant biodegalus susiduriama su eile kitų problemų. Pirmos kartos biodegalai turi neigiamą poveikį variklio efektyvumui ir eksploataavimo ilgaamžiškumui, jei yra naudojamas didesnis jų kiekis. Pirmos kartos biodegalų gamybai naudojamos maisto pramonės žaliavos.

Paskutiniu metu ypač daug dėmesio skiriama dyzelinių vidaus degimo variklių keliamai taršai. Vieni automobilių gamintojai dėl to atsisako šių variklių naudojimo ateityje, kiti gamintojai ieško būdų, kaip galima būtų modernizuoti esamus variklius, kad ne pabloginant jų dinaminių charakteristikų pagerinti jų ekologinius parametrus. Vienas iš tokių modernizavimo būdų ir yra *Dual fuel* maitinimo sistemų kūrimas ir taikymas vienu metu naudojant dyzeliną, ar biodyzeliną su gamtinėmis dujomis.

Daug dėmesio skiriama šiltnamio efektą sukeliančių anglies dvideginio (CO₂) dujų emisijai mažinti. CO₂ emisijos pradėtos reglamentuoti 1992 metais, pasirašius Jungtinių Tautų Klimato konvenciją, o 1997 m. vykusioje trečiojoje konvencijos Šalių konferencijoje Kioto mieste, buvo priimtas Kioto protokolas. Protokolas įpareigoja išsivysčiusias šalis per penkerių metų laikotarpį nuo 2008 iki 2012 m. sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas 5,2 % lyginant su 1990 m. kiekiu. 2012 m. pabaigoje jo galiojimas buvo pratęstas dar aštuoneriems metams iki 2020-ųjų. Kioto protokolas įsigaliojo 2005 m. vasario 16 d., devyniasdešimtą dieną po to, kai protokolą ratifikavo Rusija, kurios CO₂ išmetimai sudaro 17,4 % viso pasaulinio kiekio. Tokiu būdu buvo įvykdyta Kioto protokolo sąlyga, pagal kurią jį ratifikuoti turi ne mažiau kaip 5 JTBKKK (Jungtinių Tautų Bendrosios klimato kaitos konvencijos) šalys, įskaitant išsivysčiusias šalis, kurių daliai tenkantis išmetamų CO₂ kiekis sudaro ne mažiau kaip 55 % viso CO₂ išmetimo šioje grupėje (Harrabin 2012, Kyoto protocol 1997). Pažymėtina, kad 2009 m. balandžio 23 d. Lietuvoje priimtas tesės aktas 2009/28/EB, dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją. Pagal šią direktyvą Lietuvoje iki 2020 m. biodegalai turi sudaryti ne mažiau kaip 10 % bendro energijos suvartojimo transporto sektoriuje.

Darbo aktualumas. Šio darbo tema šiuolaikiniame pasaulyje yra labai aktuali nes atskleidžia biodyzelino ir gamtinių dujų panaudojimo galimybę slėginio uždegimo varikliuose. Vis daugiau pastangų bei lėšų skiriama aplinkos apsaugai, norima sumažinti oro taršą, kuri šiuo metu yra bene pati didžiausia ir lemia klimato kaitą.

Tyrimo objektas. Transporto slėginio uždegimo variklių, veikiančių dyzelinu, bei II kartos biodyzelynu *NExBTL* ir gamtinėmis dujomis *Dual fuel*, energetiniai ir ekologiniai rodikliai.

Darbo tikslas. Pagrindinis darbo tikslas – išanalizavus mokslinę literatūrą bei atlikus slėginio uždegimo variklio, veikiančio įvairiais dyzelino, bei *NExBTL* ir gamtinių dujų mišiniais, eksperimentinių tyrimų ir degimo proceso skaitinio modeliavimo rezultatų analizę – nustatyti *NExBTL* ir gamtinių dujų energetinį ir ekologinį efektyvumą vidaus degimo varikliuose.

Darbo uždaviniai. Įgyvendinant šio magistro darbo tikslą, buvo suformuluoti ir nuosekliai sprendžiami šie uždaviniai:

- Išanalizuoti mokslinę nagrinėjančią literatūrą.
- Atlikti tiriamų degalų fizinių bei cheminių savybių analizę.
- Sudaryti tyrimų metodiką ir sukomplektuoti tyrimams reikalingą įrangą.
- Atlikti eksperimentinius-lyginamuosius variklio ekologinius ir energetinius tyrimus.
- Atlikti variklio veikimo procesų skaitinį modeliavimą.
- Apibendrinti eksperimentinius ir skaitinio modeliavimo tyrimus ir pateikti darbo išvadas.

Tyrimo metodika. Eksperimentinis tyrimas atliktas variklio apkrovos standu (VGTU). Naudojant dyzelinį variklį, *Audi 1,9 TDI 1Z*.

Tyrimų rezultatų patikimumas užtikrintas naudojant:

- praktikoje aprobuotas variklių tyrimų metodikas;
- eksperimentinių bei skaitinio modeliavimo rezultatų sugretintą analizę.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

1.1. Priežastys bei problemos, skatinančios biodegalų panaudojimą ir gamybą

Šiuolaikiniame pasaulyje biodegalai kol kas užima tik nedidelę dalį visos degalų rinkos. Valstybės turi įsipareigojimų plėsti biodegalų gamybą bei panaudojimą, bet to vis tik nepakanka, yra įvairių priežasčių, skatinančių biodegalų plėtrą, ne tik pasaulyje, bet ir Lietuvoje (Miliūnas 2006):

- kiekvienais metais griežtėjantys aplinkos apsaugos reikalavimai, susiję su šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos kiekio mažinimu;
- didėjanti aplinkos tarša, susijusi su mineralinių išteklių naudojimu;
- nuolat didėjanti dyzelino paklausa lyginant su benzinu;
- energetikos priklausomybė nuo importuojamų mineralinių išteklių;
- komplikauta žemės ūkio produkcijos rinka, verčianti ieškoti naujų žemės ūkio produkcijos panaudojimo sričių;
- socialinės problemos, susijusios su gyventojų užimtumu.

1.2. Biodegalai

Įgyvendinant Madrido deklaracijos, pagal kurią numatoma ne mažiau kaip 10 % mineralinių degalų pakeisti biodegalais ir Kioto susitarimo sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją 8 % nuostatas, Europoje dyzeliniams varikliams vis dažniau vartojami biodegalai – augalinių aliejų metilo esteriai ar jų mišiniai su mineraliniu dyzelinu. Intensyviai tiriamos variklių, kuriems vartojami šie degalai, charakteristikos, ekonominiai ir deginių emisijos rodikliai.

Nors biodegalų rūšių yra labai daug ir įvairių, bet visiems jiems būdingas vienas bendras bruožas – visi biodegalai yra gaminami iš gyvulinės ar augalinės kilmės atsinaujinančių energijos šaltinių. Biodegalus galima gauti tiek iš išaugintos žaliavos, tiek iš atliekų. Šiuo metu egzistuojančios pagrindinės biodegalų rūšys:

- biodyzelinas;
- bioetanolis;
- metanolis;
- biodujos;
- sintetiniai degalai.
-

Automobiliuose dažniausiai naudojamos šios biodegalų rūšys: bioetanolis, biodyzelinas ir jų mišiniai su mineraliniais degalais. 1 lentelėje yra pateiktos kelios biodegalų rūšys, žaliava, iš kurios jie gaminami, bei gamybos būdas.

1 lentelė. Biodegalų rūšys ir gamybos būdai (Gupta et al. 2010)

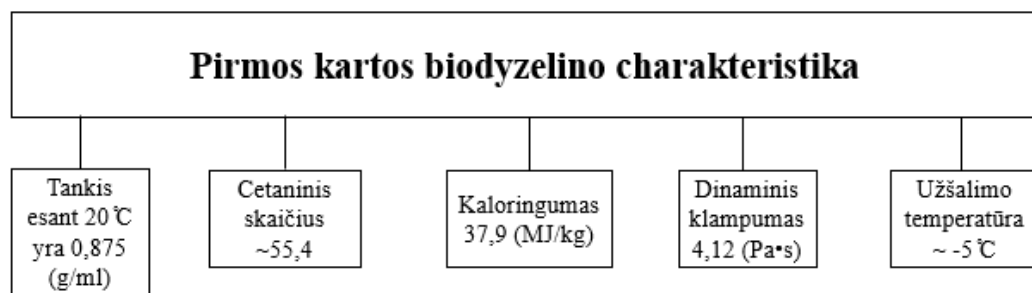
Biodegalų tipas	Pavadinimas	Biomasės žaliava	Gamybos procesas
Pirmos kartos biodegalai			
Bioetanolis	Bioetanolis	Grūdai, cukriniai runkeliai	Hidrolizė ir fermentacija
Biodyzelinas	Biodyzelinas iš energetinių javų Rapso metilo esteris (RME) Riebios rūgšties metilas/etilo esteris (FAME/FAEE)	Aliejiniai augalai (pvz., rapsas)	Šaltas spaudimas, ar išgavimas ir transesterifikacija
Biodyzelinas	Biodyzelinas iš atliekų	Atliekos/ maistinis aliejus, gyvuliniai riebalai	Transesterifikacija
Antros kartos biodegalai			
Bioetanolis	Celiuliozinis Bioetanolis	Lignoceliuliozė	Pažangesnė hidrolizė ir fermentacija
Sintetiniai Biodegalai	Biomasė į skysčius (BTL) Fischerio-Tropscho (FT) dyzelinas Sintetinis (bio) dyzelinas Bioetanolio sunkesni (mišrūs) alkoholiai Biodimetilesteris (bio DME)	Lignoceliuliozė	Dujifikacija ir sintezė
Biodyzelinas 1 ir 2 kartos	<i>NExBTL</i>	Augaliniai aliejai ir gyvuliniai taukai	Hidrinimas (perdirbimas)
Biodyzelinas	SNG (sintetinės gamtinės dujos)	Lignoceliuliozė	Dujifikacija ir sintezė

1.2.1. Pirmos kartos biodyzelinas (RRME)

Biodyzelinas – augalinio aliejaus esteris, rapsų metilo esteris, rapsų etilo esteris, gaminamas iš augalinio aliejaus ir alkoholio (metanolio arba etanolio). Priklausomai nuo gamyboje naudojamo alkoholio rūšies – metanolio arba etanolio, jis atitinkamai vadinamas metilo arba etilo esteriu. Tai taip pat viena populiariausių biodegalų rūšių, naudojamų Europoje. Didžioji Europos automobilių transporto parko dalis yra automobiliai su dyzeliniais varikliais. Tad nekeista, kad biodyzelino poreikis gana ženklus. Kai kurie automobilių gamintojai, nepaisant to, kad naudojami biodegalai, galintys sumažinti automobilio variklio efektyvumą, suteikia garantijas. Biodyzelinas naudojamas dyzeliniuose varikliuose, įmaišant 5–7 % jo į dyzeliną lengvuosiuose automobiliuose ir iki 30 % - modifikuotiems miesto autobusų varikliams. Tam tikromis sąlygomis biodyzelinas gali būti naudojamas grynas. Grynas biodyzelinas gali būti naudojamas tik tam tikslui pritaikytuose varikliuose. Daugelis automobilių gamintojų (VW, Audi, Renault, Seat ir kt.) yra pagaminę automobilius, pritaikytus biodyzelinui. (Nigam et al. 2011).

Biodyzelinas gaunamas katalizinio proceso metu, naudojant alkoholį (metilo alkoholį) ir katalizatorių. Metanolis sumaišomas su sodos hidroksidu ir sojos aliejumi. Susidaręs glicerinas nusėsta. Vykstant šiam procesui susidaro riebus esteriai, kurie vėliau išskaidomi į dvi fazes. Paskui iš pirmos fazės lengvai pašalinamas glicerinas. Likęs alkoholio/esterio mišinys atskiriamas, o alkoholio perteklius vėl tiekiamas į kitą ciklą. Toliau esteriai valomi: šalinamas vanduo, filtruojama. Šis gamtos dyzelinas turi aukštesnį cetaninį skaičių. Šilumingumas, klampumas ir fazės yra panašios kaip ir naftinės kilmės dyzelino. Biodyzelinas dažnai maišomas su 20 % naftiniu dyzelinu, kurio sudėtyje mažai sieros. (Gupta et al. 2010)

Jau buvo minėta, kad biodyzelinas gali sumažinti variklio efektyvumą, sukelti techninių problemų. Jis tirpina kai kurias gumos rūšis, todėl degalų tiekimo linijos turi būti pritaikytos biodyzelinui. Biodyzelinas drumsčiasi ir kondensuojasi aukštesnėje temperatūroje nei įprastas dyzelinas. Naudojant mišinį, kuriame daugiau kaip 7 % biodyzelino, gamintojai neturėtų suteikti garantijų transporto priemonei. Mišiniui, kuriame daugiau kaip 30 % biodyzelino, būtina keisti variklio konstrukciją, nes guminės tarpinės sukieta ir užblokuojami purkštukai. Žemiau pateiktame paveiksle matyti pirmos kartos biodyzelino charakteristika. (Gupta et al. 2010)



1 pav. RRME pagrindiniai rodikliai (Gupta et al. 2010)

Kalbant apie aplinkos apsaugą, biodyzelino nauda yra gana ryški, nes jeigu būtų naudojamas 100 % biodyzelinas, tai CO₂ emisiją sumažėtų 40–50 %. Tačiau net ir įmaišant leistiną biodyzelino kiekį, t. y. 5 %, CO₂ emisija vis tiek sumažėja 2–2,5 %. Biodyzeliną gali skaidyti ir mikroorganizmai, todėl juo užterštas dirvožemis greičiau apsivalo. (Gupta et al. 2010)

Atsižvelgiant į ekonominius aspektus, biodyzelino gamyba iš aliejinių sėklų yra apie 2 kartus brangesnė negu dyzelino gavyba iš naftos. Todėl tokio kuro gamybos skatinimui būtinas mokesčių mažinimas ir/arba kitos lengvatos.

Taigi, pirminiai biodyzelino privalumai yra dūmingumo sumažinimas, jo atsinaujinimas ir paprastas pritaikymas vidaus degimo varikliuose. (Lietuvos Respublikos biokuro įstatymas 2000).

1.2.2. Bioetanolis

Valstybės, kurios neturi naftos išteklių, gali pasigaminti biodegalų, nes jie gaminami iš atsinaujinančios žaliavos. Etanolis yra vieni iš daugelio degalų, gaminamų iš atsinaujinančios žaliavos.

Pagrindinis bioetanolio šaltinis yra dideliais cukraus bei krakmolo kiekiais pasižymintys augalai. Pirmą kartą bioetanolis buvo panaudotas dar 1860 metais JAV. 1925 metais buvo pradėtas naudoti Vokietijoje, o apie 1935 metus ir Lietuvoje. 10 % bioetanolio ir benzino mišinys buvo naudojamas antrojo pasaulinio karo metais, bet dėl sumažėjusių mineralinių degalų kainų pasibaigus karui, jis buvo išstumtas iš rinkos. Etanolis yra pagrindinė benzina gerinančių priedų sudedamoji dalis. ES šalyse beveik visas bioetanolis suvartojamas bio-ETBE gaminti. Šio produkto aplinkosauginis privalumas yra tas, kad, naudojant bio-ETBE priedą benzine sumažėja aplinkos tarša anglies dvideginiu (apie 10%) ir sieros oksidais (apie 20 %), palyginus su grynu benzinu. Apie 5 % sumažėja aplinkos tarša NO_x emisijomis, deginiuose randama apie 17 % mažiau CO, apie 16 % - lakiųjų organinių junginių ir apie 19% - kitų toksiškų junginių. 100 % bioetanolio naudojimas aplinkos taršą sumažintų 50-60 %, lyginant su tradiciniu iškastiniu kuru (Miliūnas 2006, Pukalskas 2000).

