

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mantas FELNERIS

MIKRODUMBLIŲ ALIEJUMI VEIKIANČIO
DYZELINIO VARIKLIO
CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (T 003)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2020

Disertacija rengta 2014–2020 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

dr. Laurencas RASLAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Gintautas BUREIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Nariai:

prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

dr. Nerijus PEDIŠIUS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – T 006),

prof. dr. Stasys SLAVINSKAS (Vytauto Didžiojo universitetas, transporto inžinerija – T 003),

habil. dr. Stanislaw SZWAJA (Čenstachavos technologijos universitetas, Lenkija, energetika ir termoinžinerija – T 006).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2020 m. birželio 22 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2020 m. gegužės 21 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dSPACE.vgtu.lt>, Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (H. Manto g. 84 K5, LT-92294 Klaipėda, Lietuva), Vytauto Didžiojo universiteto (K. Donelaičio g. 52-215 kab., LT-44244 Kaunas, Lietuva), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

VGTU leidyklos TECHNIKA 2020-009-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2020

© Mantas Felneris, 2020

mantas.felneris@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Mantas FELNERIS

INVESTIGATION ON THE
CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINE
RUNNING ON MICROALGAL OIL

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (T 003)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2020

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2020.

Supervisor

Dr Laurencas RASLAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Gintautas BUREIKA (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – T 003).

Members:

Prof. Dr Habil. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėda University, Transport Engineering – T 003);

Dr Nerijus PEDIŠIUS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – T 006);

Prof. Dr Stasys SLAVINSKAS (Vytautas Magnus University, Transport Engineering – T 003);

Dr Habil. Stanislaw SZWAJA (Czestochowa University of Technology, Poland, Energetics and Power Engineering – T 006).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 22 June 2020.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 21 May 2020.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt>, at the library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), at the library of Klaipėda University (H. Manto st. 84 K5, LT-92294 Klaipėda, Lithuania), at the library of Vytautas Magnus University (K. Donelaičio st. 52-215 rm., LT-44244 Kaunas, Lithuania) and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio st. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

Reziumė

Mikrodumbliai išsiskiria iš visų žinomų biomasės rūšių savo galimybe atliepti ateities iššūkius, jei vertinsim jų prieinamumą, trumpą augimo periodą, greitą prieaugį, derliaus kiekį gaunamą iš ploto vieneto, konkurencijos nebuvimą su dirbama žeme. Šios savybės leidžia dumblių biomasę laikyti tinkamiausia žaliava gaminti biodegalus ir pridėtinę vertę kuriančius antrinius produktus naudojant biologinio perdirbimo technologijas. Šio darbo autorius iškėlė problemą, kad norint atsakyti dalies iškastinių degalų naudojamų transporto sektoriuje, dalį suvartojamo dyzelino galima būtų sėkmingai pakeisti biodegalais, pagamintais iš mikrodumblių rūšies *P.moriformis*. Šis disertacinis darbas dedikuotas detaliam mikrodumblių aliejaus naudojamam transporte vertinimui, kuris apėmė mikrodumblių auginimo technologijos parinkimą, variklio degimo proceso skaitinį modeliavimą, pagamintų biodegalų fizikinių-cheminių charakteristikų nustatymą, išsamius dyzelinio variklio eksploatacinių ir aplinkosauginių charakteristikų tyrimus jam dirbant skirtingomis apkrovomis, paankstintais arba pavėlintais degalų įpurškimo kampais bei aktyviu /neaktyviu deginių recirkuliaciniu vožtuvu.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas ir priedai.

Įvadinėje dalyje suformuluota problematika, aptartas darbo aktualumas ir tyrimų tikslai. Metodika ir įvardinti uždaviniai pabrėžia ir atspindi darbo aktualumą ir jo mokslinį naujumą. Taip pat šioje dalyje supažindinama su disertacinio darbo struktūra ir autoriaus publikacijomis tyrimų tematika.

Pirmasis skyrius skaitytojui leidžia pažvelgti į Lietuvos transporto sektorių ir jo kelių dešimtmečių kelią darnaus mobilumo link, vertinant oro taršos pokyčius. Mikrodumblių potencialo biodegalų gamybą, procesų inžinerijos svarbą ir įvairių sinergijų paiešką siekiant efektyvumo. Apžvelgti mokslininkų tyrimai slėginio suspaudimo varikliuose naudojant grynus augalinius aliejus bei jų mišiniu su mineraliniu dyzelinu. Antrajame skyriuje aprašyta tyrimų metodologija, naudota įranga, eksperimentų eiga, degalų terminės analizės rezultatai ir paklaidų skaičiavimas. Trečiame skyriuje pateikti eksperimentinių tyrimų rezultatai, kurie apima: mikrodumblių aliejaus degimo proceso dyzelinio variklio cilindruose skaitinį modeliavimą, naudojant AVL BOOST programinį paketą; Laboratorinio variklio energetinių ir ekologinių rodiklių pokyčius, priklausomai nuo apkrovos charakteristikos; Reguliavimo charakteristikos paankstinant ir/arba pavėlinant degalų įpurškimą ir jo įtaka dyzelinio variklio energetiniams ir ekologiniams rodikliams; Išorinę greičio charakteristiką varikliui veikiant mikrodumblių aliejaus ir dyzelino mišiniu.

Abstract

Microalgae is outstanding among all the types of biomass sources in its ability to respond to the challenges of the future in terms of availability, high growth and production rates, yield per unit area, not competing for arable land, being most suitable optimal source for liquid biofuels and valuable co-products within biorefineries. The author of the thesis has raised the concern regarding the mass usage of fossil fuels in the transport sector by offering to replace the part of diesel fuel with a biofuel produced from microalgae specie *P.moriformis*. Accordingly, this work was dedicated to thorough analysis of microalgae oil starting with detailed economical analysis of fuel production, the combustion process simulation of the engine, followed by investigation of physico-chemical characteristics of unary and binary oxygenated fuels, and finalizing with detailed research into the exploitative and environmental characteristics of diesel engine running at different load conditions, advanced and retarded fuel injection timings, and deactivated /activated exhaust gas recirculation valve.

The dissertation consists of the introduction, three chapters, general conclusions, reference list and annexes.

The problematic was formulated, the relevance of the work and the aim of the research are discussed in the Introductory part. The research methodology and work tasks have been defined, identifying scientific novelty and significance of the work. Furthermore, the reader is introduced with the structure of dissertation and the list of publications by the author on the proposed topic.

The first chapter allows the reader to look at the Lithuanian transport sector and its transition towards sustainable mobility, assessing changes in air pollution. The potential of microalgae for biofuel production, the importance of process engineering and the search for various synergies for efficiency. Investigations on compression ignition engines made by researchers when pure vegetable oils and their blends with mineral diesel were used are reviewed. The second chapter describes the research methodology, equipment used during the research, the progress of experiments, the results of fuel thermal analysis and the calculation of errors. In the third chapter the results of experimental studies are presented, that includes: numerical modeling analysis of microalgae oil combustion process in cylinders of diesel engine; Changes in energy and ecological parameters of the laboratory engine depending on the load characteristics, The impact of advancement and /or retardation of regulating characteristics on the energy and ecological parameters of diesel engine; External speed characteristic of the engine running on a microalgae oil and its blend with diesel fuel.

Žymėjimai

Simboliai

B_d – valandinės degalų sąnaudos;

b_e – lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos;

BP – degalų virimo taško temperatūra;

B_{oro} – valandinės oro sąnaudos;

CCI_1, CCI_2, CCI_3 – apskaičiuotas Cetaninis indeksas, taikant tris skirtingus metodus;

c_l – savitoji šiluminė talpa;

D – variklio cilindro skersmuo;

E_e – efektyviosios energijos sąnaudos;

h – entalpija;

H_L – žemutinis šilumingumas;

$m_{d,c}$ – degalų ciklinė porcija;

M_e – variklio efektyvusis sukimo momentas;