Paprastai bioetanolis 5 % santykiu maišomas su benzinu ir gali būti vartojamas įprastuose nemodifikuotuose varikliuose. Modifikuotuose varikliuose, prisiderinančiuose prie degalų, bioetanolio dalis gali sudaryti iki 85 % ar net iki 100 % viso degalų kiekio. Bioetanolio energetinė vertė sudaro 2/3 benzino vertės, todėl jo suvartojamas kiekis yra proporcingai didesnis. Bioetanolis yra alkoholis, savo sudėtyje turintis deguonies (C₂H₅OH). Bioetanolis turi aukštesnę savitąją garavimo šilumą, todėl sunkiau užvesti variklį žiemą. Bioetanolis didina oktaninį skaičių – jį naudojant gali būti aukštesnis suspaudimo laipsnis (Nigam et al. 2011).

1.3. Antros kartos biodegalai

Antros kartos biodegalai, dar vadinami biomase į skystį (angl. *biomass to liquid*), yra gaunami dviem pagrindiniais būdais: biocheminiu (biologiniu) ir termocheminiu, panaudojant agrokultūrinius produktus, kurie yra netinkami vartojimui, taip pat iš maisto atliekų, gyvulių išmatų ir t.t. Biocheminiu būdu gaminamos kelios biodegalų rūšys, tokios kaip etanolis ir butanolis, visos kitos rūšys yra gaminamos termocheminiu būdu. Daugelis antros kartos biodegalų, gaminamų termocheminiu būdu, yra gaminami ir iš iškastinių degalų. Termocheminiu būdu gaminami degalai yra tokie kaip metanolis, rafinuoti *Fisher – Tropsh* skysčiai (FTL) ir demitilo esteris (DME). Termocheminės biomasės konversija apima procesus, reikalaujančius daugiau ekstremalių temperatūrų ir didesnio slėgio, negu biocheminės konversijos proceso metu. Pagrindinis antros kartos degalų privalumas lyginant su pirmos kartos degalais yra tas, kad jie gaminami iš biomasės, kurios panaudojimo galimybės gana didelės, pvz., ji gali būti ir maistui tinkama žaliava. Dėl šios priežasties didėja naudojamos žemės plotas, bei žemdirbystės efektyvumas (Yung et al. 2009).

Antros kartos biodegalų atsiradimą lėmė kelios priežastys: pagrindinė – aplinkos apsauga, norint sumažinti išmetamųjų dujų emisijos kiekius; antroji priežastis – ekonominė, nes pirmos kartos biodegalų gamybai planuojama nutraukti subsidijas ir remti antros kartos biodegalų gamybą.

Klimatas per pastaruosius kelis dešimtmečius labai ženkliai pakito, tam įtakos turėjo susidaręs šiltnamio efektas. Šiltnamio efektą lemia padidėję išmetamųjų dujų emisijos kiekiai, tai viena opiausių ir aktualiausių šio meto problemų. 2009 m. vidutiniškai automobilių išmetamųjų dujų emisijos kiekis buvo 152 g CO₂/km. Iki 2020 metų pagal Europos Parlamento įsakymą, šis kiekis turi būti sumažintas ir naujiems automobiliams negali viršyti 95 g CO₂/km. Toks drastiškas žingsnis buvo žengtas todėl, kad siekiama sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį, bei padidinti transporto infrastruktūros pajėgumą. Tam tikslui ir buvo sukurti antros kartos biodegalai, kurie gaminami iš organinių atliekų. Nors biodegalai dažniausiai naudojami kaip alternatyva iškastiniams degalams, norint sumažinti aplinkos taršą transporto sektoriuje, tačiau yra ir dar viena priežastis – energetinis saugumas. Ne visos šalys turi iškastinio kuro klodų, todėl jį perka iš kitų valstybių, o biodegalus gali gaminti visos valstybės, nes jų gamybai reikia organinių atliekų, tokių kaip maisto ir kitokių, todėl tai gana paprasta. Taip pat išauga ir valstybės ūkio plėtra, nes žemės plotai yra naudojami auginti žaliavai iš kurios vėliau bus pagaminti biodegalai. Dar vienas plusas – antros kartos biodegalų gamyba yra ženkliai pigesnė. Pateikiamos antros karto biodegalų gamybos sąnaudos yra nuo 0,70 iki 1,12 euro už litrą. Šias išlaidas daugiausiai nulemia žaliavos, tai yra biomasės ir augalų išauginimo kaina bei mąstai. (Sunde et al. 2011).

1.3.1. Antros kartos biodyzelinas (NExBTL)

Biodyzelino *NExBTL* po ilgų bandymų buvo išrastas Suomijos naftos koncerno *Neste Oil Oyj* laboratorijos mokslininkų. Tai unikalus dyzelinas, kuris dėl savo savybių yra pripažintas garsiausių pasaulio automobilių gamintojų. Maišant *NExBTL* su mineraliniais degalais, gaunamas vadinamasis *Pro Diesel*. Prekyba *Pro Diesel* degalais Suomijoje buvo pradėta 2012 metais, o Lietuvoje – nuo 2014 metų spalio 7 dienos. Lietuva tapo pirmąja užsienio šalimi, į kurią buvo pradėtas tiekti naujos kartos dyzelinas *Pro Diesel*.

Pro Diesel gamybos procese naudojamos pažangios perdirbimo technologijos ir tik aukščiausios kokybės angliavandenilių grupės. Mažiausiai 15 %. *Neste Pro Diesel* sudaro pagal patentuotą *NExBTL* technologiją pagamintas dyzelinas iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Nepriklausomame Suomijos techninių tyrimų centre atlikti bandymai parodė, kad šio dyzelino sąnaudos yra iki 5 % mažesnės negu tradicinio dyzelino. Konkretus sąnaudų sumažėjimas priklauso nuo naudojamo automobilio tipo, aplinkos sąlygų ir vairavimo stiliaus. Tamperės taikomųjų mokslų universiteto atlikti matavimai rodo, kad, naudojant *Neste Pro Diesel*, variklio galia ir sukimo momentas padidėja iki 4 %, CO₂ emisijos degalų degimo ciklo metu sumažėja iki 20 % Mažiau išmetama ir azoto oksidų, angliavandenilių bei kietųjų dalelių. Dėl aukštesnio cetaninio skaičiaus (ne mažiau kaip 55), net šaltuoju metų laiku variklis išleis mažiau dūmų, lengviau užsives ir dirbs tyliau. Tyrimų metu nustatyta, kad, naudojant *Neste Pro Diesel*,

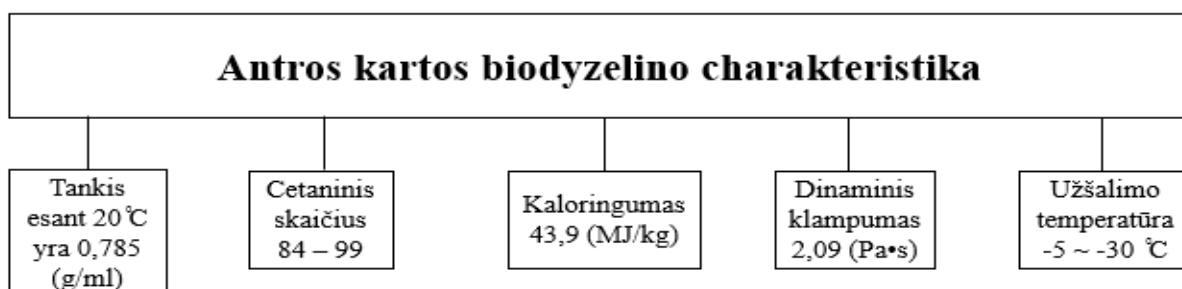
variklyje kaupiasi mažiau apnašų, o degalų purkštukai bei kietųjų dalelių filtrai ilgiau išlieka švarūs. Tai pagerina variklio eksploatacines savybes ir prailgina tarnavimo laiką. Su *Neste Pro Diesel* kietųjų dalelių filtrai tarnauja ypač ilgai, nes degimo metu praktiškai nesusidaro pelenų. Lyginant su tradiciniu dyzelinu, žieminio *Neste Pro Diesel* atsparumas šalčiui yra gerokai didesnis. Jo drumstimosi temperatūra yra -32°C. Žemiausia temperatūra, kuriai esant šį dyzeliną galima naudoti, yra -37°C. *Neste Pro Diesel* tinka visoms dyzelinu varomoms transporto priemonėms ir varikliams, nepriklausomai nuo jų amžiaus ar nusidėvėjimo. Šį dyzeliną galima maišyti ir su tradiciniu dyzelinu (Neste Oil Oyj).

Antros kartos biodyzelino, arba *NExBTL*, kuris yra sudedamasis *Pro Diesel* komponentas, fizikinė charakteristika (drumstimosi, savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra...) niekuo nesiskiria nuo mineralinių degalų fizikinės charakteristikos. Dėl šios priežasties, priešingai nei pirmos kartos biodyzelinui, jam netaikomi maišymo su dyzelinu apribojimai. CO₂ emisijos degalų ciklo metu, lyginant su tradiciniu dyzelinu, sumažėja nuo 40 % iki 90 %. *NExBTL* atsinaujinantis dyzelinas yra unikalus, nes gaminamas pagal patentuotą technologiją, kurios metu hidrinto augalinio aliejaus ir riebalų atliekos paverčiamos aukščiausios kokybės degalais (Neste Oil Oyj). Apžvelgus teorinę medžiagą, galima išskirti šiuos pagrindinius *NExBTL* privalumus:

- **Atsinaujinamumas ir patikimumas** – gaminamas iš nuolat atsinaujinančių šaltinių: augalinių aliejų, maisto atliekų, medienos ir t. t..
- **Mažiau teršia aplinką** - CO₂ emisijos degalų ciklo metu sumažėja nuo 40 % iki 90 %.
- **Didelės panaudojimo galimybės** – skirtingai nei pirmos kartos biodyzelinas, pastarasis pritaikytas įvairių automobilių gamintojų variklių konstrukcijoms.
- **Žema drumstimosi temperatūra** – gali būti naudojamas ir esant ypač žemai temperatūrai.
- **Cetatinis skaičius nuo 75 iki 95** – dėl aukštesnio cetatinio skaičiaus variklio degimo kamera išvaloma, todėl net šaltuoju metų laiku variklis išleidžia mažiau dūmų, lengviau užsiveda ir tyliau dirba.
- **Ilgesnis variklio eksploatacijos laikas** – dėl daug geresnės cheminės sudėties, nei pirmos kartos biodyzelinas, *NExBTL* prailgina variklio eksploatacijos laiką, nes neturi ėsdinančių savybių, kurios teršia variklį, todėl variklio alyvos nereikia taip dažnai keisti.
- **Neturi maišymo apribojimų** – gali būti naudojamas tiek grynas tiek sumaišytas su tradiciniu dyzelinu.
- **Patvarumas ir kokybiškumas** – net laikant ilgą laiką jo cheminės savybės nepasikeičia, nepablogėja kokybė, nesikaupia vanduo (priešingai nei pirmos kartos biodyzelinas).
- **Cheminė sudėtis – grynas angliavandenilis** – prilygsta iškastinių degalų cheminei sudėčiai, būtent todėl net ir naudojamas grynas neteršia aplinkos.

- **Bekvapis** – neturi specifinio tradicinio dyzelino kvapo, todėl nedirgina uoslės, nemalonus kvapas nesiskverbia į automobilio saloną. (Neste Oil Oyj 2018, Yung et al. 2009, Sunde et al. 2011)

Be išvardytų privalumų vaizdžiai galima pavaizduoti ir fizikines savybes, dėl kurių antros kartos biodyzelinas yra pranašesnis už pirmos kartos. (žr. 2 pav.).



2 pav. NExBTL pagrindiniai rodikliai (Gupta et al. 2010)

Išvardyti privalumai tik dar kartą įrodo, kad antros kartos biodyzelinas savo fizikinėmis, cheminėmis ir kitomis savybėmis yra gerokai pranašesnis nei pirmos kartos biodyzelinas.

1.4. Kokybės reikalavimai slėginio uždegimo variklių degalams

Pagal kilmę biodyzelinas ir mineralinis dyzelinas labai skirtingi. Tačiau biodyzelinas, pagamintas NExBTL pagrindu, chemine sudėtimi panašus į mineralinius degalus. Todėl šį biodyzeliną galima naudoti dyzeliniuose varikliuose, tai reiškia, kad šis biodyzelinas turi būti kokybiškas ir atitikti keliamus kokybės reikalavimus. Biodyzelino kokybė apibūdinama eksploatacinėmis (takumas, garingumas, užsidegamumas, korozingumas, stabilumas), fizikinėmis ir cheminėmis (tankis, spalva, rūgštingumas) ir aplinkosauginėmis (nuodingumas, aplinkotarša) savybėmis. Žemiau esančioje lentelėje (žr. 2 lentelė) pateikti mineralinio dyzelino ir biodyzelino kokybės reikalavimai.

2 lentelė. Biodyzelino ir mineralinio dyzelino kokybės reikalavimai (Degalų kokybės įstatymas Nr. 1-348/D1-1014/3-742)

Rodiklis	Mineralinis dyzelinas (LST EN 590)	Biodyzelinas (LST EN 14214)
Tankis esant 15 °C, kg/m ³	820-845	860-900
Kinematinė klampa 40 °C, mm ² /s	2,00-4,50	3,5-5,0
Ribinė filtruojamumo temperatūra, °C	-15	0, -10, -20
Pliūpsnio temperatūra, °C	≥55	≥101
Sieros kiekis, mg/kg	<10	<10
Drėgnis, mg/kg	<200	<300
Mechaninių priemaišų kiekis, mg/kg	<24	<20
Koksingasis likutis (produkto distiliavimo 10 % likučio) % (masės)	<0,3	<0,05
Pelenų kiekis, %	<0,01	<0,02
Vario plokštelės korozija (3 h esant 50 °C)	1 klasė	1 klasė

Rūgščių skaičius, mg KOH/g	-	<0,50
Bendrojo glicerolio kiekis, %	-	<0,25
Laisvojo glicerolio kiekis, %	-	<0,02
Fosforo kiekis, mg/kg	-	<4
Cetaninis indeksas	≥46	≥45
Šarminių metalų (Na, K) kiekis, mg/kg	-	<5
Oksidacijos stabilumas, g/m ³	≤25	≥8

Biodyzelino savybės vertinamos keletu rodiklių, kurių vertę nustato standartai. 2003 m. buvo patvirtintas Europos standartas EN 14214, kurį ES šalys perėmė kaip nacionalinius standartus ar pakeitė bei papildė savo nacionalinius standartus Europos standarto reikalavimais. Minėtas Europos standartas 2004 m. buvo perimtas ir kaip Lietuvos nacionalinis standartas LST EN 14214:2004. 2012 metais šis standartas buvo pakeistas, o 2014 metais papildytas, todėl reikia vadovautis LST EN 14214:2012+A1:2014 standarte pateiktais kokybės reikalavimais. Jie yra privalomi Lietuvos biodyzelino gamintojams ir importuotojams. Standarto privalomumas nurodytas ir ES norminiuose dokumentuose.

Šio darbo tikslas yra ištirti antros kartos biodyzelino ir gamtinių dujų mišinių naudojimo slėginio uždegimo varikliuose efektyvumą. Tyrimui naudojamas mineralinis dyzelinas ir *NExBTL* technologija pagamintas biodyzelinas.

Vienas iš uždavinių buvo ištirti degalų savybes. AB „Lietuvos geležinkeliai“ degalų bazių valdymo centro kokybės tyrimų laboratorijoje buvo ištirti ir mineraliniai degalai bei grynas *NExBTL* biodyzelinas. Toliau esančioje 3 lentelėje pateikti degalų atlikto tyrimo rezultatai.