M_{max} – variklio didžiausias sukimo momentas;

n – variklio sukimosi dažnis;

p_c – slėgis cilindre;

p_{cv} – slėgio cilindre kitimo greitis;
 p_e – vidutinis efektyvusis slėgis;
 P_e – variklio efektyvioji galia;
 p_k – turbokompresoriuje sukuriamas slėgis;
 P_{max} – variklio didžiausia galia;
 Q – degimo proceso metu išsiskyręs šilumos kiekis;
 Q_{cv} – šilumos išsiskyrimo greitis cilindre;
 S – standartinis vidurkio nuokrypis;
 S_V – variklio stūmoklio eiga;
 T_{10} – 10 % distiliacijos temperatūra, nustatyta remiantis ASTM D86 metodu;
 T_{10N} – perskaičiuota 10 % distiliacijos temperatūra;
 T_{50} – 50 % distiliacijos temperatūra, nustatyta remiantis ASTM D86 metodu;
 T_{50N} – perskaičiuota 50 % distiliacijos temperatūra;
 T_{90} – 90 % distiliacijos temperatūra, nustatyta remiantis ASTM D86 metodu;
 T_{90N} – perskaičiuota 90 % distiliacijos temperatūra;
 T_{iTL} – degalų užsiliepsnojimo temperatūra, nustatyta pagal dviejų liestinių metodą;
 T_{iA} – degalų užsiliepsnojimo temperatūra, nustatyta pagal Versan metodą;
 t – laikas;
 T_c – temperatūra cilindre;
 T_{cv} – temperatūros cilindre kitimo greitis;
 T_{id} – išmetamųjų dujų temperatūra;
 x – galutinis matavimo rezultatas;
 X_g – grubių klaidų dydis;
 x_{max} – didžiausia matavimų aibės reikšmė;
 z – ieškomas netiesioginių matavimų dydis;
 V_H – variklio darbinis tūris;
 $\Delta x_{a,P}$ – atskaitymo neapibrėžtis pasikliovimo tikimybei;
 Δx_i – absoliučioji paklaida;
 $\Delta x_{n,P}$ – neapibrėžties atsitiktinės paklaidos sandas;
 $\Delta x_{p,P}$ – prietaiso sistemingoji neapibrėžtis;
 Δx_{rib} – atsitiktinės didžiausios paklaidos vertės;
 $\Delta x_{s,P}$ – tiesioginių matavimų suminė neapibrėžtis;
 $\Delta z_{s,P}$ – dydžio z paklaidos absoliučioji vertė žinant matuojamų dydžių paklaidas.
 Δz – dydžio z paklaidos absoliučioji vertė;
 δ_r – prietaiso santykinė redukuotoji paklaida;

ε – variklio suslėgimo laipsnis;
 ε_x – santykinė paklaida;
 ε_z – netiesioginių matavimų santykinė paklaida;
 η_e – variklio efektyvusis naudingumo koeficientas;
 φ – alkūninio veleno paskubos kampas;
 φ_c – degimo trukmė;
 φ_{ip} – alkūninio veleno paskubos kampas prie kurio pradedamas degalų įpurškimas;
 φ_0 – degimo pradžia;
 ρ – degalų tankis esant 15 °C;
 ρN – koeficientas degalų tankio perskaičiavimui;
 τ – variklio taktų skaičius.

Santrumpos

ART – apatinis rimties taškas;
AV – alkūninis velenas;
AVL BOOST – vidaus degimo variklio modeliavimo programinė įranga;
CH – angliavandeniliai;
CI – cetaninis indeksas;
CO – anglies viendeginis;
CO₂ – anglies dvideginis;
CS – cetaninis skaičius;
D100 – 100 % dyzelinas (be biodegalų priedo);
DRV – dujų recirkuliacijos vožtuvas;
DSC – diferencinė skenavimo kalorimetrija;
DTG – diferencinė termogravimetrija;
KD, KD_{2,5}, KD₁₀ – kietosios dalelės ir jų dydis;
MTEP – moksliniai tyrimai ir eksperimentinė plėtra;
N – azotas;
NH₃ – amoniakas;
NMLOJ – ne metaniniai lakieji organiniai junginiai;
NO_x – suminiai azoto oksidai;
PMA30/D70 – degalų mišinys, susidedantis iš 30 % mikrodumplių aliejaus ir 70 % dyzelino (pagal tūrį);
PMA70/D30 – degalų mišinys, susidedantis iš 70 % mikrodumplių aliejaus ir 30 % dyzelino (pagal tūrį);
PMA100 – 100 % mikrodumplių mikrodumplių aliejus;

PMA30/PMME70 – degalų mišinys, susidedantis iš 30 % mikrodumblių aliejaus ir 70 % mikrodumblių biodyzelino (pagal tūrį);

PMA70/PMME30 – degalų mišinys, susidedantis iš 70 % mikrodumblių aliejaus ir 30 % mikrodumblių biodyzelino (pagal tūrį);

PMME100 – 100 % mikrodumblių aliejaus riebalų rūgščių metilesteris;

PMME30/D70 – degalų mišinys, susidedantis iš 30 % mikrodumblių biodyzelino ir 70 % dyzelino (pagal tūrį);

PMME70/D30 – degalų mišinys, susidedantis iš 70 % mikrodumblių biodyzelino ir 30 % dyzelino (pagal tūrį);

REE – rapsų etilo esteris;

RME – rapsų metilo esteris;

RRME – riebalų rūgščių metilo esteris;

SDMD – sudegusi degalų masės dalis;

SND – suskystintos naftos dujos;

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;

TDI – turbokompresorinis tiesioginio įpurškimo dyzelinis variklis;

TG – termogravimetrija;

TGA – termogravimetrinė analizė;

VRT – viršutinis rimties taškas;

TSP – suspenduotos kietosios dalelės;

VDV – vidaus degimo variklis.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	7
1. MIKRODUMBLIŲ ALIEJAUS PANAUDOJIMO TRANSPORTO MAŠINŲ JĖGAINĖSE GALIMYBIŲ ANALIZĖ.....	9
1.1. Lietuvos sausumos transporto sektoriaus parko, energetinių ir aplinkosauginių rodiklių analizė	10
1.1.1. Kelių ir bekelės transporto taršos lygis	10
1.1.2. Oro ir vandens transporto problematika.....	14
1.2. Moksliniai tyrimų apžvalga, susijusių su mikrodumplių panaudojimu biodegalų gamybai ir transportui.....	15

1.2.1. Europos Sąjungos finansuotų projektinių veiklų, susijusių su mikrodumблиų panaudojimu, apžvalga.....	16
1.2.2. Mikrodumблиų panaudojimo biodegalų gamyboje tyrimai Lietuvoje.....	20
1.3. Atsinaujinantys energijos šaltiniai ir perspektyva iš ateities biožaliavų.....	23
1.3.1. Mikrodumблиų auginimo technologijų analizė	25
1.3.2. Lietuvos ir Čilės patirtis.....	26
1.4. Augalinių aliejų naudojimo ir poveikio vidaus degimo varikliams analizė.....	28
1.4.1. Vieno ir dviejų bakų sistemų pritaikymas varikliui veikiant grynu augaliniu aliejumi	31
1.4.2. Eksperimentinių tyrimų analizė dyzeliniam varikliui dirbant aliejumi ..	33
1.4.3. Aliejų ir jų mišinių su dyzelinu panaudojimas vidaus degimo varikliuose.....	39
1.4.4. Aliejų fizikinių-cheminių savybių gerinimui skirti priedai.....	44
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	46
2. <u>EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODOLOGIJA IR DEGALŲ TERMINĖS ANALIZĖS REZULTATAI.....</u>	49
2.1. Tyrimams naudoti degalai ir jų paruošimas	49
2.2. Degalų fizikinių-cheminių charakteristikų nustatymas	51
2.3. Termogravimetrinės analizės ir diferencinės skenavimo kalorimetrijos eksperimentų planavimas.....	52
2.3.1. Degalų virimo ir užsiliepsnojimo temperatūrų nustatymas.....	53
2.3.2. Cetaninio indekso nustatymas.....	54
2.4. Degalų ir jų mišinių terminės analizės rezultatai.....	56
2.4.1. Degalų virimo taškų temperatūrų analizė.....	56
2.4.2. Degalų užsiliepsnojimo temperatūrų analizės rezultatai	62
2.4.3. Cetaninio indekso apskaičiavimas	67
2.5. Vidaus degimo variklio eksploatacinių charakteristikų tyrimo metodologija ...	71
2.5.1. Eksperimentinės įrangos aprašymas ir matavimo tikslumas	72
2.5.2. Vidaus degimo variklio bandymų atlikimo metodika	76
2.5.3. Variklio eksploatacinių charakteristikų skaičiavimas	78
2.6. Skaitinis degimo proceso modelio taikymas varikliui 1Z veikiant mikrodumблиų aliejumi ir jo mišiniais	79
2.7. Paklaidų analizė.....	79
2.8. Antrojo skyriaus išvados	82
3. <u>TEORINIŲ IR EKSPERIMENTINIŲ VARIKLIO BANDYMŲ REZULTATAI... 85</u>	85
3.1. Skaitinė degimo proceso analizė varikliui veikiant mikrodumблиų aliejumi ir jo mišiniais.....	85
3.2. Variklio veikiančio <i>P.moriformis</i> aliejumi ir jo mišiniais energetinių rodiklių tyrimas	89
3.2.1. Valandinės ir lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos.....	89
3.2.2. Variklio efektyvusis naudingumo koeficientas	92
3.3. Kitos variklio parametrų charakteristikos, jam veikiant mikrodumблиų aliejumi ir jo mišiniais	95

3.3.1. Oro masės srautas	95
3.3.2. Turbokompresoriaus sukuriamas slėgis	97
3.3.3. Išmetamų deginių temperatūra	99
3.3.4. Oro pertekliaus koeficientas.....	102
3.3.5. Deguonies kiekis išmetamosiose dujose	104
3.3.6. Slėgio cilindre pokytis	105
3.4. Ekologinių VDV rodiklių tyrimas varikliui veikiant mikrodumblių aliejumi ir jo mišiniais su dyzelinu	107
3.4.1. Dūmingumas.....	107
3.4.2. Azoto oksidų emisija.....	110
3.4.3. Angliavandenilių emisijų koncentracija deginiuose.....	112
3.4.4. Anglies dvideginių koncentracija išmetamosiose dujose	114
3.4.5. Vidaus degimo variklio skleidžiamas triukšmas	116
3.5. Dinaminių variklio rodiklių nustatymas varikliui veikiant mikrodumblių aliejumi	117
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	119
 BENDROSIOS IŠVADOS	 121
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	123
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	135
SUMMARY IN ENGLISH.....	137
 ¹ PRIEDAI	 153
A priedas. Tyrimams naudotų degalų sudėtis.....	154
B priedas. Techninės ir ekonominės prielaidos rentabiliam <i>P.moriformis</i> biomasės auginimui ir perdirbimui.....	157
C priedas. Cetaninio indekso skaičiavimo rezultatai	162
D priedas. Bendradarbiavimas su Federico Santa Maria technikos universiteto profesoriais tolimesniam biodegalų iš mikrodumblių tematikos plėtojimui Čilės Respublikoje	163
E priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	164
F priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	165
G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	172

¹Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the Problem	1
Relevance of the Thesis	2
Object of Research	3
The Aim of the Thesis	3
Research Methodology	3
The Tasks of the Thesis	4
Scientific Novelty	4
Practical Value of the Research Findings	5
The Defendend Statements	5
Approval of the Research Findings	6
Structure of the Thesis	7
1. FEASIBILITY ANALYSIS OF MICROALGAE OIL APPLICATION IN TRANSPORT ENGINES	9
1.1. Energy and Environmental Parameters Analysis of Lithuanian Land Transport Sector	10
1.1.1. Level of Pollution of Road and Off-road Transport	10
1.1.2. Problems of Air and Water Transport	14
1.2. Scientific Review of the Use of Microalgae for Biofuel Production and Transport	15

1.2.1. Overview of European Union funded Project Activities on the Use of Microalgae	16
1.2.2. Research on the Use of Microalgae in Biofuel Production in Lithuania	20
1.3. Prospects for Renewable Energy Production from Future Bio Raw Materials .	23
1.3.1. Analysis of Microalgae Cultivation Technologies	25
1.3.2. Experience of Lithuania and Chile	26
1.4. Analysis of the Use of Vegetable Oils and Their Effects on Internal Combustion Engines	28
1.4.1. Adaptation of Single and Dual Tank Systems for Engine Running on Pure Vegetable Oil	31
1.4.2. Analysis of Experimental Research of Diesel Engine Operation on Oil	33
1.4.3. Oils and Their Blends with Diesel Application in Internal Combustion Engines	39
1.4.4. Additives for Improving the Physico-Chemical Properties of Oils	44
1.5. Conclusions of Chapter One and Formulation of the Thesis Tasks.....	46
2. METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND RESULTS OF FUEL THERMAL ANALYSIS	49
2.1. Fuel and Blends Used for Research and Their Preparation	49
2.2. Determination of Physico-chemical Characteristics of Fuels	51
2.3. Planning Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimetry Experiments	52
2.3.1. Determination of Boiling Point and Ignition Temperatures	53
2.3.2. Determination of Cetane Index	54
2.4. Results of Thermal Analysis of Fuel and Its Blends	56
2.4.1. Analysis of Boiling Points Temperatures.....	56
2.4.2. Analysis of Fuel Ignition Temperatures.....	62
2.4.3. Calculation of the Cetane Index.....	67
2.5. Study Methodology of Internal Combustion Engine Performance.....	71
2.5.1. Description of Experimental Equipment and Accuracy of Measurement.....	72
2.5.2. Methodology for Conducting Internal Combustion Engine Tests	76
2.5.3. Calculation of Engine Performance	78
2.6. Numerical Modeling of Combustion Process Application on 1Z Engine Running on Microalgae Oil and Its Blends	79
2.7. Error Analysis	79
2.8. Conclusions of Chapter Two	82
3. THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ENGINE TEST RESULTS	85
3.1. Numerical Analysis of Combustion Process on Engine Running on Microalgae Oil and Its Blends	85
3.2. Investigation of Engine Energy Parameters Running on <i>P.moriformis</i> Oil and Its Blends.....	89
3.2.1. Hourly and Brake-Specific Fuel Consumptions.....	89
3.2.2. Net Efficiency of the Engine.....	92

3.3. Investigation of Other Engine Characteristics When Running on Microalgae Oil and Blends	95
3.3.1. Air Mass Flow Rate	95
3.3.2. Turbocharged Pressure.....	97
3.3.3. Temperature of Exhaust Gases	99
3.3.4. The Excess Air Ratio	102
3.3.5. The Amount of Oxygen in the Exhaust Gas	104
3.3.6. The Change in Cylinder Pressure.....	105
3.4. Investigation of Environmental Parameters of Internal Combustion Engine Running on Microalgae Oil and Its Blends With Diesel.....	107
3.4.1. Smoke Absorption Coefficient.....	107
3.4.2. Emission of Nitrogen Oxides	110
3.4.3. Concentration of Hydrocarbon Emissions in the Exhaust Gas	112
3.4.4. Concentration of Carbon Dioxide in the Exhaust Gas.	114
3.4.5. Noise Generated in the Internal Combustion Engine.	116
3.5. Determination of Engine Dynamic Characteristics Running on Microalgae Oil	117
3.6. Conclusions of Chapter Three	119
GENERAL CONCLUSIONS	121
REFERENCES	123
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	135
SUMMARY IN ENGLISH	137
ANNEXES ²	153
Annex A. Composition of Fuels Used for the Tests	154
Annex B. Technical and Economic Preconditions for the Cost – Effective Cultivation and Processing of <i>P.moriformis</i> Biomass	157
Annex C Calculation of the Cetane Index	162
Annex D. Collaboration with Professors at Federico Santa Maria Technical University for Further Development of Microalgae Biofuels in the Republic of Chile	163
Annex E. Author's Declaration of Academic Integrity.....	164
Annex F. Co-authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation.....	165
Annex G. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	172

²The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

2009 metais mokslininkai iš viso pasaulio, atliekantys tyrimus klimato kaitos klausimais vieningai nutarė, kad žmogaus veikla daro reikšmingą įtaką vykstančiam globaliniam atšilimui (ScienceDaily 2009). Pagrindiniai atmosferos taršos šaltiniai yra pramonė, transportas, žemės ir namų ūkiai bei iš natūralių gamtos šaltinių išsiskirianti tarša (Rubin *et al.* 2004). Alternatyvių energijos šaltinių paieška, užtikrinsianti darnią plėtrą bei perėjimą prie 100 % atsinaujinančių energijos žaliavų naudojimo yra iššūkis ir energetikos, ir transporto sektoriams (Juil *et al.* 2012).

Reikia pabrėžti, kad transportas užima labai svarbią vietą socioekonominėje daugiau kaip 195 pasaulio valstybių raidoje (Bureau of Intelligence and Research 2012). Ne išimtis yra ir Lietuva (Lietuvos statistikos metraštis 2018). Priklausomai nuo gamybos technologijos motorinio transporto sektoriuje naudojami biodegalai skirstomi į pirmos, antros, trečios ir ketvirtos kartos. Tiek Lietuvoje, tiek Europos Sąjungoje yra neblogai ištyrinėtos pirmosios ir antrosios kartos biodegalų fizikinės-cheminės charakteristikos, išnagrinėtos taikymo vidaus degimo variklyje galimybės, iki komercinio lygio išvystytos gamybos technologijos, nesunkiai apskaičiuojamas ir prognozuojamas šių produktų metinis gamybos potencialas, bet kurioje šalyje. Trečiosios kartos biodegalai, arba biodegalai gauti

perdirbant dumblių biomasę šiuo metu kelia didelį mokslinės bendruomenės susidomėjimą ir yra laikomi perspektyvia žaliava švariai energijai gaminti. Tarp galimų būdų kaip sumažinti vidaus degimo variklio daromą neigiamą poveikį aplinkai neabejotinai išlieka naujos kartos biodegalų iš dumblių biomasės naudojimas, ypač tose srityse, kur alternatyvūs sprendimai nėra technologiškai toli pažengę – aviacija, laivyba ir t. t. Tam pasiekti būtini ne tik išsamūs vidaus degimo variklių eksperimentiniai tyrimai, bet ir technologinių bei ekonominių priemonių identifikavimas. Užtikrinus priemonių paketą, apimančią mikrodumblių gamybos rentabilumo pagrindimą bei poveikį vidaus degimo variklio dinaminėms ir aplinkosauuginėms charakteristikoms, būtų galima argumentuotai kalbėti apie šių degalų atsiradimą rinkoje. Nagrinėjamos problemos sprendimui pasirinkta trečios kartos heterotrofinė mikrodumblių rūšis *P.moriformis*, kurios privalumas prieš kitas pramonines dumblių rūšis – galimybė energetiniame balanse taupyti didelius elektros energijos kiekius, atsisakant įprasto kitiems dumbliams dienos-nakties auginimo režimo. Radus atsakymus į mokslinius klausimus, atsirastų sėkmingos prielaidos iš mikrodumblių biomasės šalyje gaminti biodegalus ir naudoti juos transporto sektoriuje.