3 lentelė. Degalų tyrimų kokybės rezultatai (Lietuvos geležinkelių laboratorija)

Laboratorinio tyrimo pavadinimas	Grynas <i>NExBTL</i> biodyzelinas	Grynas mineralinis dyzelinas
Vandens kiekio nustatymas, ppm	19,6	22,8
Pliūpsnio temperatūra, °C	113,0	90,0
Kinematinė klampa 40 °C, mm ² /s	3,03	3,93
Mechaninių priemaišų kiekis, mg/kg	6,0	10,0
Pelenų kiekis, %	0,002	0,014
Ribinė filtruojamumo temperatūra, °C	-40	-10
Tankis +15 °C, kg/m ³	777,9	844,1

3 lentelės tęsinys

Distiliacijos charakteristikos atmosferiniame slėgyje	180 °C	-	-
	250 °C	3,6 %	13,9 %
	340 °C	-	88,6 %
	350 °C	-	93,5 %
	95 %	296,1 °C	354,6 °C
Cetano indeksas	94,4	56,5	63,5

Pagal gautus degalų tyrimų duomenis antros kartos biodyzelinas neatitinka tik vieno punkto iš kokybės reikalavimų t.y. tankis, kuris mažesnis, bet atliekant variklio efektyvumo tyrimą jis neturės didelės įtakos, nes tyrimas daromas su mišiniais. Mineralinis dyzelinas atitinka visus kokybės reikalavimus. Viską apibendrinus daroma išvada, kad užduotyje numatytą tyrimą galima atlikti, nes naudojami degalai iš dalies atlinka slėginio uždegimo varikliams keliamus reikalavimus.

1.5. Suskystintos gamtinės dujos

Gamtinės dujos yra viena iš švariausių šiuo metu naudojamų automobilių degalų rūšių. Vertinant įtaką šiltnamio efektui, jų tarša yra 20–25 % mažesnė nei benzino ir 10–15 % mažesnė nei dyzelino. Gamtinių dujų unikalumas – jų cheminė sudėtis, šių dujų molekulėse yra ypatingai palankus (¼) anglies ir vandenilio atomų santykis. Gamtinių dujų, kaip ekologiško kuro privalumai itin gerai atsiskleidžia miestuose – palyginus dyzelino ir dujinių degalų taršą (g/km) nustatyta, kad gamtinės dujos 90 proc. mažiau nei dyzelinas teršia aplinką dūmais, pelenais ir sieros dvideginiu, 50 % mažiau – anglies monoksidu ir 20 % mažiau – azoto oksidais ir reaguojančiais angliavandeniliais. Palyginus su benzino tarša, gamtinės dujos 80 % mažiau teršia aplinką azoto oksidais, 25 % mažiau – anglies monoksidais ir 20 % mažiau – reaguojančiais angliavandeniliais ir 75 % mažiau – anglies dvideginiu (SG dujos). Gamtinėmis dujomis varomus serijinius automobilius gamina daugelis gamintojų. Šios alternatyvios technologijos infrastruktūra bei paslaugos gana plačiai išvystytos, todėl iš visų alternatyvių ekotechnologijų ji yra labiausiai paplitusi ir prieinama. Kaip ekologiški degalai automobiliams gamtinės

dujos pastaraisiais metais vis labiau skinasi kelią ir Lietuvoje. Dėl palankios mokestinės bazės, taikomos miestų keleivių pervežėjams, didžiuosiuose Lietuvos miestuose kuriamas ir plėtojamas SGD degalinių tinklas, atsiranda vis daugiau transporto priemonių, varomų gamtinėmis dujomis (SG dujos). Pagrindinis SGD komponentas yra metanas (CH₄) – paprasčiausias (pirminis) angliavandenilis. SGD degimas yra sąlyginai švarus ir išmetamosiose dujose yra mažiau CO₂ negu degant kitiems naftinės kilmės degalams. SGD yra įvairių dujų mišinys. Jų sudėtyje yra lengvųjų alkanų, tokių kaip metanas, etanas, propanas, *n*-butanas, isobutanas ir pentanas. Taip pat, gamtinių dujų sudėtyje yra anglies dioksido, azoto ir vandens garų pėdsakų. Gamtinių dujų sudėtis nežymiai priklauso nuo jų išgavimo vietos ir gamybos proceso (Lietuvos energetikos institutas).

4 lentelė. Pagrindinės gamtinių dujų fizikinės savybės (Klaipėdos nafta)

Parametras	Skaitinė reikšmė		Pastabos
Medžiagos cheminė sudėtis (masės %)	metanas (CH ₄)	94,7 %	esant 20 °C temperatūrai
	etanas (C ₂ H ₆)	4,8 %	
	propanas (C ₃ H ₈)	0,4 %	
	kt. junginiai	0,1 %	
Vidutinė virimo temperatūra	-161,7	[°C]	
Lydymosi/Užšalimo temperatūra	-182,5	[°C]	
Kritinė temperatūra	-82,7	[°C]	
Kritinis slėgis	4,56	[MPa]	
Sočių garų slėgis	2627	[kPa]	esant -100 °C temperatūrai
Molekulinė masė	16,4		
Garų fazės tankis	prie -162 °C 1,8 prie 0 °C 0,73 prie 15 °C 0,69 prie 30 °C 0,66	[kg/m ³]	
Skysčio fazės tankis	0,44	[t/m ³]	
Specifinė garavimo šiluma	502,8	[kJ/kg]	
Kaloringumas	49,07	[MJ/kg]	
Šiluminė talpa	3,4-2,1	[kJ/kg·K]	C _p (skysčio/garų)
Savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra	526,6	[°C]	
Pliūpsnio temperatūra	-188	[°C]	
Sprogumo ribos	5-15	tūrio %	

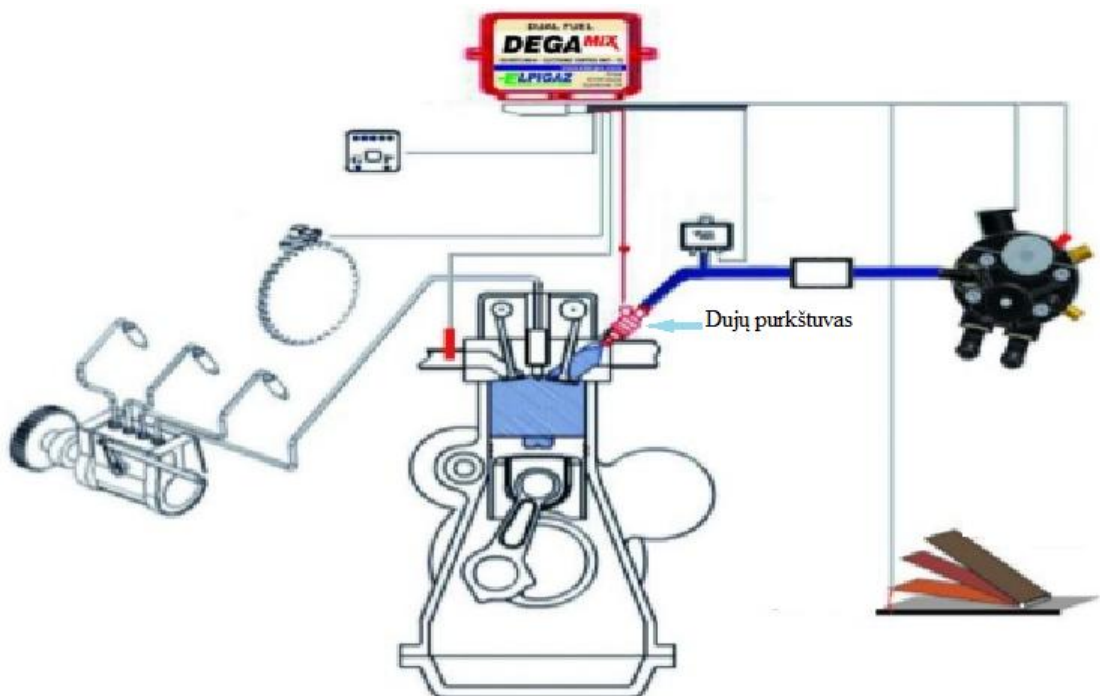
1.6. Dujų maitinimo sistemos slėginio uždegimo varikliams

Kaip transporto priemonių degalai SGD naudojamos jau nuo 1930 m (Imran et al., 2014). Gamtinių dujų naudojimas kibirkštinio uždegimo varikliuose yra plačiai išplėtotas, tuo tarpu šių dujų naudojimas slėginio uždegimo varikliuose dar yra tobulinimo stadijoje. Gamtinės dujos slėginio uždegimo variklyje sunkiai užsiliepsnoja dėl aukštos dujų savaiminio užsiliepsnojimo temperatūros ir žemo cetaninio skaičiaus lyginant su dyzelinu (Chandra et al., 2011; Korakiantis et al., 2011). Taip pat, pirminis užsiliepsnojimo šaltinis visada yra būtinas tam, kad dujos užsidegtų. Pagal gamtinių dujų patekimą į cilindrą ir pirminį uždegimo šaltinį, išskiriami trys pagrindiniai GD panaudojimo metodai:

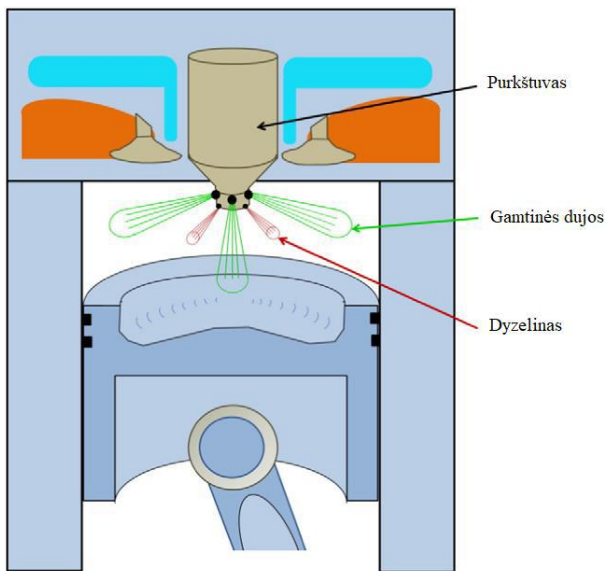
1. Dyzelino ir gamtinių dujų mišinys (Dual fuel) – šiuo būdu GD yra įpurškiamos į įsiurbimo kolektorių, kad susimaišytų su oru ir tada šis mišinys patenka į cilindrą, kur yra uždegamas tiesiogiai į cilindrą įpurkšto dyzelino (Paul et al., 2014) (3 pav.).

2. Tiesioginis dujų įpurškimas aukštu slėgiu – šiuo būdu pirmiausia į cilindrą suspaudimo takto pabaigoje įpurškiamas nedidelis kiekis dyzelino ir tada tiesiogiai į cilindrą įpurškiamos GD. Intervale tarp skirtingų degalų įpurškimų arba dujų įpurškimo pradžioje dyzelinas užsiliepsnoja, taip uždegdamas ir gamtines dujas (McTaggart-Cowan et al., 2008). Tiesioginio dujų įpurškimo schema parodyta 4 pav.

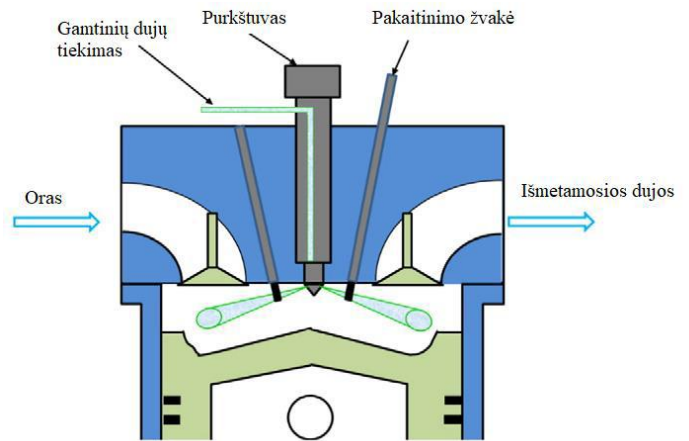
3. Karštų paviršių inicijuotas slėginis uždegimas – taikant šį būdą GD įpurškiamos tiesiai į cilindrą suspaudimo takto pabaigoje arti įkaitusio paviršiaus (5 pav.). Įkaitęs paviršius dažniausiai būna pakaitinimo žvakė, kurios temperatūra siekia 1200–1400 K. Didžiausias šio būdo privalumas yra didelė variklio išvystoma galia ir šiluminis naudingumo koeficientas. Tačiau, sistemos patikimumas labai priklauso nuo pakaitinimo žvakės (Wei et al., 2016). Praktikoje šis būdas retai naudojamas.



3 pav. Dual fuel sistema (Elpigaz)



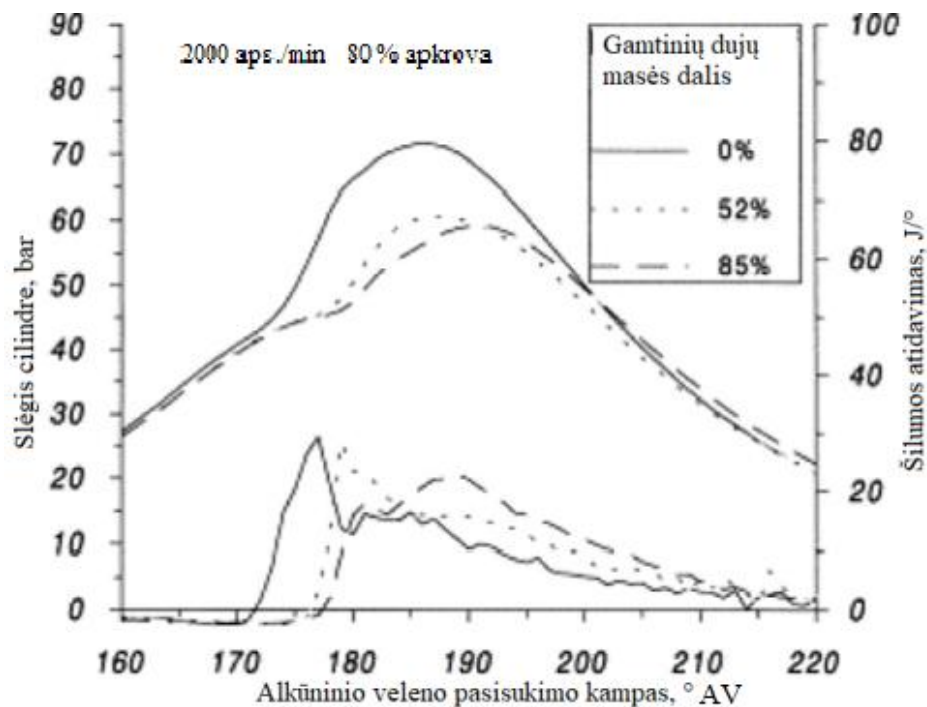
4 pav. Aukšto slėgio *Dual fuel* tiesioginio įpurškimo schema (Wei ir Geng, 2016)



5 pav. *Dual fuel* karšto paviršiaus inicijuoto slėginio uždegimo schema (Wei ir Geng, 2016)