Darbo aktualumas

Darbo aktualumas šalies ir pasaulio mastu matomas per spręstinas problemas:

1. Šiai dienai Lietuvoje prie atmosferos taršos didžiausia dalimi prisideda transporto sektorius ir sudaro trečdalį visos ŠESD taršos šalyje. Lyginant žemės ūkio, energetikos ir transporto sektorių išmetamas ŠESD emisijas, transporto sektorius yra pats problematiškiausias, kurio tarša nuo 2005 metų (18,0 %) iki 2018 (30,2 %) padidėjo 12,2 %.
2. Per pastaruosius dešimt metų tik trims pasaulio regionams pavyko sumažinti CO₂ emisijas (–16 % ES, –8 % JAV, –1 % Japonija). Kitose šalyse anglies dvideginio augimas kilo drastiškai (+44 % Kinija, +76 % Indija, +51 % Saudo Arabija, +42 % Indonezija ir t. t.). CO₂ mažėjimas galimas tik radikalių pokyčių metu – ekologiškas transportas, energijos išteklių efektyvumą didinančios technologijos ir t. t. 2019 metais Madride vykusioje JT klimato kaitos konferencijoje COP 25, šalims nepavyko susitarti dėl bendros CO₂ pasaulinės rinkos, kas skatina toliau ieškoti racionalų ir daugumai šalių priimtinių sprendimų kaip mažinti klimato kaitą, įskaitant transporto emisijų mažinimą.

3. Mikrodumblių biomasės pagrindu gaminami degalai transportui yra laikomi perspektyviausia energetine žaliava pasaulyje ateities iššūkiams spręsti, tačiau tokio tipo degalų savybės ir panaudojimo galimybės vidaus degimo varikliuose yra menkai ištirtos.
4. Lietuvoje iki šiol nebuvo vertinta mikrodumblių aliejaus daroma įtaka vidaus degimo variklio eksploatacinėms charakteristikoms ir galimybės auginti mikrodumblių biomasę biodegalų gamybai.

Pasaulinė biodegalų pagamintų iš dumblių biomasės rinka skirta transporto ir aviacijos sektoriams 2017 metais sudarė 4,1 mlrd. Eur. ir, tikėtina, kad iki 2024 m. augs po 8,6 % kasmet iki 8,7 mlrd. Eur. 2017 metais Europos šalys pirmavo pasauliniu mastu biodegalų iš dumblių biomasės gamybos srityje (Zion market research 2018). Kol aktyviai yra vystomos naujos gamybos technologijos, mikrodumblių aliejaus naudojimo dyzeliniuose varikliuose tyrimai sprendžiant mokslinius-techninius neapibrėžtumus kol kas yra pirminėje stadijoje bei kelia daug iššūkių. Vienas jų – ES siekis iki 2050 metų tapti pirmuoju neutralaus poveikio klimatui žemynu.

Tyrimų objektas

Gryno mikrodumblių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu fizikinės cheminės savybės, energetinės ir ekologinės charakteristikos bei degimo procesai dyzelinio variklio cilindruose.

Darbo tikslas

Moksliniais tyrimais pagrįsti mikrodumblių biomasės degalų panaudojimo vidaus degimo varikliuose energetinį ir ekologinį efektyvumą.

Darbo uždaviniai

Išsikeltam darbo tikslui pasiekti numatomi spręsti šie uždaviniai:

1. Tiriamoms degalų rūšims eksperimentiškai ištirti ir charakterizuoti energijos virsmus, fazinius pokyčius ir terminį irimą degimo ir pirolizės procesų metu nustatyti šias charakteristikas: virimo tašką, užsiliepsnojimo temperatūrą, terminį stabilumą, apskaičiuotąjį Cetaninį indeksą ir riebalų rūgščių sudėtį.

2. Remiantis gautais laboratoriniais tyrimų rezultatais atlikta mikrodumblių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu šilumos išsiskyrimo cilindre palyginamoji analizė, naudojant AVL BOOST programinį paketą.
3. Eksperimentiškai ištirti mikrodumblių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu įtaką slėginio uždegimo variklio apkrovos charakteristikai esant aktyviam ir neaktyviam išmetamųjų deginių recirkuliaciniam vožtuvui, reguliavimo charakteristikai esant skirtingam degalų įpurškimo paskubos kampui ir greituminei charakteristikai.
4. Remiantis gautais eksperimentinių tyrimų rezultatais pasiūlyti geriausias reguliavimo charakteristikas nemodifikuoto VDV veikimui žemos apkrovos režime su mikrodumblių aliejumi ir jo mišiniais su mineraliniu dyzelinu.

Tyrimų metodika

Degalų fizikinės-cheminės charakteristikos nustatytos KTU naudojant mokslinę standartizuotą įrangą, o viršutinio ir žemutinio šilumingumo tyrimai pagal DIN 51900 standartą, atliekant kalorimetrinę analizę. Mikrodumblių aliejaus riebalų rūgščių sudėtis analizuota pagal LST EN ISO 5508 ir LST EN ISO 12966-2 standartų metodikas, rūgščių skaičius nustatytas taikant LST EN 14104 standartą. Tiriamų degalų rūšių terminė analizė atlikta taikant standartą LST EN ISO 11358-2 bei naudojant Lietuvos energetikos instituto laboratorinę įrangą („Santakos“ slėnio infrastruktūros dalis). Atlikti šie pasirinktos modifikacijos dyzelio tyrimai: skaitinė matematinė biodegalų degimo cilindre analizė, naudojant AVL BOOST programinį paketą; apkrovos ir reguliavimo charakteristikų nustatymas naudojant VGTU stendinę laboratorinę įrangą (variklio apkrovos stendą, slėgio cilindre ir išmetamųjų dujų temperatūros jutiklius, išmetamųjų dujų analizatorių, degalų sąnaudų matuoklį, deginių recirkuliacinį vožtuvą ir kt.) bei tyrimų metodiką; greituminės variklio charakteristikos nustatymas naudojant Vilniaus technologijos ir dizaino kolegijos automobilyje sumontuotą dyzelinį variklį.

Darbo mokslinis naujumas

Šio disertacinio darbo indėlis į transporto inžinerijos mokslo krypties plėtrą:

1. Eksperimentiniais mikrodumblių *Prototheca moriformis* aliejaus bandymais atskleistas šių biodegalų poveikis slėginio uždegimo variklio energetinėms ir ekologinėms charakteristikoms. Imant 2000–2017

metų periodą, tik iš *Chlorella protothecoides*, *Tetraselmis suecica* ir *Botryococcus braunii* mikrodumblių pagaminti aliejai iki šiol buvo panaudoti dyzelinių variklių charakteristikų nustatymui.

2. Atliktas kompleksinis tyrimas leido ištirti vidaus degimo variklio apkrovos, reguliavimo ir greitumines charakteristikas su grynu mikrodumblių aliejumi nekeičiant degalų purkštukų ir neperreguliuojant degalų siurblio darbo.
3. Taikant diferencinės skanavimo kalorimetrijos ir termogravimetrijos analizės metodus nustatyti *P.moriformis* aliejaus ir biodyzelino energijos virsmai, faziniai pokyčiai ir terminiai irimo procesai.
4. Taikant AVL BOOST programinį paketą atlikta mikrodumblių aliejaus degimo proceso cilindruose skaitinė matematinė analizė.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Eksperimentinių tyrimų ir skaitinės matematinės analizės metu gautų rezultatų pagrindu nustatytas efektyvus degalų įpurškimo paskubos kampo intervalas variklio darbui su *P.moriformis* biodegalais mažos apkrovos režime leidžiantis sėkmingai jį eksploatuoti be didesnių modifikacijų, nekeičiant pagrindinių gamyklinių parametų.
2. *P.moriformis* aliejus ir jo mišiniai su mineraliniu dyzelinu gali būti naudojami dyzelinėse transporto priemonėse bei pakeisti dalį iškastinių degalų bendrame transporto sektoriaus energetiniame balanse. Šiame disertaciniame darbe atlikti moksliniai tyrimai gali būti sėkmingai panaudoti tolimesniems *P.moriformis* aliejaus ir biodyzelino diegimo bei taikymo vidaus degimo varikliuose tyrimams vykdyti.
3. Taikant terminės analizės tyrimus nustatyta mikrodumblių aliejaus ir iš jo išgauto biodyzelino virimo ir užsiliepsnojimo temperatūra bei Cetaninis indeksas. Šiuos rezultatus galima pritaikyti tolimesniems mikrodumblių aliejaus tyrimams vykdyti.

Ginamieji teiginiai

1. Pritaikius terminės analizės metodą nustatyti geresni mikrodumblių aliejaus terminio stabilumo rezultatai negu dyzelino, kuriems įtakos turėjo aliejaus sudėtyje esantis didelis oleino rūgšties kiekis.

2. Degalų užsiliepsnojimo charakteristikos nustatymas remiantis nauju 2016 metais patentuotu metodu leidžia pakankamai tiksliai apskaičiuoti mikrodumblių aliejaus Cetaninį indeksą jį išreiškiant kaip tankio ir termogravimetrinio indekso funkciją, kuris yra artimas moksliniuose žurnaluose publikuotiems analogiškiems degalų parametrams.
3. Į cilindrą įpurkštas mikrodumblių aliejus pasižymi panašia indukcijos periodo trukme kaip ir dyzelinas.
4. Mikrodumblių aliejus ir jo mišiniai su dyzelinu pagerina slėginio uždegimo variklio efektyvumą naudingumo koeficientą lyginant su mineraliniu dyzelinu.
5. Mikrodumblių aliejus leidžia efektyviai pagerinti slėginio uždegimo variklio ekologinius parametrus: ženkliai sumažinti dūmingumą, kai NO_x koncentracija deginiuose mažai pakinta lyginant su dyzelinu.
6. Pasiūlyta mikrodumblių aliejaus rūšis gali dalinai ar visiškai pakeisti dyzeliną, o jo auginimas ir perdirbimas į degalus – perspektyvus Lietuvos energetikos ir transporto sektoriams.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema publikuoti 7 moksliniai straipsniai: 3 – *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį; 2 – kitų tarptautinių bazių leidiniuose; 1 – kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose; 1 – recenzuojamos knygos skyriuje.

Disertacijos tema atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose tarptautinėse mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 9-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje *Transbaltica* 2015 m. Vilnius, Lietuva;
- 20-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje *Transport Means* 2016 m. Kaunas, Lietuva;
- 8-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje *Algal Biomass, Biofuel and Bioproducts* 2018 m. Sietlas, JAV;
- 9-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje *Algal Biomass, Biofuel and Bioproducts* 2019 m. Boulder, JAV.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autorius publikacijų disertacijos tema sąrašas, santrauka anglų kalba ir priedai.

Darbo apimtis – 152 puslapiai be priedų, 31 numeruotos formulės, 33 paveiksai ir 20 lentelių. Rengiant disertaciją buvo panauda 149 literatūros šaltiniai.

Mikrodumblių aliejaus panaudojimo transporto mašinų jėgainėse galimybių analizė

Skyriuje analizuojama gryno mikrodumblių aliejaus bei jo mišinių su mineraliniu dyzelinu gamybos ir naudojimo transporto sektoriuje prielaidos bei galimybės, remiantis statistiniais ir moksliniais literatūros šaltiniais. Žinios apie tokių biodegalų panaudojimą dyzeliniuose vidaus degimo varikliuose apsiriboja tik keliais moksliniais straipsniais, charakterizuojančiais tris autotrofines dumblių biomasės rūšis. Tai viena iš perspektyviausių žaliavų degalams gaminti, kuri turėtų būti sėkmingai komercializuota pradedant 2025 metais. Daugelio pasaulio šalių mokslininkai vieningai sutaria, kad šiai dienai nėra vieningo sprendimo, kokia mikrodumblių rūšis ir kokia biodegalų gamybos technologija galėtų būti universali didžiajai daugumai valstybių. Kol bus rasti atsakymai į šiuos klausimus, mokslininkai intensyviai dirba kurdami įvairiose klimatinėse juostose esančių šalių scenarijus kaip komercializuoti dumblių bioekonomiką, kuri sėkmingai prisidėtų prie šiltnamio dujų neigiamo poveikio mažinimo, ypač transporto sektoriuje. Šioje disertacinio darbo dalyje detalai išanalizuotas šalies transporto sektorius, aptarti degalų sąnaudų bei teršalų emisijų pokyčiai ilgalaikėje perspektyvoje, identifiкуotos tos sektoriaus nišos, kurios nei Lietuvoje, nei pasaulyje dar neturi konkretaus sprendimo kaip mažinti atmosferos taršą bei priklausomybę nuo iškastinio

kuro. Studija tęsiama apžvelgiant ES vykdytus FP1–FP7 ir H2020 projektus dumblių biomasės vertimo į dyzelinius biodegalus ir jų panaudojimu transporto sektoriuje temomis, aprašomi gauti rezultatai bei nepavykę tyrimai. Antroje literatūros apžvalgos skyriaus dalyje aptariamos aliejų panaudojimo transporte galimybės bei naujausios biodegalų iš mikrodumblių pakeitimo technologijos, akcentuojant švaresnę ir rentabilią gamybą.

Skyriaus tematika paskelbta penkios publikacijos (Raslavičius *et al.* 2018; Felneris *et al.* 2019, Felneris, Raslavičius 2016 a, Felneris, Raslavičius 2016 b, Felneris, Raslavičius 2018).

1.1. Lietuvos sausumos transporto sektoriaus parko, energetinių ir aplinkosauginių rodiklių analizė

Pagrindinių transporto sektoriaus rodiklių augimas rodo, kad šalies verslas puikiai įvertina tarptautinės ir šalies rinkos poreikius bei geba jais pasinaudoti – investavę ir išplėtę savo transporto priemonių parkus, jie įsitvirtino Europos Sąjungos rinkoje ir sėkmingai didina keleivių ir krovinių vežimo, krovos, transporto paslaugų eksporto apimtis. Augimo tempais nenusileidžia ir Lietuvos kariuomenės pajėgumų stiprinimas naujomis motorinėmis transporto priemonėmis. Remiantis nauja valstybės ginkluotos gynybos koncepcija, vis daugiau atliekama Mokslinių tyrimų ir eksperimentinė plėtros darbų, susijusių su degalų diversifikavimu. Statybos pramonėje, energetikoje ir miškininkystėje didėja dyzelinu varomų ratinių transporto priemonių ir generatorinių agregatų, daugumos kurių galingumas siekia arba viršija 0,1 MW. Kartu visi šie veiksniai lemia ekonominį šalies augimą bei verčia ieškoti sprendimų, kaip mažinti atmosferos taršą.

1.1.1. Kelių ir bekelės transporto taršos lygis

Lietuvoje yra gerai ir tankiai išvystytas automobilių kelių tinklas, sudarantis apie 1,291 km/km² (Transportas ir ryšiai 2017). Lietuvos statistikos departamento duomenimis, 2018 m. bendras automobilių kelių ilgis siekė 84 317 km, iš kurių 85,1 % sudarė keliai su danga. Tais pačiais metais šalyje buvo registruota 1 578 338 vienetų transporto priemonių, iš kurių didžiausią dalį – apie 86,0 % sudarė lengvieji automobiliai, 5,4 % – krovininiai automobiliai, 2,0 % – motociklai, ir puspriekabių vilkikai, autobusai – 0,5 %. Pagal sunaudotos energijos kiekį sektoriuje, didžiausią dalį užima kelių transporto dyzelinas (LST EN 590:2014) apie 1495,3 tūkst. t (69,0 %), automobilių benzinas – 214,8 tūkst. t (9,9 %), gazoliai – 133,4 tūkst. t (6,2 %), suskystintos naftos dujos (SND) – 106,5 tūkst. t (4,9 %), žibaliniai reaktyviniai degalai – 110,9 tūkst. t (5,1 %), mazutas – 105,5 tūkst. t (4,9 %). Palyginus penkių paskutinių statistinių metų laikotarpį