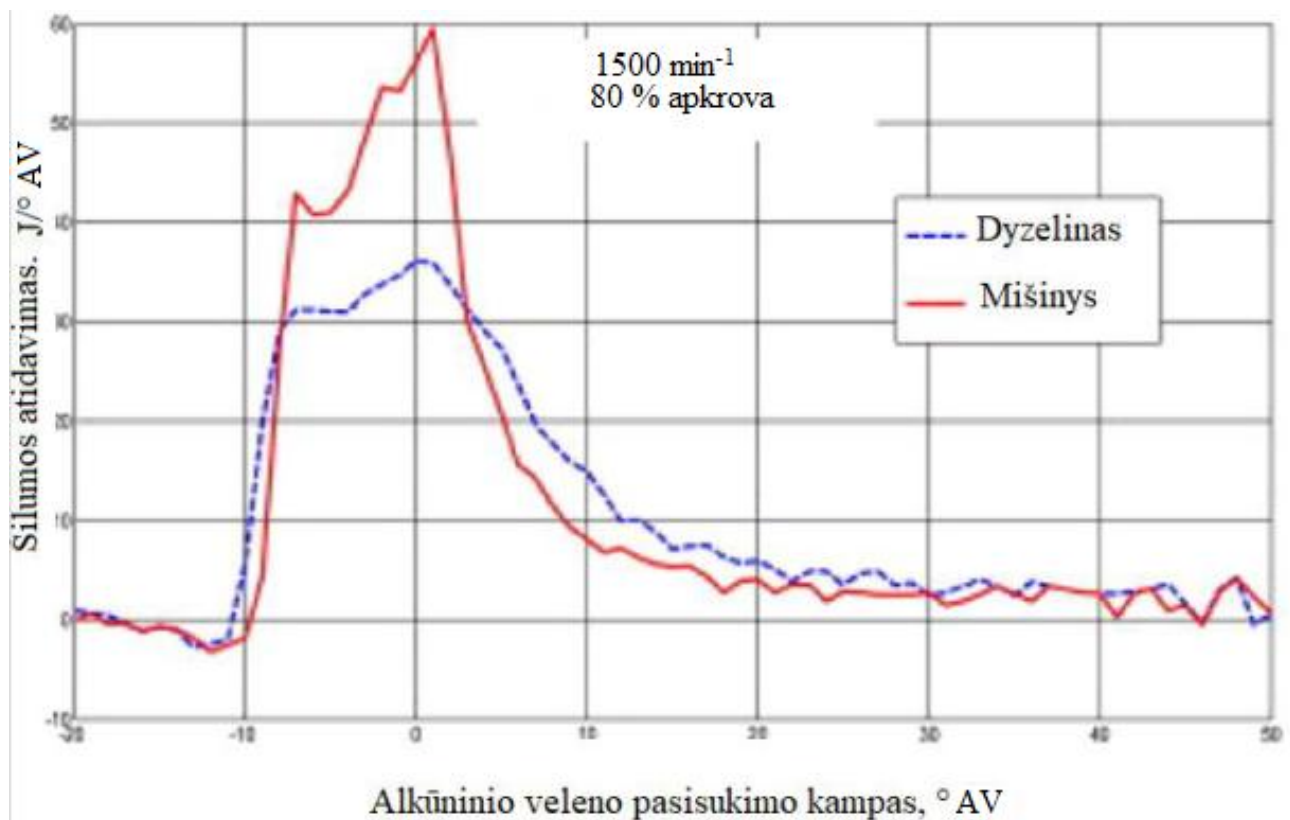
1.7. Degimo proceso charakteristika

Degalų degimas cilindre yra vienas iš svarbiausių procesų, darančių įtaką kenksmingų medžiagų formavimuisi išmetamosiose dujose, taip pat nulemiančių variklio efektyvumą ir patikimumą (Tesfa et al., 2013). GD ir dyzelinas yra du skirtingų fizinių ir cheminių savybių degalai. Dyzelino degimas cilindre vyksta degalams maišantis su oru – difuzinis degimas, GD dega sklindant liepsnos frontui, nes dujos būna jau iš anksto susimaišiusios su oru. Gamtinių dujų patekimas į cilindrą turi įtakos degimo procesui dėl pasikeitusio oro/degalų mišinio formavimosi ir degimo.



6 pav. Slėgis cilindre ir šilumos išsiskyrimas esant skirtingai GD koncentracijai 2000 min^{-1} , 80 % apkrova (Papagiannakis ir Hountalas, 2003)

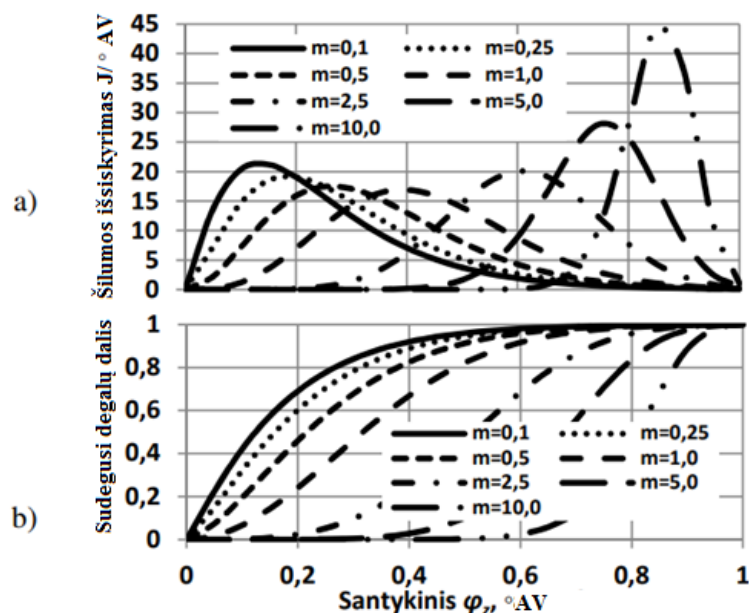
Išanalizavus mokslinę literatūrą akivaizdu, kad dyzelino ir gamtinių dujų mišinio degimo procesas yra kitoks lyginant su gryno dyzelino degimu (Papagiannakis ir Hountalas, 2003). Antroje dyzelino ir dujų mišinio degimo stadijoje susimaišęs nedidelis dyzelino kiekis pradeda degti vėliau (pailgėja užsilepsnojimo gaisties fazė) ir uždega gamtines dujas. Dėl mažo dyzelino kiekio ir mažos gamtinių dujų/oro koncentracijos šilumos atidavimo koeficientas yra mažesnis nei normalaus (gryno dyzelino) degimo atveju. Trečioje dyzelino ir gamtinių dujų degimo stadijoje, dėl mažesnio dujinių degalų degimo greičio ir vėlesnio užsidegimo, didžiausias šilumos išsiskyrimo greitis nėra labai didelis, todėl degimo trukmė pailgėja (Papagiannakis ir Hountalas, 2003) (6 pav.). Todėl daugiau degalų yra sudeginama ketvirtoje degimo stadijoje, tai gali lemti aukštesnę išmetamųjų dujų temperatūrą.



7 pav. Slėgis cilindre ir šilumos išsiskyrimas esant skirtingai GD koncentracijai 1500 min^{-1} , 80 % apkrova (Lounici 2014)

Tačiau, sumaišytų gamtinių dujų degimas gali būti suaktyvintas padidinus GD koncentraciją mišinyje, paankstinus dyzelino įpurškimo momentą ir kt. (7 pav.) (Lounici et al., 2014).

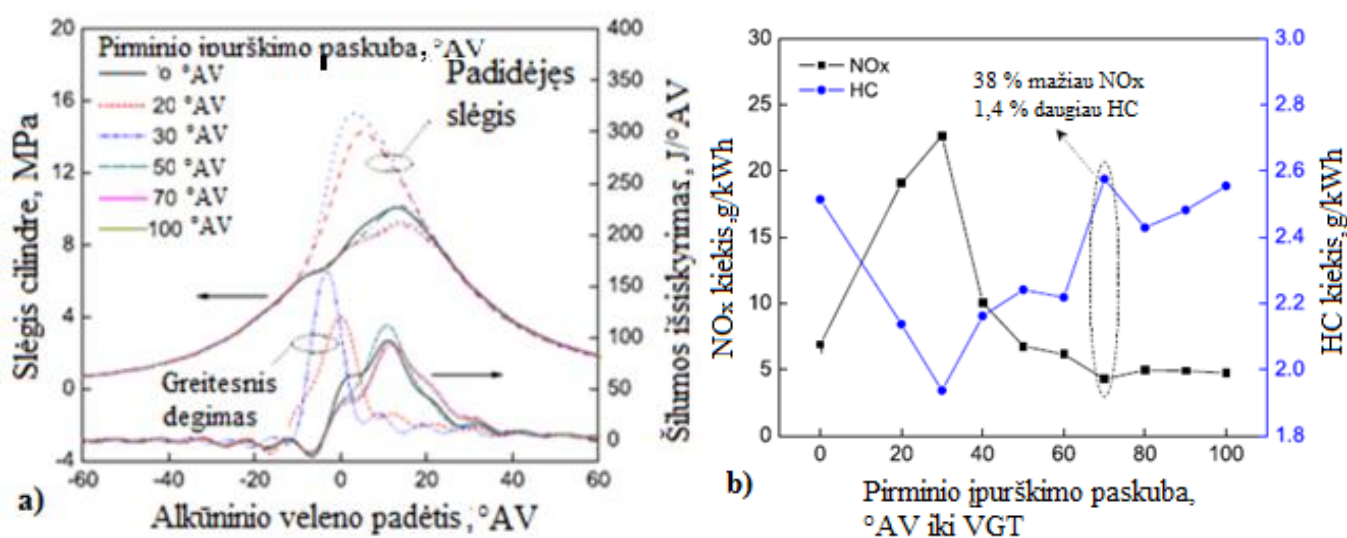
Šilumos išsiskyrimo rodiklis m – tai parametras, apibūdinantis degalų degimo intensyvumą degimo proceso metu. Šiuo rodikliu nusakoma šilumos išsiskyrimo proceso eiga. Integralinio ir diferencialinio Vibe dėsnų kitimas priklausomai nuo šilumos išsiskyrimo charakterio rodiklio m pavaizduotas 8 paveiksle. Kuo mažesnė m reikšmė, tuo šilumos išsiskyrimo greičio maksimumas arčiau degimo proceso pradžios. Taip pat m vienareikšmiškai parodo dalį degalų, sudegusių šilumos išsiskyrimo greičio augimo ir lėtėjimo periodais (Žaglinskis J. 2014).



8 pav. Šilumos išsiskyrimo rodiklio $dx/d\phi$ greičio maksimumo pasiskirstymas (a) šilumos išsiskyrimo metu priklausomai nuo m parametro reikšmės ir pilnutinio degalų degimo charakteristika (b)

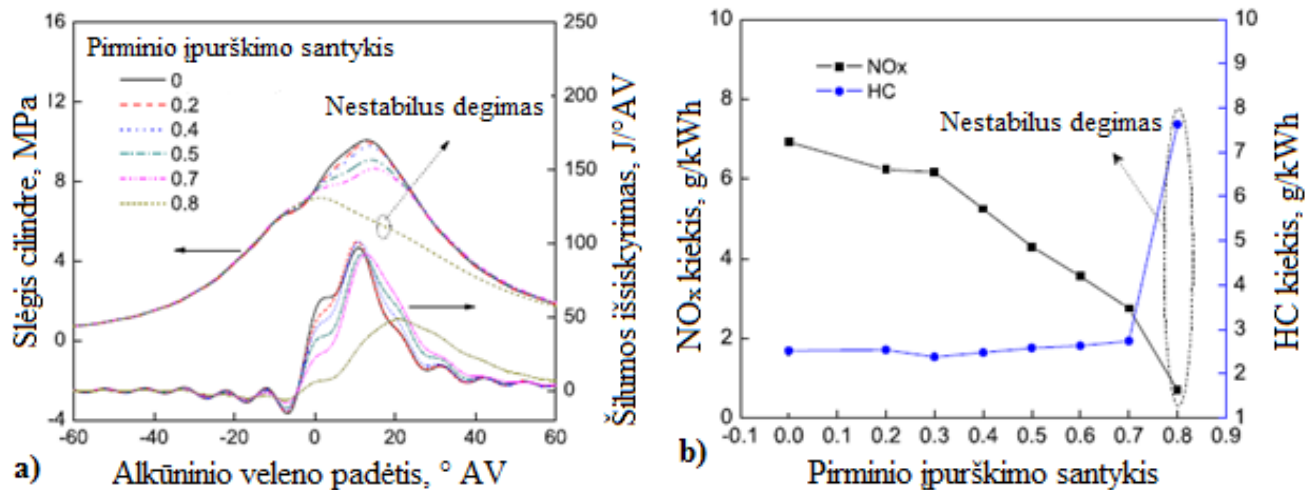
1.8. Degalų tiekimo parametrų įtaka degimo procesui

Vienas iš būdų, leidžiančių sumažinti dyzelinio variklio NO_x emisiją, yra *Dual-fuel* maitinimo sistemos panaudojimas, t. y. sumontuojant varikliui papildomą gamtinių dujų maitinimo sistemą. Siekiant gauti optimalius variklio darbo ekologinius ir energetinius rodiklius, reiktų pakoreguoti ir dyzelinių degalų įpurškimo momentą, kuris nustato degimo proceso pradžią cilindre. Dujos dega lėčiau už dyzeliną, todėl, norint išgauti geriausią efektą, reikia koreguoti dyzelino įpurškimo pradžią ir kiekį (Xu et al., 2016). Paankstinus pirminį dyzelino įpurškimą 80–100 °AV iki VGT padidėja slėgis ir temperatūra cilindre, degimo procesas intensyvėja, kas lemia NO_x sumažėjimą (9 pav.).



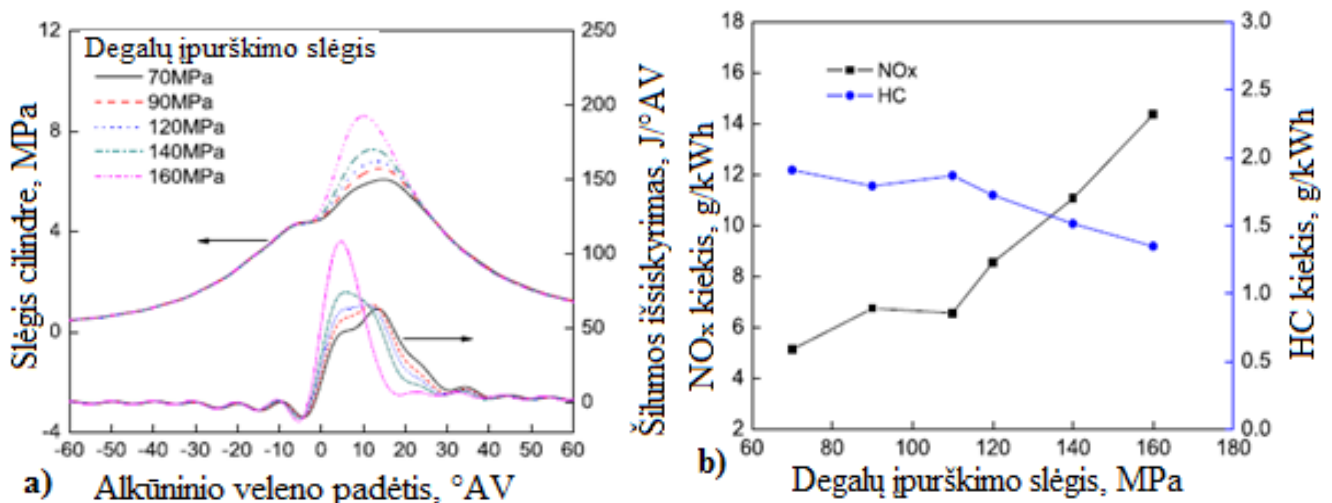
9 pav. Slėgio cilindre ir degimo proceso šilumos išsiskyrimas (a), NO_x ir HC kiekiai (b) esant pastoviams 1400 min^{-1} sukiamis ir apkrovai 1000 Nm bei keičiant pirminio įpurškimo momentą (Xu et al., 2016)

Taipogi pirminio įpurškimo kiekis, kuris yra skirtas gamtinių dujų ir oro mišiniui uždegti cilindre turi didelės įtakos degimo procesui. Naudojant 10 °AV iki VGT degalų įpurškimo momentą ir keičiant pirminio įpurškimo kiekį santykiu su visų degalų kiekiu skirtu cilindro darbo ciklui, ribose nuo 0 iki 1 pastebimas degimo proceso pasikeitimas, lemiantis slėgio cilindre sumažėjimą ir vėlinantis šilumos išsiskirimą. Didinant pirminio įpurškimo kiekį, mažėja NO_x koncentracija, bet pasiekus 0,7 ir didesnę kiekio proporciją, variklis pradeda dirbti ne stabiliai, staiga padidėja smarkiai HC (10 pav.).