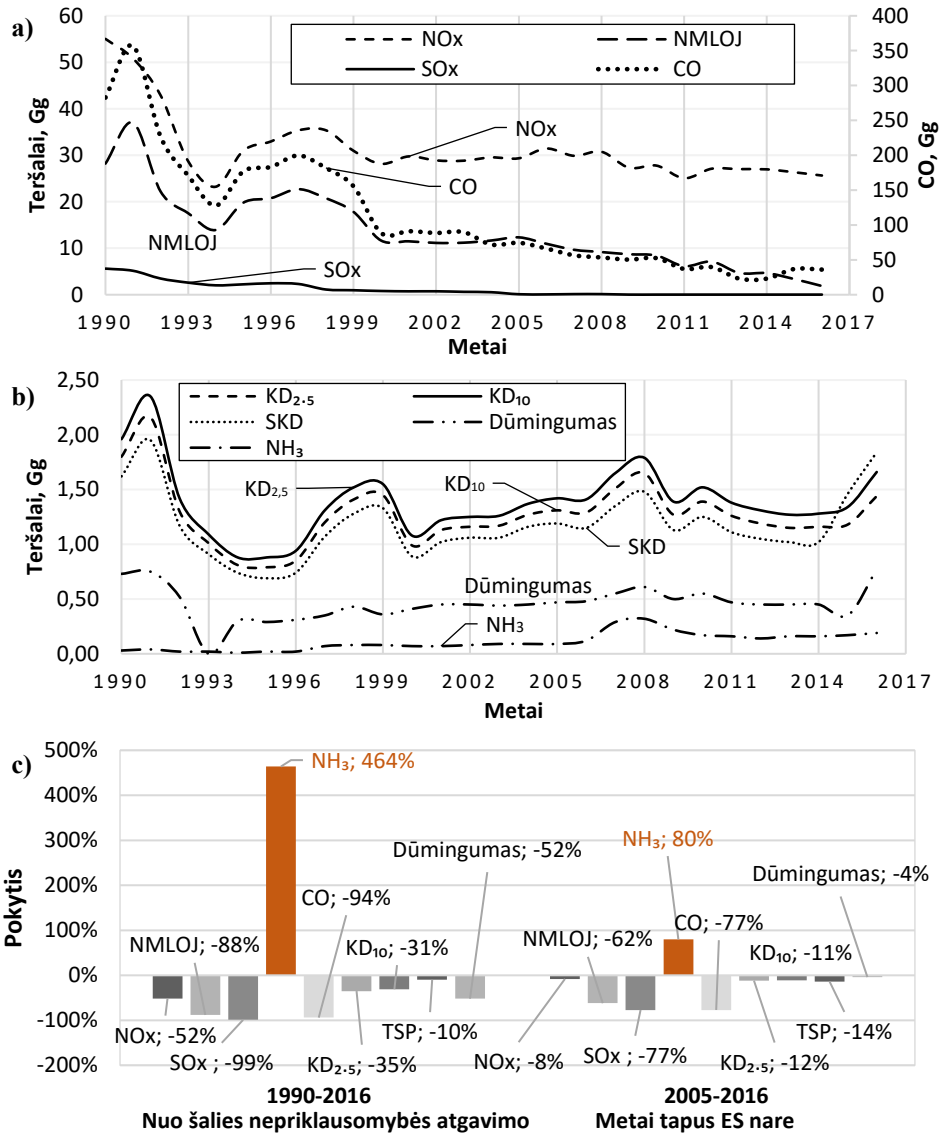
(2012–2017), matyti, kad dyzelino sąnaudos augo daugiau kaip 50 %. Reikia pažymėti, kad per tą patį laikotarpį daugiau ar mažiau augo visų iškastinių naftos degalų vartojimas, išskyrus SND, kurių poreikis šalies mastu sumažėjo 22,7 % (Transportas ir ryšiai 2017). Lyginant geležinkelius, vandens transportą ir aviaciją, kelių transportas pirmąją pagal sukuriama atmosferos taršą Lietuvoje (Raslavičius *et al.* 2014). Dažniausiai sutinkamos kelių transporto rūšys ir jų skaičiaus kitimo tendencijos 2005–2018 metais pateiktos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Registruotos kelių transporto priemonės Lietuvoje 2005–2018 metais

Table 1.1. Road vehicles registered in Lithuania during 2005–2018

Kelių transporto priemonių skaičius	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Lengvieji automobiliai	1 455 276	1 691 855	1 244 063	1 298 737	1 356 987	1 430 520
Autobusai	14 839	13 261	6 856	6 926	7 164	7 517
Motociklai	24 027	38 995	26 651	28 784	31 112	33 666
Krovininiai automobiliai	106 247	113 113	78 115	81 258	84 625	89 754
Puspriekabių vilkikai	16 239	20 808	24 781	28 138	30 914	35 923

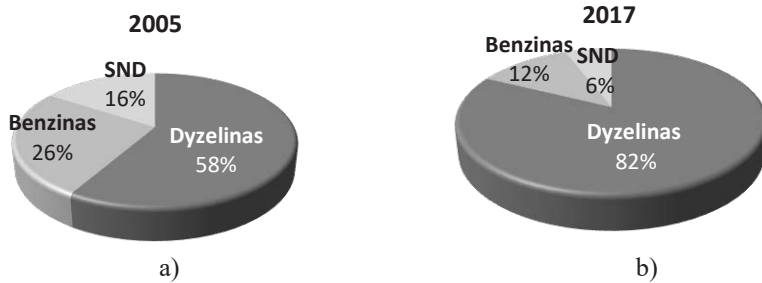
Kelių transporto sektoriui nėra priskiriami žemės ir miškų ūkio traktoriai, stabinės, pramoninės ir mobili karinė technika, kurios gali važiuoti keliais, bet yra klasifikuojamos kaip bekelės transporto priemonės. Į 1.1 lentelę neįtrauktos rečiau sutinkamos ar specifinės kelių transporto priemonės – mopedai, specialieji automobiliai, puspriekabės bei priekabos. Didžiausia kelių transporto sukeliama tarša fiksuota 1990–1992 metais, kuomet teršalų kiekis atmosferoje pasiekė ribines vertes: NO_x 42,90–55,03 Gg; NMLOJ 22,21–37,01 Gg; SO_x 3,48–5,61 Gg; CO 226,70–356,98 Gg ir t. t. (1.1 pav.) (Lithuanian Pollutants Emission Inventory Report 2018). Šiuos duomenis lyginant su 2016 metų statistika, matyti, kad į atmosferą išmetamas SO_x kiekis sumažėjo 99 %, o NH₃ emisijos išaugo 464 % (1.1 pav.). Šis neigiamas pokytis susijęs su nuolat modernėjančiu automobilių parku ir griežtėjančiu EURO standartu, kurie į aplinką išmeta iki 50 kartų daugiau amoniako junginių negu senieji automobiliai (Yao *et al.* 2005). 2005–2008 metais į rinką palaipsniui įvedus besierį dyzeliną SO₂ tarša buvo užkardyta ir metams bėgant vis mažėjo. Taip pat ženkliai sumažėjo ir anglies viendeginio emisijos, kurių kiekį iki 2016 metų pavyko sumažinti beveik dešimt kartų. Nežiūrint į itin spartų dyzelinių variklių technologinį progresą, sufokusuotą į išmetamų emisijų į aplinką mažinimą, per paskutinius dešimt metų mažiausiai kito išmetamų kietųjų dalelių kiekis KD_{2,5} (–12 %), KD₁₀ (–10 %), dūmingumas (–4 %) ir TSP (–14 %), duomenys pateikti. 1.1 c paveiksle.



1.1 pav. Kelių transporto priemonių išmetami teršalai Lietuvoje 1990–2016 metais: a) NO_x, NMLOJ, SO_x, NH₃, CO; b) KD_{2,5}, KD₁₀, TSP, Dūmingumas; c) taršos pokytis lyginamaisiais periodais (Lithuanian Pollutants Emission Inventory 2018)

Fig. 1.1. Road transport emissions in Lithuania during 1990–2016 year: a) NO_x, NMLOJ, SO_x, NH₃, CO; b) KD_{2,5}, KD₁₀, TSP, Smoke; c) emissions change during comparative periods (Lithuanian Pollutants Emission Inventory 2018)

Tokia tendencija susidarė dėl nuolat augančių dyzelinių transporto priemonių skaičiaus ir tiesiogiai lėmė 24 % padidėjusį dyzelino sunaudojimą lyginant su kitomis degalų rūšimis (1.2 pav.).



1.2 pav. Degalų sunaudojimas kelių transporte: a) 2005 ir b) 2017 metais

Fig. 1.2. Fuel consumption in road transport: a) in 2005 and b) in 2017

Dyzelinu varomos bekelės transporto priemonės ir generatoriniai agregatai yra plačiai naudojami statybos pramonėje, žemės ūkyje, miškininkystėje, krašto apsaugos sistemoje ir t. t. Daugiausiai šių degalų sunaudoja žemės ūkio paskirties sunkusis transportas – remiantis 2019 m. vasario mėn. bendro traktorių, savaeigių, žemės ūkio mašinų ir jų priekabų registro statistiniais duomenimis, iš viso buvo registruota 292 624 vienetai įvairios technikos (Žemės ūkio informacijos ir kaimo verslo centras 2019). Šiuos skaičius lyginant su analogiškais 2007 m. rodikliais (113 tūkst. technikos), matomas daugiau kaip dvigubai išaugęs registruotos žemės ūkio paskirties technikos. Statybos pramonėje, miškininkystėje ar krašto apsaugoje vyrauja dyzelinu varomos ratinės transporto priemonės, kurių galingumas dažnai didesnis kaip 100 kW (1.2 lentelė).

1.2 lentelė. Ratinėse bekelės transporto priemonėse ir generatoriniuose agregatuose montuojami dyzeliniai varikliai bei jų galingumai

Table 1.2. Capacities of diesel engines mounted in off-road wheeled vehicles and generator units

Dyzelinai varikliai	Pritaikymas
iki 100 kW	Buldozeriai, šakiniai keltuvai, žemės ūkio traktoriai
100–250 kW	Traktoriai, tranšėjų kasimo mašinos, ekskavatoriai, kariuomenės sunkvežimiai, automobiliniai kranai, daugiafunkcinės didelio mobilumo transporto priemonės („HUMVEE“).
iki 1000 kW	Traktoriai, kombainai, kelių greideriai, automobiliniai kranai, didelio mobilumo 8x8 daugiafunkciniai SISU E11T kovinės paskirties šarvuoti sunkvežimiai, šarvuočiai.
daugiau kaip 1000 kW	Mobilūs ir stacionarūs generatoriai, bekelės sunkvežimiai, autovežiai.

Dyzelino sąnaudos, išreikštos bendru energijos kiekiu, kurį sunaudojo ratinės transporto priemonės 1990–2010 metais (1.3 lentelė).