10 pav. Slėgio cilindre ir degimo proceso šilumos išsiskyrimas (a), NO_x ir HC kiekiai (b) esant pastoviams 1400 min⁻¹ sukiamis ir apkrovai 1000 Nm bei keičiant pirminio įpurškimo kiekį (Xu et al., 2016)

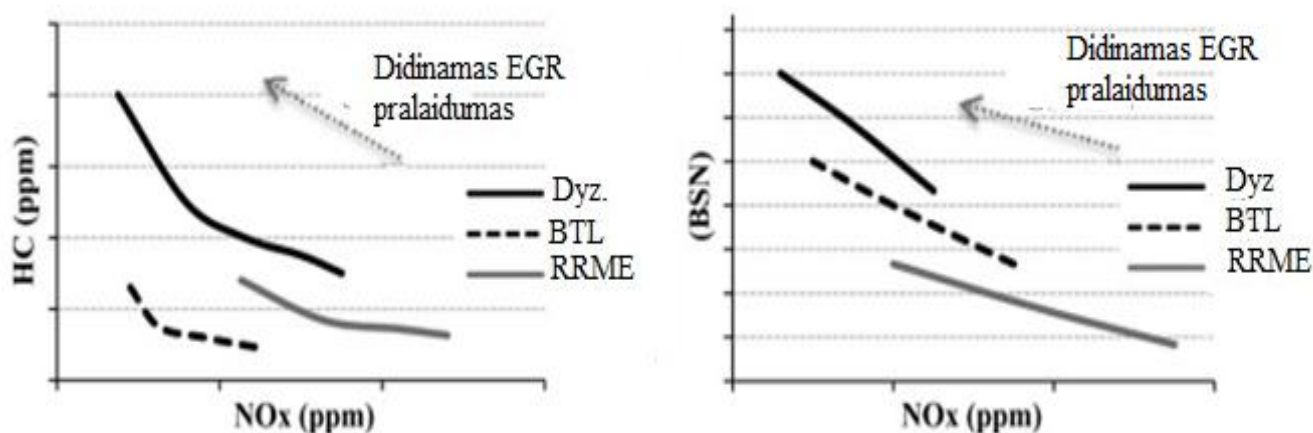
Degalų įpurškimo slėgio įtaka degimo procesui turi irgi labai didelę įtaką, nes didinant įpurškiamų degalų slėgį, intensyvėja degimas, šilumos išsiskyrimas padidėja staigiau, sukeldamas didesnę slėgį cilindre, kas turi įtakos variklio energetiniam efektyvumui. Padidinus įpurškimo slėgį nuo 70 MPa iki 160 MPa šilumos išsiskyrimas padidėja virš 50 %, o slėgis cilindre virš 30 %, bet intensyvesnis degimas įtakoja ir didesnę NO_x kiekį (11 pav.).



11 pav. Slėgio cilindre ir degimo proceso šilumos išsiskyrimas (a), NO_x ir HC kiekiai (b) esant pastoviams 1400 min⁻¹ sukiamis ir apkrovai 600 Nm bei keičiant dyzelino įpurškimo slėgį (Xu et al., 2016)

1.7. Deginių recirkuliacija

Siekiant įvykdyti vis griežtėjančius išmetamųjų dujų emisijos reikalavimus, automobilių variklių gamintojai tyrinėjo įvairias technologijas, tokiu būdu buvo sukurta deginių recirkuliacijos sistema, sutrumpintai vadinama EGR. Šios sistemos veikimo principas paremtas jau sudegusių dujų dalies kiekio tiekimu į įsiurbimo traktą, taip sumažinant NO_x bei kietųjų dalelių kiekį. EGR naudojimas sumažina teršiančių aplinką dalelių kiekį, tačiau esant šiai sistemai sunaudojama daugiau degalų. Todėl buvo imtasi kitų priemonių ir po ilgų tyrimų metų buvo atrasti jau minėti *NExBTL* degalai, kurių tikslas sumažinti išmetamųjų dujų emisijos kiekį. *NExBTL* degalai turi daug didesnę cetaninę skaičių, yra beveik be sieros ir aromatinių angliavandenilių, todėl variklis išmeta mažiau dūmų. Galima daryti prielaidą, kad dėl didelio biodyzelino cetaninio skaičiaus sutrumpėja degiojo mišinio uždelsimo momentas, todėl turėtų sumažėti išmetamųjų dujų emisijos kiekis bei variklio triukšmas. Abu-Jrai ir kt., 2009 metais darytas tyrimas parodė kad esant standartiškai suprogramuotai EGR išmetamųjų dujų kiekio reikšmei ir naudojant BTL galima sumažinti NO_x kiekį. Toks rezultatas buvo pasiektas be dūmų padidėjimo, variklio šiluminio efektyvumo sumažėjimo bei degalų kiekio padidėjimo. Panašias išvadas galima pamatyti ir (Abu-Jraia et al., 2009) darbe, kur buvo pastebėta, kad dėl mažesnio suodžių išmetimo naudojant BTL technologijos biodyzeliną ir jo mišinius su dyzelinu, galima gerokai sumažinti išmetamą NO_x kiekį išnaudojant visas EGR galimybes. 12 paveiksle pateikti degalų rūšių bei EGR priklausomybės grafikai (Gill et al. 2011).



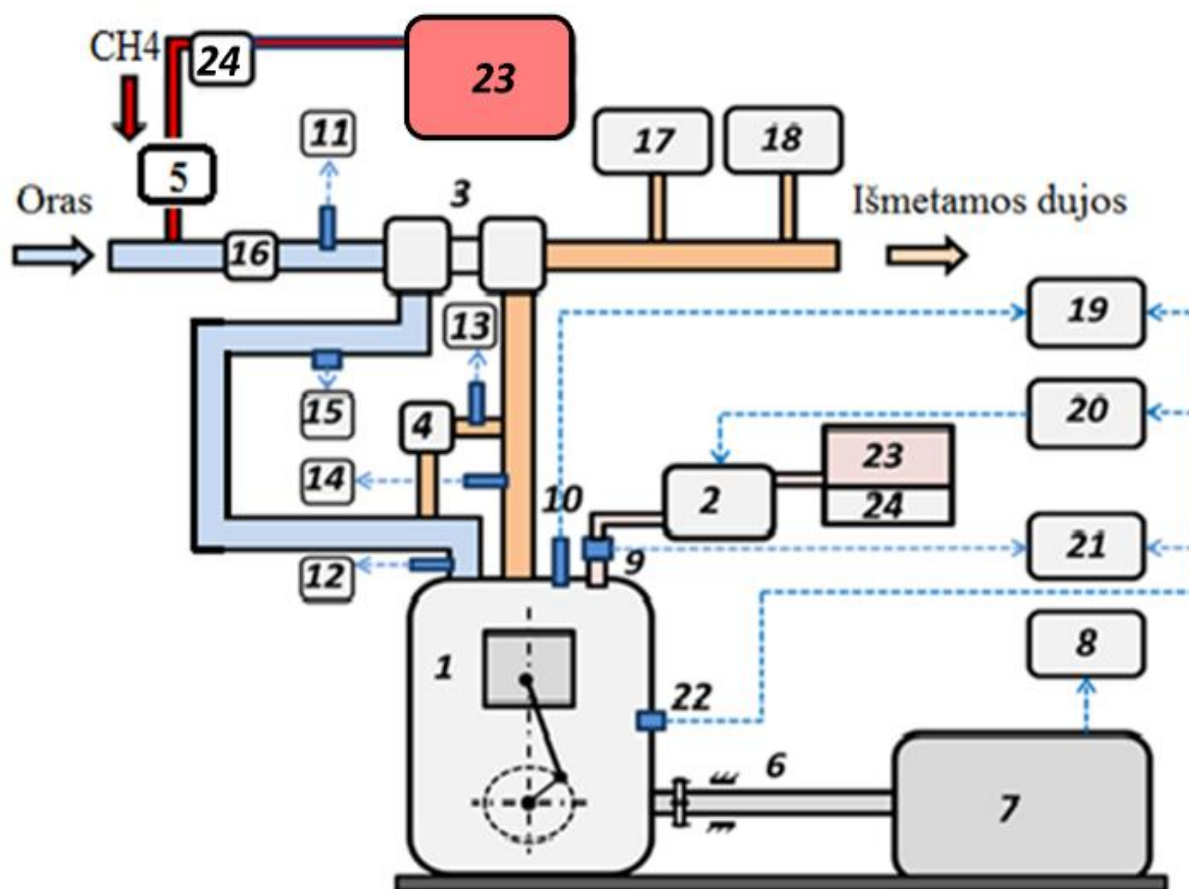
12 pav. EGR sistemos įtaka ekologiniams rodikliams, varikliui veikiant skirtingais degalais (Gill et al, 2011)

Taigi apibendrinus galima teigti, kad tinkamai suprogramavus EGR deginių tiekimo kiekį, įmanoma pasiekti gerokai mažesnius išmetamųjų dujų emisijos kiekius. Viena iš šio darbo uždavinių, būtent ir yra – patikrinti ar tikrai šios technologijos degalai turi poveikį deginių emisijos sumažinimui (Gill et al, 2011).

2. TYRIMŲ METODIKA

2.1. Eksperimentinė įranga

Eksperimento uždavinys – patikrinti *NExBTL* ir gamtinių dujų efektyvumą slėginio uždegimo variklyje, bei ištirti energinius ir ekologinius parametrų rodiklius. Bandymai atlikti VGTU Automobilių inžinerijos katedros laboratorijoje (J. Basanavičiaus g. 28) su vidaus degimo dyzeliniu 1.9 TDI (1Z) varikliu, kuriame sumontuotas *BOSCH VP37* skirstomojo tipo degalų siurblys su elektroniniu valdymu ir turbokompresorius (13 pav.). Taipogi šitam varikliui buvo sumontuota dujų maitinimo sistema „Dual fuel“ (*Elpigaz - Degamix*). Variklio pagrindiniai parametrai pateikti 5 lentelėje.



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

5 lentelė. 1Z Variklio pagrindiniai parametrai

Parametras	Vertė
Variklio darbinis tūris (cm ³)	1986
Cilindrų skaičius	4
Suslėgimo laipsnis	19,5
Stūmoklio skersmuo (mm)	79,5
Stūmoklio eiga (mm)	95,5
Galia (kW)	66 (4000 min ⁻¹)
Sukimo momentas (Nm)	180 (2000-2500 min ⁻¹)
Degalų purkštovo atsidarymo slėgis (bar)	190

Bandymų metu fiksuoti parametrai ir naudota įranga pateikta (6 lentelėje), pagrindinės matavimo įrangos techninės charakteristikos pateiktos (8,9,10 lentelėse).

6 lentelė. Tyrimo metu matuojami parametrai ir naudojama įranga

Matuojamo parametro pavadinimas	Naudojama matavimo įranga
Alkūninio veleno sūkių dažnis n , min ⁻¹ .	(AVL DiSystem 845) jutiklis ir variklio sūkių indikatorius (Extech 461960).
Variklio apkrova M_e , Nm.	Variklio apkrovos stendas (KI-5543).
Degalų tiekimo momentas (kampas iki VGT) θ , ° AV.	Stebėta iš variklio EVB parametrų naudotas (VAG-com v11.2).
Slėgis įsiurbimo trakte p_{TC} , bar.	Slėgio įsiurbimo trakte indikatorius (HD2304).
Vartojama oro masė B_{air} , kg/h.	Stebėta iš variklio EVB parametrų naudotas (VAG-com v11.2).
Įsiurbiamo oro temperatūra T_{air} , °C.	K-tipo termopora.
Temperatūra įsiurbimo kolektoriuje T_{Int} , °C.	stebėta iš variklio EVB parametrų naudotas (VAG-com v11.2).
EGR sistemos temperatūra T_{EGR} , °C.	Išmetamųjų dujų temperatūros indikatorius (N24).
Išmetamųjų dujų temperatūra T_{ex} , °C.	Išmetamųjų dujų temperatūros jutiklis (K tipo).
Oro pertekliaus koeficientas λ .	Dujų analizatorius (AVL DiCom 4000).
Anglies monoksido kiekis CO, %.	
Anglies dioksido kiekis CO ₂ , %.	
Degunies kiekis O ₂ , %.	
Angliavandenilių kiekis HC, ppm.	
Azoto oksidų kiekis NO _x , ppm.	
Dūmingumas Smok, %.	Suodžių indikatorius (AVL DiSmoke).

6 lentelės tęsinys

Variklio alyvos temperatūra T_{oil} , °C.	stebėta iš variklio EVB parametrų naudotas (VAG-com v11.2).
Triukšmo lygis <i>Noise</i> , dB.	Triukšmomatis.
Suvargota dyzelino/biodyzelino masė m_f , g.	Elektroninės svarstyklės (SK-5000)
Suvargota gamtinių dujų masė B_{fg} , g/min.	Dujų srauto matuoklis (<i>Massflowmeter Type RHM 015</i>).
Laikas, per kurį suvartojami degalai t , s.	Chronometras.
Slėgis cilindre, p , Pa	Kaitinimo žvakėje integruotas pjezoelektrinis jutiklis (GG2 1569), stiprintuvas (AVL DiTEST DPM 800).

7 lentelė. Variklio apkrovos stendo (KI-5543) techninės charakteristikos

Matavimo ribos	0–186 Nm
Matavimo tikslumas	± 1,23 Nm

8 lentelė. Pagrindinės išmetamųjų dujų analizatoriaus AVL DiCom 4000 techninės charakteristikos

Parametras	AVL DiCom 4000	
	Matavimo diapazonas	Tikslumas
CO, %	0–10	± 0,02
CO ₂ , %	0–20	± 0,3
HC, ppm	0–20 000	± 4
NO _x , ppm	0–5000	± 25
O ₂ , %	0–25	± 0,1
λ	0,6–1,7	± 0,001

9 lentelė. Pagrindinės dujų srauto matuoklės RHEONIK RHM 015 techninės charakteristikos

Parametras	RHEONIK RHM 015
Degalų agregatinė būseną	Dujinė/skystinė
Matavimo tipas	Koriolio masės matavimas
Matavimo diapazonas, kg/min	0,004 0,6
Tikslumas	±0,10 %

10 lentelė. Pagrindinės suodžių indikatorius (AVL DiSmoke) techninės charakteristikos

Matavimo ribos	0–100 %
Matavimo tikslumas	± 0,10 %

Dujų maitinimo sistemos darbiniai parametrai nustatyti ir koreguoti naudojant adapterį kompiuteriui (*Setaltas SM045-0*) ir programą (*Elpigaz Dual fuel*).

2.2. Tyrimo režimai ir tiriami degalai

Bandymui naudojami įvairūs *NExBTL* ir gamtinių dujų mišiniai, norint tinkamai įvertinti pastarųjų mišinių efektyvumą, naudojami ir Lietuvos rinkoje parduodami dyzeliniai degalai. Buvo padaryti įvairūs mišiniai, gryną dyzeliną tiekiant su gamtinėmis dujomis ir *NExBTL* tiekiant su gamtinėmis dujomis tam tikromis procentinėmis dalimis:

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

Naudojamų dyzelinių degalų fizikinės savybės, gautos iš bandymų, atliktų Lietuvos geležinkelių laboratorijoje, pateiktos 3 lentelėje.

Kadangi gamtinių dujų degimo procesas labai skiriasi nuo dyzelino, sumaišant tuos degalus variklyje pasikeičia degimo proceso rodikliai. Norint ištirti ir atrasti optimalius variklio valdymo parametrus tiriamam varikliui buvo keičiamas ir dyzelinių degalų tiekimo pradžios momentas intervalais po 3° tarp -18° ir 0° iki VRT varikliui dirbant visais anksčiau numatytais mišiniais.

Taipogi buvo tirta EGR įtaka variklio darbiniam rodikliams, atlikti bandymai su standartiškai veikiančia EGR sistema ir su atjungta.

Visi bandymų parametrai fiksuoti po 5 kartus su 1 minutės intervalais siekiant gauti nusistovėjusias reikšmes.

Pagal surinktą informaciją buvo apskaičiuotas variklio efektyvusis naudingumo koeficientas, taip pat buvo nustatyta aplinkos taršos poveikį didinančių cheminių elementų koncentracija. Bandymo metu naudoja įrangą ir užrašomos vertės:

2.3. Variklio rodiklių skaičiavimo metodika

Degalų proporcijoms nustatyti naudojama formulė (1), vertinanti metano (CH_4) energetinę dalį degalų mišinyje:

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

čia: B_{CH_4} – metano dujų valandinės sąnaudos (kg/h);

B_{Dyz} – dyzelino valandinės sąnaudos (kg/h);

$H_{z_CH_4}$ – metano dujų žemutinis šilumingumas (50 MJ/kg);

H_{z_Dyz} – dyzelino žemutinis šilumingumas (43,6 MJ/kg).