1.3 lentelė. Energijos suvartojimas dyzelinėse bekelės transporto priemonėse 1990–2010 metais

Table 1.3. Energy consumption in off-road diesel vehicles during 1990–2010 years

Dyzelino pagrindu gautas energijos kiekis, TJ	1990	1995	2000	2005	2010
Žemės ūkyje	14 277	4207	1327	1362	1444
Statybose	2507	935	613	589	382
Pramonėje	2124	1827	510	499	190

Šiai transporto kategorijai taip pat priskiriama Lietuvos kariuomenės karinė mobilioji technika, kurią sudaro: šarvuotos kovos transporto priemonės Boxer (2019: 91 vnt.), šarvuoti pėstininkų transporteriai M113 (2016: 237 vnt.) ir M577 V2 / M577 V2 Command post (2018: 168 vnt.), žvalgybos tikslais naudojami visais keturiais ratais varomi automobiliai, greitoms atakoms skirti automobiliai Wild Cat 1000 (11 vnt.), šarvuoti Oshkosh L-ATV, HMMWV, Land Rover Defender, Toyota Land Cruised automobiliai (432 vnt.), šarvuotosios remonto ir evakavimo mašinos Bergepanzer 2, M113 ir Sisu E13TP (2015–2019: 20 vnt.), amfibijos Bv 206 ir PTS-M (4 vnt.), logistikos automobiliai Sisu E13TP, Mercedes-Benz Unimog (2016–2021: 874 vnt.), didesnio pravažumo automobiliai G-Wagon, Land Rover Defender, Volvo C3, Chevrolet CUCV (2016: 331 vnt.), specialiosios paskirties daugiafunkcinės karo mašinos KRAZ (24 vnt.) (Krašto apsaugos ministerija 2019). Lietuvos krašto apsaugos sistemoje sunaudojamas bendras dyzelino kiekis nėra labai ženklus, tačiau čia ypač aktualiu klausimu laikomas jų diversifikavimas, kurį pasauliniu mastu aktyviai skatina NATO organizacija. Apie šios iniciatyvos svarbą byloja vienas iš faktų – misijos, vykdomos Afganistane metu, per vieną dieną yra sunaudojama iki 6,8 mln. litrų degalų, skirtų antžeminėms transporto priemonėms (Nuttal *et al.* 2017). Įvertinus visas karines operacijas, kuriose dalyvauja ES šalys bei tų operacijų trukmę, kasmet sunaudojamas didžiulis iškastinių degalų kiekis, dalį kurio siekiama pakeisti degalais iš atsinaujinančių energijos šaltinių.

1.1.2. Oro ir vandens transporto problematika

Biodyzelinas ir bioetanolis, deja negali pakeisti reaktyvinių degalų, naudojamų aviacijoje, kurie pasižymi itin aukštais kritiniais parametrais – energijos tankiu ir žema temperatūrinių savybių stabilumu. Etanolio energetinė vertė siekia tik apie 50 % reaktyvinių degalų energijos. Biodyzelino energijos tankis yra apie 20 % mažesnis už reaktyvinių degalų, bet pasižymi neišspręsta stingimo ir kietėjimo

problema esant žemų temperatūrų, siekiančių iki $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, skrendant dideliame aukštyje. Sprendimas gali būti rastas mikrodumblių pakeitimui pritaikant hidroperdirbimo (*angl.* hydroprocessing) technologiją, kuri jau yra naudojama naftos perdirbimo gamybose. Įveiklinus įvairias esamas hidroperdirbimo technologijas (hidrokrekingas, hidrorafinavimas, hidrinimas), pritaikytos naftos perdirbimo pramonėje bei katalizės proceso metu išvalius degalus nuo priemaišų ir sumažinus jų molekulinę masę, iš mikrodumblių aliejaus galima pagaminti žibalo savybėmis artimus degalus arba multifunkcinės paskirties degalus, naudojamus krašto apsaugos sistemos transporte. Tokių degalų charakteristikos mažai skirtingi nuo iškastinio kuro pagrindu pagaminto komercinių ar karinės paskirties reaktivinių degalų. Lietuvoje, degalų sąnaudos karinėje aviacijoje, per pastaruosius 15 metų išaugo apie 25 kartus (iki 500 TJ). Kaip ir karinio bekelės transporto atveju, biodegalų iš mikrodumblių pritaikymas karinėje aviacijoje turi didelių perspektyvų netolimoje ateityje.

Vandens transporte vienas svarbiausių kriterijų – sumažinti NO_x kiekį deginiuose, tačiau augalinės kilmės produktai dažniausiai rodo priešingą tendenciją. Šiuo metu šiame sektoriuje didžiausias perspektyvas teikia gamtinių dujų ir amoniako naudojimas. Baltijos jūra skalauja 99 km ilgio pakrantę Lietuvos vakaruose, kuri yra viena labiausiai apkrautų intensyvaus eismo jūrų pasaulyje. Čia užfiksuojamas didesnis kaip 730 000 laivų judėjimas per metus arba 2000 laivų per dieną. Baltijos jūros regiono šalys kelia didelį susirūpinimą kaip mažinti atmosferos taršą bei išsaugoti esamą ekosistemą, neįvedant papildomų suvaržymų prekių ir turistų srautų judėjimui. Kalbant apie vidaus vandenų transporto potencialą, verta paminėti, kad ilgiausia Lietuvos upė – Nemunas, kurio ilgis siekia 973 km, iš jų 475 km tęsiasi šalies teritorijoje, dėl itin plataus ir lėkšto jo slėnio tvėnkimui yra itin neparanki upė. Panašiai galima charakterizuoti ir kitas Lietuvos upes. Visgi jei išlikusias nepatvenktas upes ar jų ruožus panaudojus aktyviam vandens turizmui ir keleiviniam transportui bei racionaliam, atitinkančiam mūsų upių galimybes krovinių vežimui, būtų gauta nemažai ekonominės naudos. Augant vidaus vandenų laivybai, nesunkiai savo pritaikymą galėtų rasti laivai, varomi ekologiškais degalais, ypač kalbant apie ekoturizmo ir krovinių gabenimo plėtrą.

1.2. Moksliniai tyrimų apžvalga, susijusių su mikrodumblių panaudojimu biodegalų gamybai ir transportui

Tyrinėjimai, kaip dyzeliną pakeisti iš dumblių gaminamu biodyzeliu nėra nauji. JAV vyriausybė tokius tyrimus ėmė remti dar 8 dešimtmetyje, o programa nutraukta tik 1996 metais. Tuomet tyrimus vykdę XX a. mokslininkai konstatavo,

kad toks biokuras kainuoja per daug brangiai ir jis nebus ekonomiškai iki tol, kol naftos barelio kaina nepakils iki 40 dolerių. Dėl didėjančios paklausos, nuo 2005 m. (50,6 JAV dolerio už barelį) iki 2018 m. (69,5 JAV dolerio/barelį) naftos kainos smarkiai išaugo, o savo piką buvo pasiekusios 2008–2014 m., kuomet vieno barelio kaina siekė nuo 94,1 iki 109,5 JAV dolerių. Tai leidžia prognozuoti, jog artimiausiu dešimtmečiu pramonė komercinei aliejaus gamybai ims auginti vis didesnius dumblių kiekius.

1.2.1. Europos Sąjungos finansuotų projektinių veiklų, susijusių su mikrodumblių panaudojimu, apžvalga

Iki 2017 metų Europos Komisija finansavo daugiau kaip 400 projektų, susijusių su mikro ir makro dumblių auginimu ir perdirbimu į pridėtinę vertę kuriančius produktus. 1.4 lentelėje pateikti 9 projektai, tiesiogiai susiję su biodegalų gamybos proceso tobulinimu, siekiant komercializuoti naujai kuriamas technologijas. Platesnis domėjimasis mikrodumblių panaudojimu tvarios energijos gamybai, Europos mastu pradėtas dar 1985 m., įgyvendinant FP1 programą. Tuo metu tyrimai koncentravosi į mikrodumblių *Spirulina plantesis* autokatalizinį virsmą į aliejų prie žemų temperatūrų bei gamybos proceso optimizavimą vykdant metabolinę kontrolę. Vėlesni su mikrodumbliais susiję tyrimai buvo vykdomi maisto pramonės, farmacijos ir žemės ūkio srityse. Prie biodegalų gamybos pakartotinai sugrįžta jau 2009 metais, FP1–FP7 (2009–2015 m.) bei Horizon 2020 (2016–2021 m.) programų rėmuose.