Pirmoje tyrimo dalyje bandyti visi degalų mišiniai, su standartiškai veikiančia EGR sistema ir su atjungta. Antroje tyrimo dalyje – mišiniai D40/M60 ir B40/M60, kurių ekologiniai ir energetiniai variklio veikimo rodikliai buvo lyginami su grynais D100 ir B100 degalais, atjungus EGR. Pradiniai bandymai atlikti su gamintojo numatytu degalų įpurškimo pradžios momentu kuris, varikliui veikiant dyzelinu, yra 3° alkūninio veleno (AV) pasisukimo kampo prieš stūmoklio viršutinį galinį tašką (VGT). Teoriškai žinoma, kad didžiausias variklio sukimo momentas gaunamas maksimaliam slėgiui cilindre esant 10–12 ° AV po VGT. Norint ištirti ir atrasti optimalius variklio valdymo parametrus tiriamam varikliui buvo keičiamas dyzelinių degalų tiekimo pradžios momentas intervalais kas 3° AV tarp 18° ir 0° AV iki VGT.

Eksperimentui parinkti variklio sūkliai $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, nes jais variklis dažnai dirba važiuojant miesto sąlygomis ir užmiestyje, ir apkrova $M_e = 60 \text{ Nm}$, dažnai tenkanti varikliui eksploatavimo metu.

Taipogi buvo skaičiuojamas ir vertinamas variklio efektyvusis naudingumo koeficientas, kuris parodo, kokia degalų degimo šilumos dalis variklyje paverčiama efektyviu darbu. Šis VDV koeficientas yra labai patogus naudoti vertinant variklio efektyvumą, nes įvertina ir šiluminius ir mechaninius variklio nuostolius.

Variklio efektyvusis naudingumo koeficientas nustatomas naudojant formulę (Heywood, 1988):

$$\eta_e = \frac{P_e \cdot 3,6}{Q_i} = \frac{P_e \cdot 3,6}{B_d \cdot H_a} = \frac{3600}{b_e \cdot H_a} \quad (2)$$

čia:

P_e – VDV variklio efektyvioji galia išmatuota galios stendu (kW);

Q_i – šilumos kiekis cilindre (kW);

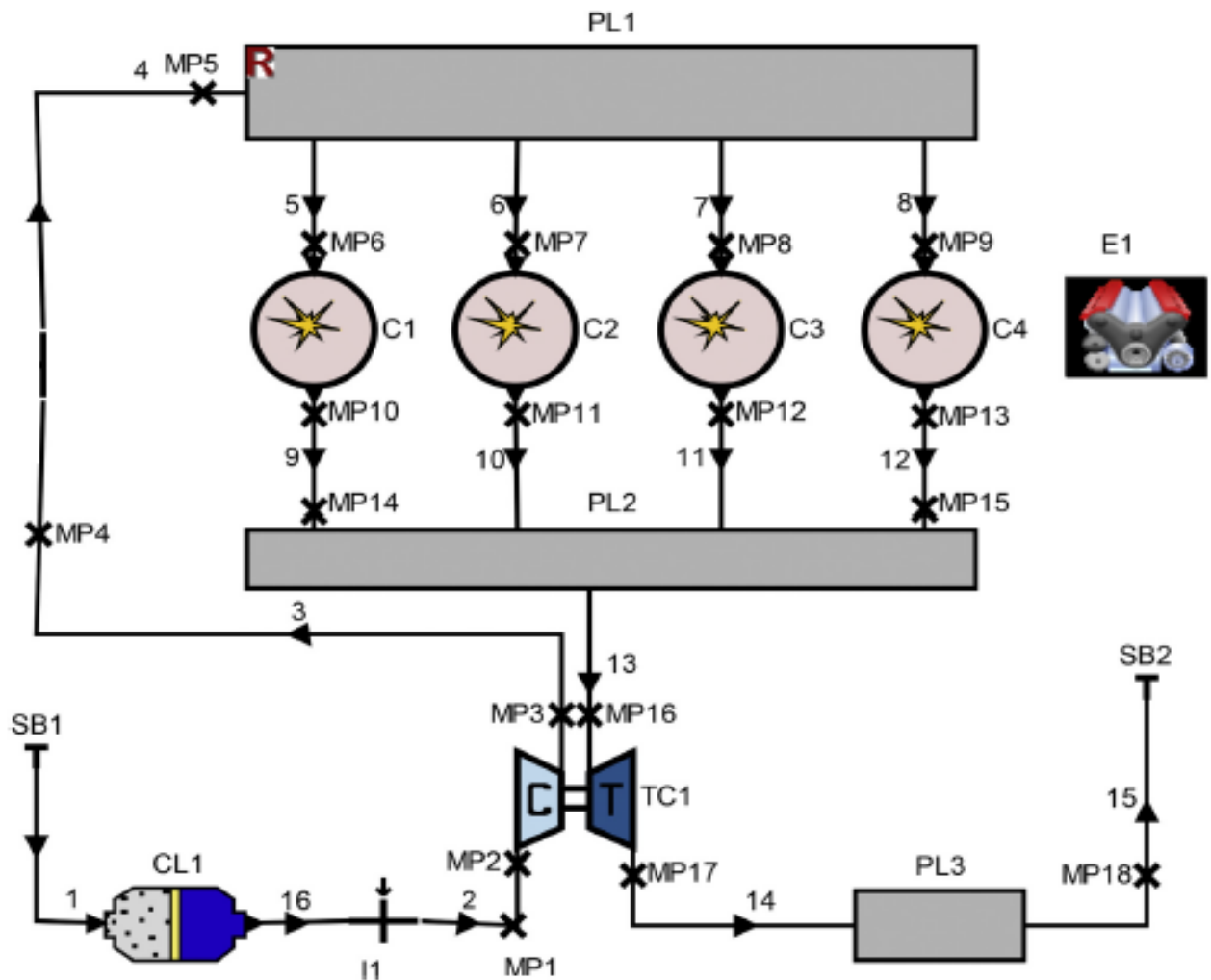
H_a - degalų žemutinis šilumingumas (MJ/kg);

B_d – degalų sąnaudos (kg/h);

b_e – lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos (g/kW·h).

2.4. Skaitinio modeliavimo AVL BOOST programa metodika

Siekiant išsamesnės variklyje vykstančio degimo proceso analizės ir jo optimizavimo galimybių tyrimo AVL BOOST programoje buvo sukurtas tiriamo variklio skaitinis modelis (14 pav.). Į šį modelį įkėlus eksperimentinių tyrimų informaciją (degalų ir oro sąnaudos, slėgis cilindre ir kt.) apskaičiuoti degimo rodikliai varikliui veikiant įvairiais degalais.



14 pav. Tiriamo variklio modelis AVL BOOST programoje: I1 – gamtinių dujų tiekimo purkštukas; SB1-2 – aplinkos sąlygos; PL1 – įsiurbimo kolektorius; PL2 – išmetimo kolektorius; PL3 – duslintuvas; CL1 – oro filtras; MP1-18 – matavimo vietos; C1-4 – variklio cilindrai; 1-15 – jungiamieji vamzdžiai; TC1 – turbokompresorius

Tiriamo variklio degimo proceso matematinis modelis kuriamas pritaikant Vibe vienos zonos modelį, nes jis yra orientuotas į degalų degimo kinematiką. Šilumos išsiskyrimas $dx/d\varphi$ ($x = f(\varphi)$) nustatomas panaudojant I. I. Vibe modelio formulę (AVL BOOST, 2011):

$$\frac{dx}{d\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)} = 6,908(m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m e^{-6,908\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}}; \quad (3)$$

Čia:

m – degimo proceso intensyvumo formos parametras;

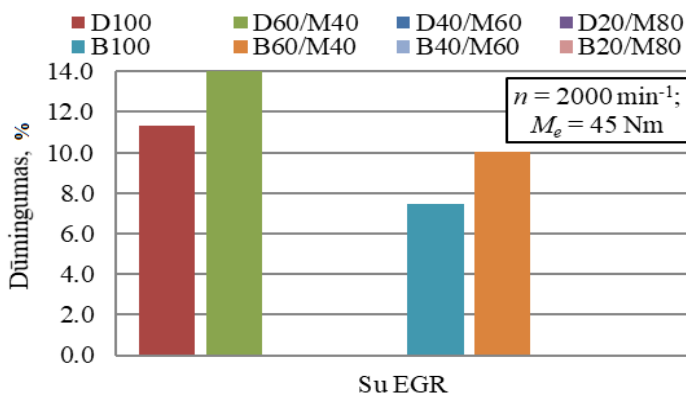
φ – alkūninio veleno padėtis nuo degimo proceso pradžios, °AV;

φ_z – degimo proceso trukmė, °AV.

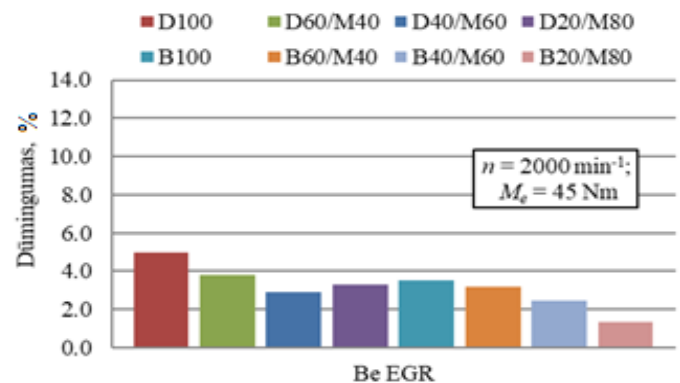
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ VERTINIMAS

3.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė.

Varikliui veikiant su EGR (15 pav.) sistema paaiškėjo, kad, padidinus gamtinių dujų koncentraciją mišinyje iki 60 %, variklio dūmingumas labai išaugo (iki 99 %) ir, toliau didinant gamtinių dujų koncentraciją mišinyje iki 80 %, variklio darbas darėsi nestabilus, buvo juntami detonacijos požymiai. Remiantis stebėtais parametrais daroma išvada, kad tai vyksta dėl EGR. Paduodant daugiau gamtinių dujų varikliui ir išlaikant tą patį apkrovos režimą $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $M_e = 45 \text{ Nm}$, maitinimo sistemos elektroninio valdymo blokas pagal, gamintojo surašytą programą, mažino dyzelino padavimą, vėlino dyzelino įpurškimo pradžios momentą ir atidarydavo labiau EGR vožtuvą, ko pasekoje sumažėdavo šviežio oro vartojimas ir mišinys smarkiai riebėjo, kaito ir prasidėjo nekontroliuojamas jo degimas. Atjungus EGR, didėjanti metano koncentracija degaluose mažino dūmingumą (16 pav.). Tai paaiškinama paprastesne dujų molekuline grandine, mažesniu gamtinių dujų C/H santykiu, užsitęsusi degimu. Palyginus dūmingumą, degant dyzelinui su CH_4 ir biodyzelinui su CH_4 matome, kad, naudojant biodyzeliną, visų mišinių dūmingumas yra ~16 % mažesnis. To priežastis yra mažesnis biodyzelino (*NExBTL*) C/H santykis, palyginus su mineraliniu dyzelinu.



15 pav. Tiriamo variklio dūmingumas veikiant skirtingais degalų mišiniais su veikiančiu EGR D40M60, B40M60, D20M80 ir B20M80 mišinių dūmingumas artimas 99 %

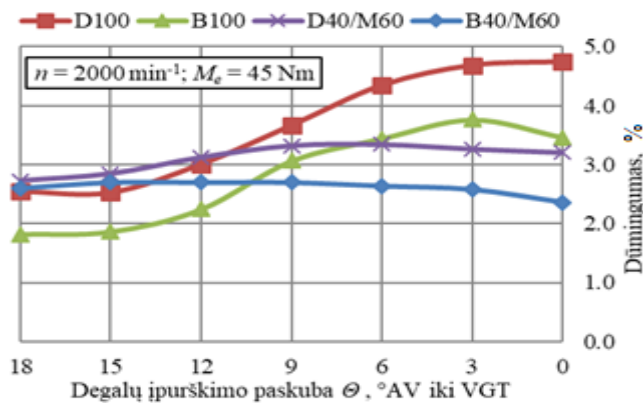


16 pav. Tiriamo variklio dūmingumas veikiant skirtingais degalų mišiniais su atjungta EGR sistema

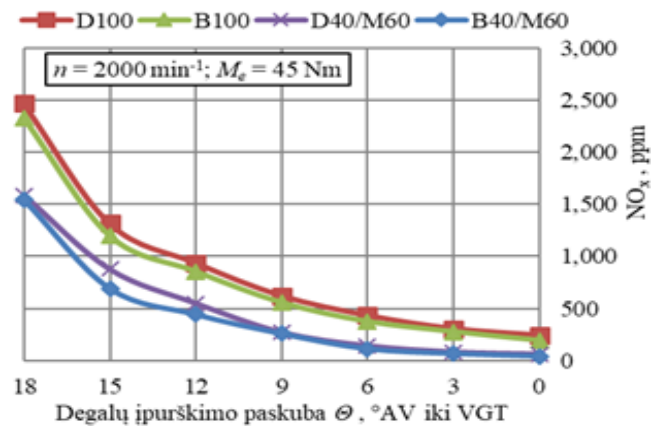
Esant nustatytam variklio apkrovos režimui ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $M_e = 45 \text{ Nm}$), degalų įpurškimo pradžios momentas turi didesnę įtaką dūmingumui varikliui veikiant gryniais degalais, negu mišiniais su gamtinėmis dujomis (degaluose esant 60 % metano) (17 pav.), nes dujos cilindre dega ilgiau ir per tą laiką spėja geriau sudegti kartu degantys dyzeliniai degalai. Dyzeliną pakeitus biodyzelinu su 60 % metano, palyginus su grynu dyzelinu, esant degalų įpurškimo paskubai 3° AV iki VGT, dūmingumas sumažėja ~51 %.

Azoto oksidų (NO_x) koncentracijos kitimo grafikas (18 pav.) rodo, kad 60 % metano priedas NO_x koncentraciją sumažina ~80 %. *NExBTL* biodyzelinas taip pat mažina NO_x koncentraciją, tik šis efektas

nėra ryškus. Ankstinant degalų įpurškimo pradžios momentą iki 9° AV iki VGT, NO_x koncentracija tame taške ne viršija variklio, veikiančio grynu dyzelinu, esant degalų įpurškimo pradžiai 3° AV iki VGT koncentracijos. Taip paankstinus degalų įpurškimo pradžią, variklio, veikiančio dyzelinu ir metanu (60 %), energetinis efektyvumas išauga ~8 % (19 pav.).

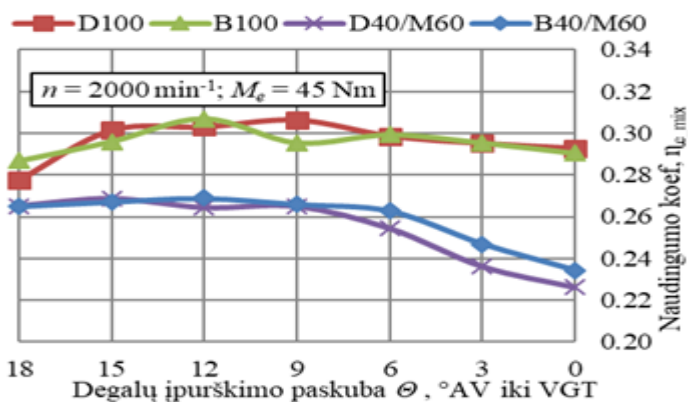


17 pav. Tiriama variklio Dūmingumas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema

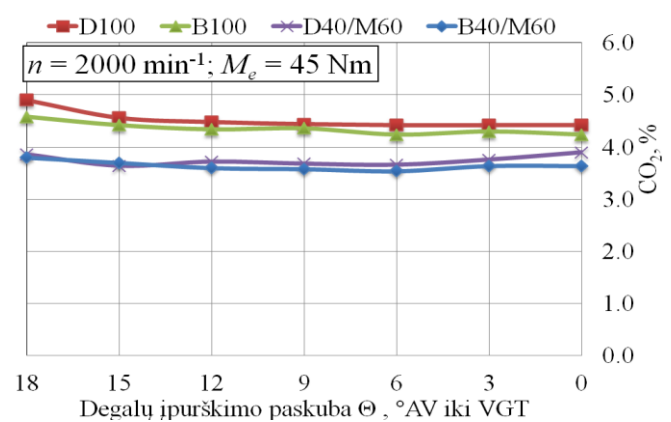


18 pav. Tiriama variklio NO_x koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema

Tyrimu nustatyta, kad variklio energetinio naudingumo parametrai blogėja didinant gamtinių dujų koncentraciją mišinyje. Variklio, veikiančio grynu dyzelinu ir biodyzelinu, degalų įpurškimo pradžios momento korekcija naudingumo koeficientui didelės įtakos neturi (19 pav.). Varikliui veikiant dvigubų degalų mišiniu, esant gamintojo numatytam degalų įpurškimo pradžios momentui (3° AV iki VGT), jo naudingumo koeficientas krenta ~20 %. Įpurškimo paankstinimas iki 9° AV iki VGT leidžia atgauti ~13 % prarasto energetinio naudingumo. Grafike matome, kad biodyzelinas su gamtinėmis dujomis turi geresnį energetinį efektyvumą, negu mineralinis dyzelinas ir dujos, tačiau paankstinus degalų įpurškimą, skirtumas sumažėja.

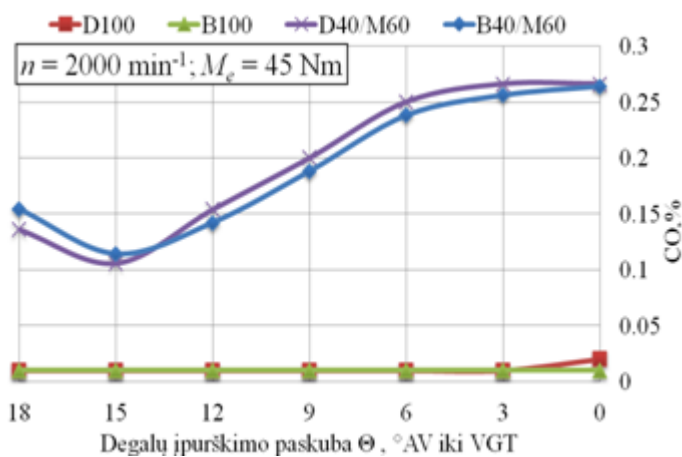


19 pav. Tiriama variklio naudingumo koeficientas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam



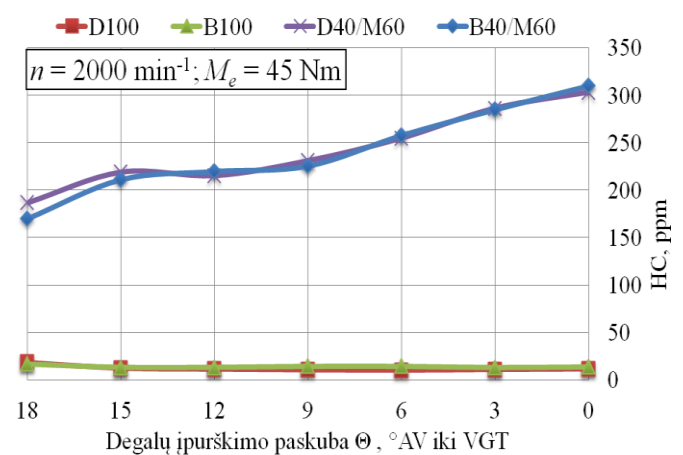
20 pav. Tiriama variklio CO₂ koncentracija išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų

CO₂ koncentracija deginiuose, varikliui veikiant biodegalais ir dujomis, yra ~15 % mažesnė palyginus su dyzelinu (20 pav.), nes ir *NExBTL* biodyzelinas ir metanas, palyginus su dyzelinu, turi mažesnę C/H santykį. Tačiau papildomai tiekiamos dujos labai padidina nepilno degimo produktų emisijas. Esant degalų įpurškimo pradžios momentui 3° AV iki VGT, CO koncentracija išauga ~27 kartus (21 pav.), nes dujos užima įsiurbiamo oro tūrį ir sumažina oro perteklių. HC koncentracija išauga ~30 kartų (22 pav.). Tai dalinai įtakoja sumažėjęs oro kiekis cilindre, tačiau didžiausią įtaką turi metano dujų patekimas į išmetamąsias dujas vožtuvų perdengimo fazės metu, įsiurbiama orą su dujomis į cilindrą pučiant turbokompresoriui. Ankstinant degalų įpurškimą, CO ir CH emisijos mažėja, nes kyla degimo temperatūra ir gerėja degimas.



21 pav. Tiriamo variklio CO koncentracija

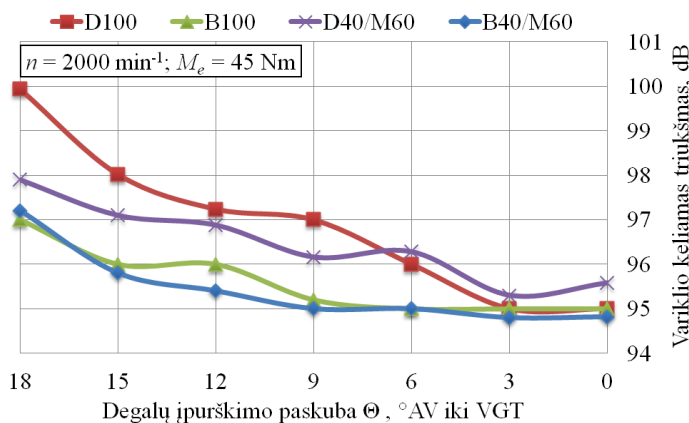
išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema



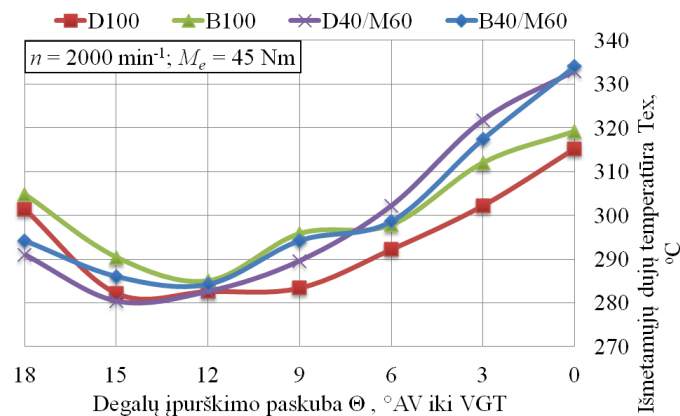
22 pav. Tiriamo variklio HC koncentracija

išmetamosiose dujose veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema

Varikliui veikiant biodegalais ir dujomis (B40/M60) yra skleidžiamas mažiausias triukšmas. Didžiausias triukšmas skleidžiamas varikliui veikiant dyzelinu (23 pav.). Tai įtakoja mažesnis *NExBTL* biodyzelino cetaninis skaičius, palyginus su dyzelinu. Tai sutrumpina *NExBTL* uždegimo gaišties fazę ir yra mažesnis šilumos išsiskyrimas ir slėgio prieaugis intensyvaus degimo pirminėje (pastovaus tūrio) fazėje (26 pav.). Metanas turi mažesnę degimo greitį ir papildomai mažina šilumos išsiskyrimą ir slėgio prieaugį cilindre bei skleidžiamą triukšmą.



23 pav. Tiriamo variklio keliamas triukšmas veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema

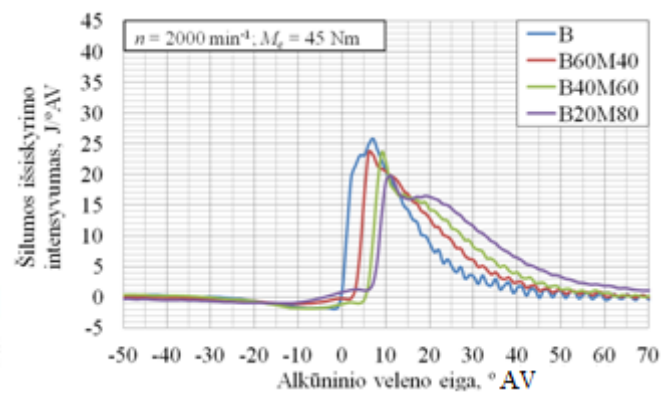
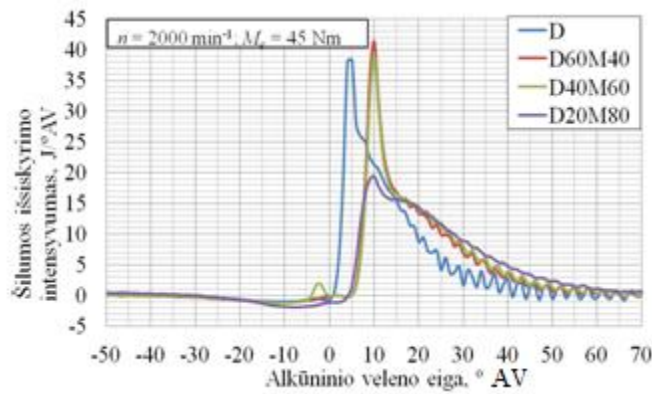


24 pav. Tiriamo variklio išmetamųjų dujų temperatūra veikiant skirtingais degalų mišiniais esant skirtingam degalų tiekimo momentui su atjungta EGR sistema

Varikliui veikiant gamintojo numatyto režimu (degalų įpurškimo pradžia 3° AV iki VGT) žemiausia išmetamųjų dujų temperatūra yra naudojant dyzeliną (24 pav.). Naudojant *NExBTL* biodyzeliną deginių temperatūra pakyla ~10°C, nes šiuo atveju intensyvesnis šilumos išsiskyrimas vyksta antroje intensyvaus degimo (pastovaus slėgio) fazėje. Varikliui veikiant B40/M60 degalų mišiniu, deginių temperatūra dar papildomai pakyla ~10°C, nes, dėl lėtesnio metano degimo, šilumos išsiskyrimas pasislenka į išmetimo pusę (26 pav.) ir temperatūra cilindre degimo pabaigoje yra aukštesnė (27 pav.).

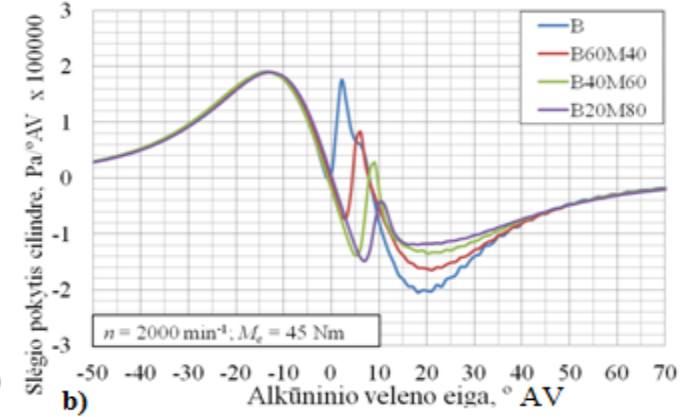
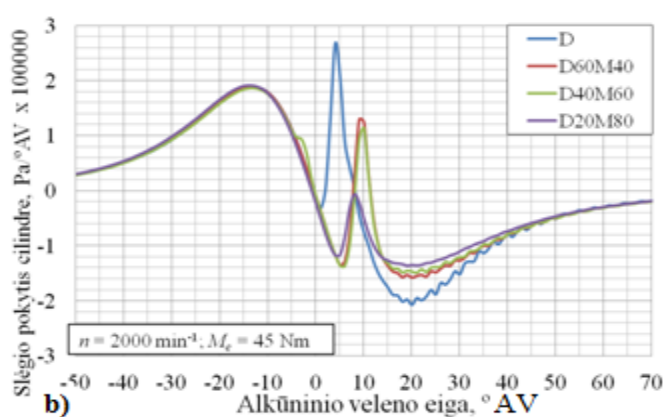
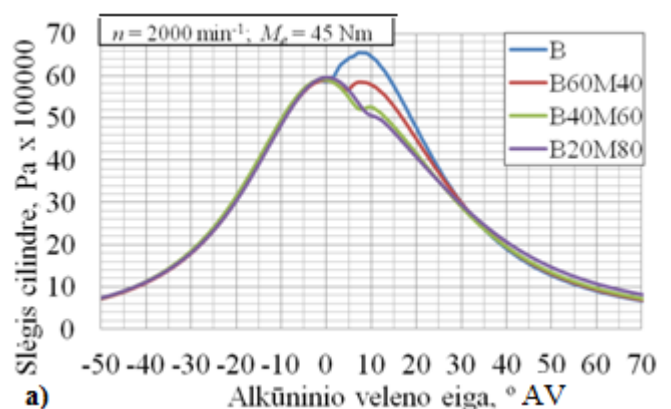
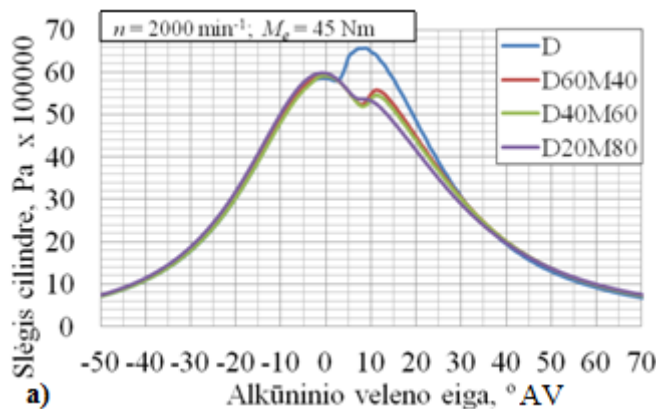
3.2. Degimo proceso skaitinio modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Dyzeliną pakeitus *NExBTL* biodyzelinu, maksimalus šilumos išsiskyrimas intensyvaus degimo pirminėje fazėje sumažėja nuo 38,5 J/°AV iki 26 J/°AV (~32 %), nes didesnis *NExBTL* cetaninis skaičius sutrumpina užsiliepsnojimo gaišties fazę. Didinant metano energijos koncentraciją degalų mišinyje, dėl lėtesnio dujų degimo šilumos išsiskyrimo pikas mažėja ir persislenka į išmetimo pusę. Degalų mišinio B20/M80 maksimalus šilumos išsiskyrimas nustatytas 20 J/°AV ir yra ~30 % mažesnis palyginus su *NExBTL* (25 pav.). Didelę įtaką degimo procesui ir šilumos išsiskyrimui turėjo ir tai, kad, didinant metano koncentraciją mišinyje (40 %, 60 % ir 80 %), variklio elektroninis valdymo blokas mažino aukšto slėgio siurblio tiekiamą degalų ciklinį kiekį ir vėlino degalų įpurškimo pradžią nuo 3° AV iki VGT iki atitinkamai 1,32° AV iki VGT, 1,30° AV iki VGT ir 0,46° AV iki VGT.



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

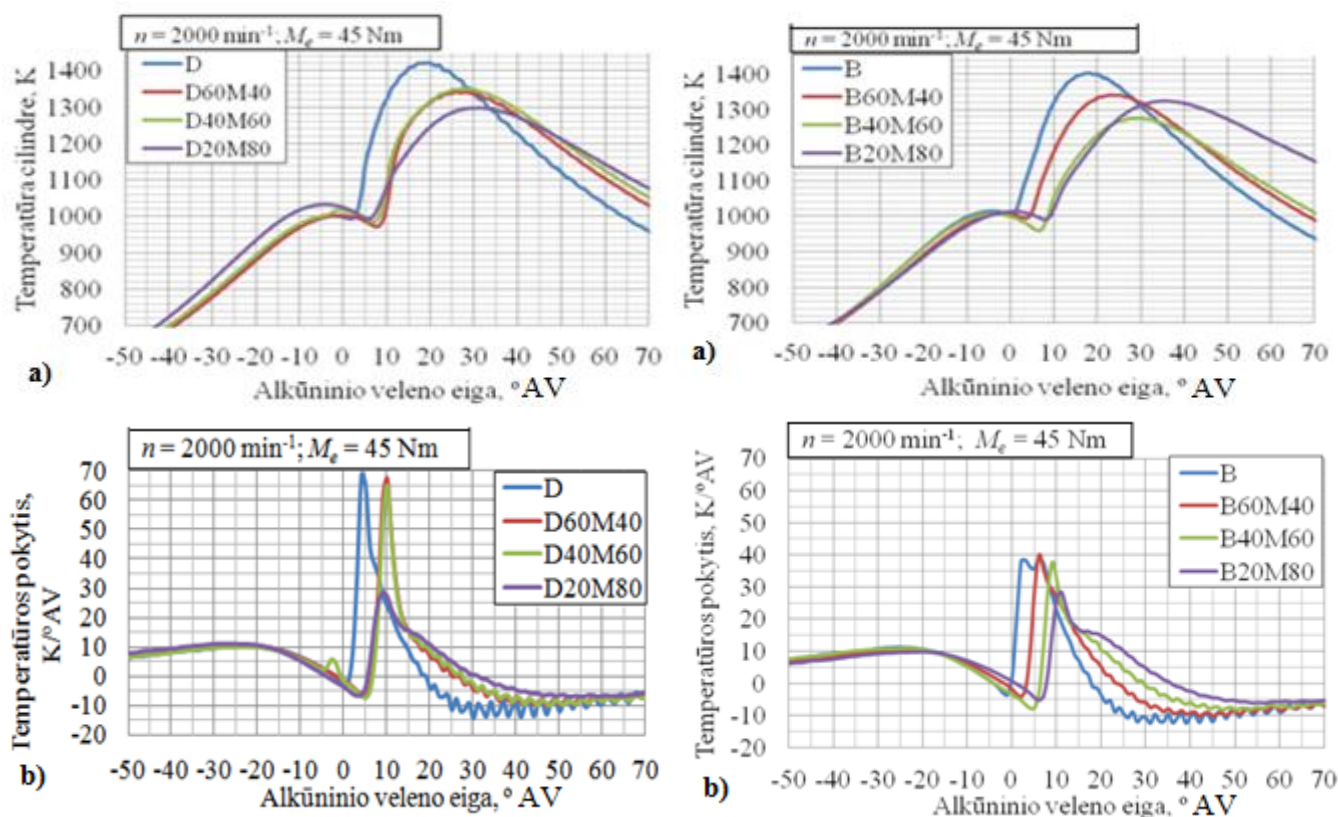
26 paveiksle pateikti slėgio cilindre ir slėgio pokyčio grafikai koreliuoja su prieš tai pateikta informacija apie šilumos išsiskyrimą. Dyzeliną pakeitus didesnio cetaninio skaičiaus *NExBTL* degalais ir didinant metano koncentraciją, dėl ko vėlinama degalų įpurškimo pradžia, slėgio prieaugis degimo metu sumažėja iki 3 kartų. Dėl užsitęsusio degimo (maksimalaus slėgio pikas vėluoja) mažėja variklio šiluminis efektyvumas (19 pav.).



26 pav. Slėgis cilindre (a) ir slėgio pokytis (b) priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema

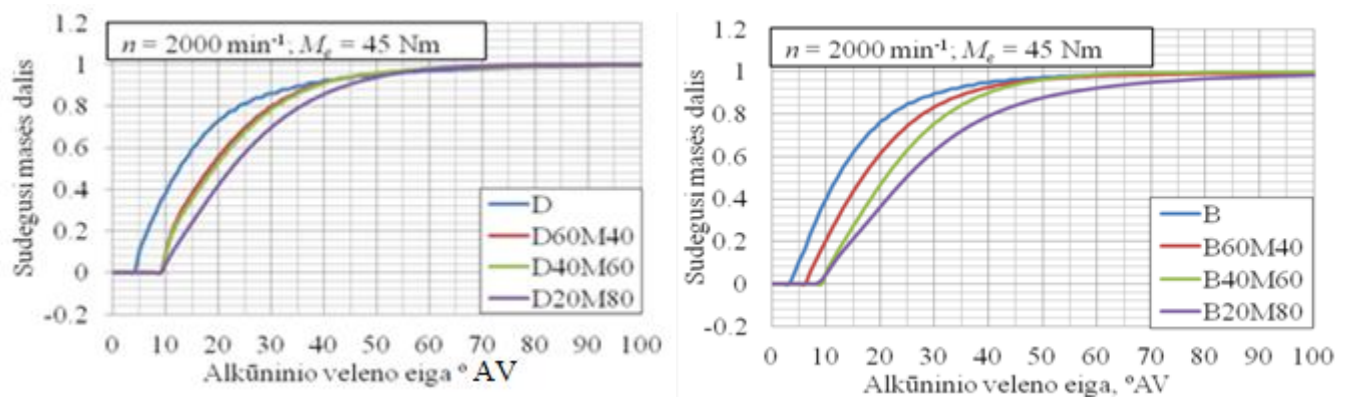
Varikliui veikiant biodyzelinu, dėl lėtesnio šilumos išsiskyrimo, palyginus su dyzelinu, maksimalus temperatūros prieaugis sumažėja nuo 70 K/°AV iki 40 K/°AV (~42 %). Degalų mišinio

B20/M80 maksimalus temperatūros prieaugis $30 \text{ K/}^\circ\text{AV}$ ir yra $\sim 25 \%$ mažesnis palyginus su *NExBTL* (27 pav.). Naudojant biodyzeliną ir metaną sumažėja ir maksimali temperatūra cilindre bei jos pikas pasislenka išmetimo pusėn. Dėl apie 100 K sumažėjusios degimo temperatūros deginiuose padidėjo CO ir HC koncentracija (21 pav. ir 22 pav.). Tačiau užsitęsęs degimas padidino deginių temperatūrą (27 pav.) bei turėjo įtakos dūmingumo sumažėjimui (17 pav.).



27 pav. Temperatūra cilindre (a) temperatūros pokytis (b) priklausomai nuo degalų mišinio sudėties su atjungta EGR sistema

Remiantis termodinaminės degimo proceso analizės, atliktos AVL BOOST programa, rezultatais, galima matyti, kad degalų degimo greitis smarkiai lėtėja, didėjant gamtinių dujų (metano) energijos koncentracijai *Dual fuel* degalų mišinyje. Teoriškai teigiama, kad, norint efektyviausiai išnaudoti degalų energiją 50 % degalų, esančių degimo kameroje, masės turi būti sudegę alkūniniam velenui esant $\sim 10^\circ \text{AV}$ už VGT. Sudegusios degalų masės dalies grafike (28 pav.) matoma, kad, varikliui veikiant be dujų priedo (degalai pradedami purkšti 3°AV iki VGT), pasiekiamas rezultatas, artimas optimaliam.



28 pav. Sudegusi degalų masės dalis priklauso nuo degalų mišinio sudėties (be EGR)

Didinant metano koncentraciją mišinyje (40 %, 60 % ir 80 %), variklio elektroninis valdymo blokas mažino aukšto slėgio siurblio tiekiamą degalų ciklinį kiekį ir vėlino degalų įpurškimo pradžią iki atitinkamai $1,32^\circ$ AV iki VGT, $1,30^\circ$ AV iki VGT ir $0,46^\circ$ AV iki VGT. Dėl šios priežasties ir dėl lėtesnio metano degimo 50 % degalų masės sudega daug vėliau: esant 60 % metano, kai yra 20 AV už VGT, esant 80 % metano, kai yra 23–25 AV už VGT. Tai leidžia daryti prielaidą, kad, paankstinus skystų degalų įpurškimo pradžios momentą, galima padidinti variklio efektyvųjį naudingumo koeficientą. Tai ir buvo patvirtinta praktinio bandymo metu (19 pav.).

IŠVADOS

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

1. Slėginio uždegimo varikliui veikiant biodyzelino – gamtinių dujų (60 % energijos) *Dual fuel* mišinių, variklio dūmingumas, lyginant su įprastiniu dyzelinu, sumažėja daugiau nei 50 %, o NO_x koncentraciją sumažėja ~80 %, nes didesnis *NExBTL* biodyzelino cetaninis skaičius ir mažesnis dujų degimo greitis sumažina šilumos išsiskyrimo intensyvumą bei pailgina degimo laiką. Dūmingumą sumažina ir mažesnis alternatyvių degalų C/H santykis.
2. Didinant gamtinių dujų dalį ir išmetamųjų dujų recirkuliaciją (EGR) degalų mišinyje pradeda trūkti oro, labai išauga deginių dūmingumas. Dėl išaugusios temperatūros cilindre prasideda nekontroliuojamas gamtinių dujų degimas.
3. Naudojant dyzeliną/biodyzeliną ir gamtines dujas (60 %) sumažėja maksimali temperatūra cilindre, bei jos pikas pasislenka į išmetimo pusę, dėl to deginiuose daug kartų padidėjo CO ir HC koncentracija bet dėl užsitęsusio degimo sumažėja dūmingumas. HC emisiją taip pat didina vykstantis darbinio mišinio prapūtimas vožtuvų perdengimo metu. Tačiau mažesnis alternatyvių degalų C/H santykis CO_2 koncentraciją sumažina ~15 %.
4. Gamtinėms dujoms sudarant 60 % *Dual fuel* energijos ir ankstinant biodyzelino įpurškimo pradžios momentą iki 9° AV prieš VGT (gamintojo numatyta 3° AV prieš VGT), galima atgauti 13 % iš 20 % dėl *Dual fuel* prarasto energetinio naudingumo, nepabloginant ekologinių rodiklių.
5. Siekiant optimaliai išnaudoti slėginio uždegimo variklį, veikiantį biodyzelino ir gamtinių dujų *Dual fuel* mišiniais, reikia optimizuoti degalų mišinio energetinę sudėtį, biodyzelino įpurškimo pradžios momentą, EGR sistemos veikimą ir kitus reguliuojamus parametrus, priklausomai nuo variklio veikimo režimo.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- AB „Klaipėdos nafta“ *Suskystintųjų gamtinių dujų terminal išorės avarinis planas*. Prieiga per internetą: https://www.ve.lt/uploads/documents/sgdt_planas_visuomenei.pdf
- Abu-Jraia, A.; Rodríguez-Fernández, J.; Tsolakisa, A.; Megaritis, A.; Theinnoia, K.; Cracknell, R.; Clark, R. 2009. Performance, combustion and emissions of a diesel engine operated with reformed EGR. Comparison of diesel and GTL fuelling. *Fuel*, 88 (6), 1031–1041.
- Aplinkos apsaugos agentūra* [Interaktyvus] [žiūrėta 2018 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://oras.gamta.lt/cms/index?rubricId=91e32574-8fa1-473e-b478-2d726cff16ed>.
- AVL BOOST v 2011.2., *AVL BOOST theory, AVL BOOST users guide*. Austria: Graz, 2011.
- Chandra, R. Vijay, V. K. Subbarao, P. M. V. Khura, T. K. 2011. Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. *Applied Energy*, 88, 3969–3977.
- Degalų kokybės įstatymas Nr. 1-348/D1–1014/3–742* [Interaktyvus] [žiūrėta 2018 m. birželio 26 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.F18F5AE4CFD5>.
- Dual fuel įrangų gamintojo tinklapis*, 2018: <http://www.elpigaz.com/pl/index/>.
- Europos Parlamento ir Tarybos direktyva dėl alternatyviųjų degalų infrastruktūros diegimo, 2013. Briuselis: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094>.
- Gill, S. S.; Tsolakis, A.; Dearn, K.; Rodríguez-Fernández, J. 2011. Combustion characteristics and emissions of Fischer–Tropsch diesel fuels in IC engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37 (4), 503–523.
- Gupta, K.; Rehman, A.; Sarviya, R. 2010. Bio-fuels for the gas turbine: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), 2946–2955.
- Harrabin, R. 2012. Kyoto rumbles on. [Interaktyvus]. BBC Environment analyst, Doha [žiūrėta 2018 m. rugsėjo 31 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.bbc.com/news/science-environment-20657109>.
- Heywood, J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- Imran, S. Emberson, D. R. Diez, A. Wen, D. S. Crookes, R. J. Korakianitis, T. 2014 Natural gas fueled compression ignition engine performance and emissions maps with diesel and RME pilot fuels. *Appl. Energy*, 124, 354–365.
- Yung, M. M.; Jablonski, W.; Magrini–Bair, K. 2009. Review of catalytic conditioning of biomass-derived syngas. *Energy Fuel*, 23(4), 1874–1887. Klaipėdos Miesto Savivaldybės
- Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997. UNFCCC.
- Korakianitis, T. Namasivayam, A. M. Crookes, R. J. 2011 Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 37 (1), 89–112.

Lietuvos energetikos institutas. *Biodujos* [žiūrėta 2018 m. spalio 10 d.]. prieiga per internetą: [http://www.lei.lt/ img/ up/File/atvir/bioenerlt/index_files/Biodujos_bros-SVVVV.pdf](http://www.lei.lt/img/up/File/atvir/bioenerlt/index_files/Biodujos_bros-SVVVV.pdf)

Lietuvos Respublikos biokuro įstatymas. 2000. Nr. VIII–1875. Vilnius.

Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M., Hao, S., 2013. Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG/diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing. *Applied Energy*, 110, 201–206.

Lounici, M. S. Loubar, K. Tarabet, L. Balistrrou, M. Niculescu, D.-C. Tazerout, M. 2014 Towards improvement of natural gas–diesel dual fuel mode: an experimental investigation on performance and exhaust emissions. *Energy*, 64, 200–211.

McTaggart-Cowan, G. Rogak, S. Hill, P. Munshi, S. Bushe, W. 2008. The effects of fuel dilution in a natural-gas direct-injection engine. *Proc. Inst. Mech. Eng. D J. Automob. Eng.*, 222 (3), 441–453.

Miliūnas, K. 2006. Biodegalų gamybos ir naudojimo pasaulyje ir Lietuvoje tendencijos. [Interaktyvus] Lietuvos žemės ūkio universitetas [žiūrėta 2018 m. Birželio 26 d.]. Prieiga per internetą: http://jaunasis-mokslininkas.asu.lt/smk_2006/vadyba/Miliunas%20Kestutis.doc.pdf.

Neste Corporation *NExBTL* review. 2014. [Interaktyvus] [žiūrėta 2018 m. spalio 7 d.]. Prieiga per internetą: https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_nexbtl.pdf.

Nigam, P.; Singh, A. 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52–68.

Papagiannakis, R. G. Hountalas, D. T. 2003 Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine. *Appl. Therm. Eng.*, 23 (3), 353–365.

Paul, A. Panua, R. S. Debroy, D. Bose, P. K. 2014. Effect of compressed natural gas dual fuel operation with diesel and Pongamia pinnata methyl ester (PPME) as pilot fuels on performance and emission characteristics of a CI (compression ignition) engine. *Energy*, 68, 495–509.

Pukalskas, S. 2000. Etilo spirito itaka dyzelinio variklio parametrams: daktaro disertacija. Vilnius: VGTU. 176 p.

Ryu, K., 2013. Effects of pilot injection pressure on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel. *Energy Conversion and Management*, 76, 506–516.

Ryu, K., 2013. Effects of pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel. *Applied Energy*, 111, 721–730.

Sunde, K.; Brekke, A.; Solberg, B. 2011. Environmental impacts and costs of woody Biomass-to-Liquid (BTL) production and use. *Forest Policy and Economics*, 13, 591–602.

Tesfa, B. Mishra, R. Zhang, C. Gu, F. Ball, A. 2013. Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel. *Energy*, 51, 101–115.

Tolerance data 2009.2. Elektroninė duomenų bazė.

UAB : „SG dujos“. Prieiga per internetą: <http://sgdujos.lt/>.

- Wei, L. Geng, P. 2016. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *Fuel Processing Technology*, 142, 264–278.
- Xu, M. Cheng, W. Li, Z. Zhang, H. An, T. Meng, Z. 2016. Pre-injection strategy for pilot diesel compression ignition natural gas engine *Applied Energy*, 179, 1185–1193.
- Žaglinskis J. 2014. Dyzelinių variklių, dirbančių antros kartos biodegalų mišiniais, eksploatacinių charakteristikų tyrimai Daktaro disertacija, Technika, Vilnius

PRIEDAI