1.4 lentelė. Mokslinių tyrimų, susijusių su mikrodumblų panaudojimu biodegalų gamyboje, apžvalga (European Commission CORDIS 1989–2019)

Table 1.4. Survey on the state of algae related research (European Commission CORDIS 1989–2019)

Programa (metai)	Projektas	Tyrimų rezultatai
1	2	3
1) FP1 (1985–1986) (1986–1987)	Skystų angliavandenių iš autotrofinės mikrodumblių biomasės gamyba, pritaikant žemos temperatūros autokatalitinio virsmo metodą (ID: EN3B0020 / EN3B0019).	Nustatyta, kad mikrodumblių biomasė gali būti pakeičiama į aliejų prie santykinai žemų temperatūrų 250–380 °C. Pasiekiamas aukštas energetinis efektyvumas, nes apie 60 % organinės anglies, esančios biomasėje yra pakeičiamas į aliejų. Gautas aliejus nereikalauja papildomo valymo ir gali būti panaudotas kaip mineralinio dyzelino pakaitalas. Tyrimams naudotas flokuliacijos metodas yra paprastas bei ekonomiškai patrauklus, kadangi 1 kg aliejaus išgauti tekainuoja 5–10 JAV dolerio centų.

1.4 lentelės tęsinys

1	2	3
2) FP7 (2009–2013)	<i>Mabfuel</i> . Jūros dumbliai kaip biomasės šaltinis biodegalų gamybai (ID: 230598).	Iširtos 29 jūroje augančių dumblių rūšys bei jų savybės. Aliejaus išgavimui iš dumblių biomasės naudotas heksano tirpiklis. Nustatyta, kad aliejingiausia iš nagrinėtų dumblių rūšių yra <i>Dictyota</i> (8,01 % aliejaus sausoje biomasėje), kuri aptinkama Turkijoje. Iš Airijoje vyraujančių mikrodumblių rūšių buvo išsiskirta <i>Bifurcaria bifurcata</i> (aliejaus koncentracija sudarė 5,9 %) mikrodumblių rūšis. Pabaigus šį projektą buvo prieita išvados, kad šios dvi mikrodumblių rūšys nėra pakankamai alieingos, norint pradėti vystyti biodegalų gamybą minėtose šalyse.
3) FP7 (2010–2011)	<i>Aquafuels</i> . Tvari antrosios kartos biodegalų gamyba, panaudojant dumblių biomasę (ID: 241301).	<i>Aquafuels</i> projekto metu buvo identifikuotos 72 dumblių rūšys, tinkančios biodegalų ir biokuro gamybai (iš jų 34 – biomasės gamybai, 32 – biodyzelino, 10 – bioetanolio ir 9 – vandenilio gamybai). Šio projekto uždaviniai – sujungti daugiau negu 30 projektų vykdomų ta pačia tema (64 mln. Eur investicijos) bei įkurti Europos dumblių biomasės asociaciją (EABA). Įvardinta, kad populiariausios mikrodumblių rūšys yra: <i>Chlorella</i> , <i>Nannochloropsis</i> , <i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Tetraselmis</i> , <i>Scenedesmus</i> , ir <i>Chlamydomonas</i> . Apie 60 % visų mikrodumblių užauginama fotobioreaktoriuose, 6,25 % atviro tipo baseinuose ir 33,75 % naudojant hibridinį metodą, apjungiantį abu šiuos auginimo būdus.
4) FP7 (2010–2015)	<i>BioWALK4Biofuels</i> . Antrosios kartos biodegalų gamyba, pasitelkiant žinias apie biologines atliekas ir dumblius (ID: 241383).	<i>BioWALK4Biofuels</i> projekto tikslas – sukurti novatorišką sistemą, kuri apjungia mikrodumblių biomasės auginimą biologinių atliekų valymui, kuri vėliau panaudojama biodegalų gamybai. Perdirbtos mikrodumblių biomasės į biodyzeliną likučiai buvo panaudoti fermentavimo procesui, pagaminant biudujas.
5) FP7 (2010–2013)	Neinvazinių mikrodumblių rūšių pasirinkimas ir aliejaus išgavimas ląstelių lygyje (ID: 256526).	Išnagrinėta eksperimentinė metodika, kurios veikimo principas pagrįstas optinio mikromanipuliacijos ir Raman mikrospektroskopijos deriniu. Mikrodumblių biomasė buvo analizuojama ląstelių lygmenyje, jas sulaukiant taikant optines gaudykles ir panaudojus Ramano spektroskopiją ištirta cheminė sudėtis. Taikomas metodas gali būti efektyviai panaudotas realiu mikrodumblių biomasės auginimo metu, ištiriant maistingųjų medžiagų dinamiką ir metabolizmą. Tai leidžia stebėti augimo procesą bei įvertinti auginamų dumblių įvairovę.

1.4 lentelės pabaiga

1	2	3
6) FP7 (2011–2015)	Uždaros trasos tipo ir fotobioreaktorius sujungimas, naudojamas mikrodumблиų auginimui, biodyzelino gamybai ir pritaikymui (ID: 268164).	Biodegalus iš mikrodumблиų gaminant pramoniniu būdu, jų auginimui skatinti naudotas techninis glicerolis ir industrinės nuotekos. Projekto tikslas – prisidėti prie tvaraus transporto plėtojimo bei atitikti Europos Komisijos (EK) 20:20:20 išskeltus tikslus.
7) FP7 (2011–2015)	Biodegalų gamyba iš dumблиų (ID: 268211).	BIOFAT projekto vykdymui pasirinktas 10 hektarų sklypas, kuriame buvo auginama ir perdirbama į biodegalus mikrodumблиų biomasė. Užsiduotas tikslas – išauginti 100 t / ha mikrodumблиų biomasės ir vėliau ją perdirbti į biodegalus. Biomasės džiovinimui taikytas centrifugavimo procesas, o biodyzelino gamybai peresterinimo procesas.
8) FP7 (2011–2016)	<i>All-gas</i> . Mikrodumблиų auginimas ir biodegalų gamyba pramoniniu mastu (ID: 268208).	Projekto rėmuose buvo numatyta išauginti 100 t biomasės iš vieno hektaro ploto per metus, su užsuduota aliejaus išeiga 20 %. Tokio biodyzelino kiekio vidutiniškai užtektų pilnai užtikrinti apie 200 automobilių savininkų metinį poreikį degalams. Mikrodumблиų biomasės išspaudos buvo panaudos biodujų gamybai. Biomasės auginimo procesui paspartinti, kaip maistinė medžiaga naudotas dūmuose esantis CO ₂ , per kaminą išmetamas iš eksploatuojamų džiovyklos įrenginių.
9) Horizon2020 (2016–2021)	<i>Solenalgae</i> . Mikrodumблиų fotosintezė biodegalų ir didelės vertės produktų gamybai (ID: 679814).	Projekto rėmuose tirtos galimybės kaip paspartinti mikrodumблиų fotosintezės procesą, siekiant išgauti didesnę aliejaus kiekį. Užsiduotas metinis mikrodumблиų biomasės prieaugis – 294 t / ha. Projekto metu pastebėta, kad mikrodumблиai gali įsisavinti tik apie 1–3 % kasdieninės saulės šviesos. Taip yra todėl, kad neskaidri dumблиų biomasė bioreaktoriaus vamzdeliuose gali efektyviai absorbuoti šviesą tik pačiame paviršiniame sluoksnyje. Likęs reikalingas šviesos kiekis dažniausiai suteikiamas naudojant dirbtinį apšvietimą, kas didina energijos sąnaudas auginimui.

Mikrodumблиų perdirbimas į degalus, dėl esamų technologijų netobulumo, šiai dienai yra finansiškai nerentabilus, kas mažina iš šios biomasės pagaminto aliejaus ir biodyzelino platesnį prieinamumą. Dalis šių veiksnių lėmė, nesėkmingus vykdomų projektų rezultatus (1.5 lentelė). Vertinant ilgalaikę perspektyvą, lūkesčiai iškastinį kurą pakeisti makro ir mikrodumблиų biomasės pagrindu gauta

energija yra perspektyviausias ir labiausiai tikėtinas ateities scenarijus, kuris šiai dienai dar stokoja investicijų atsiperkamumo.

1.5 lentelė. Nesėkmingi arba dalinai sėkmingi dumblių projektai

Table 1.5. Unsuccessful or partially successful algae projects

Šaltinis	Tyrimo rezultatai
Biopact 2007	Mokslininkai, sprendžiantys klausimus, susijusius su mikrodumblių biomasės panaudojimu biodegalų gamyboje susidūrė su šiais pagrindiniais iššūkiais: mažas biomasės produktyvumas ir generuojamo aliejaus kiekio stabilumo nebuvimas, sudėtingas biomasės surinkimas, reikalingas didelis baseino plotas, ekonomiškai neatsiperkanti fotobioreaktoriaus gamyba ir eksploatavimas. Tyrimai mikrodumblių genomo tobulinimo/keitimo srityje nebuvo efektyvūs ir neužtikrino planuoto lipidų kiekio.
Wellinger 2009	Autorius akcentuoja didelį susidomėjimą biodegalų iš mikrodumblių gamybos srityje, tačiau pabrėžia, kad technologiniai procesai mažai kuo pasikeitė lyginant su aštuntuoju dešimtmečiu. Biodyzelinas iš dumblių vis dar išgaunamas ir tiriamas laboratorijose. Nemažos viltys siejamos su energetikos pramone, kurios atstovai yra suinteresuoti su dūmais išmetamo CO ₂ panaudojimu mikrodumblių auginimo procese, kuriuos vėliau atitinkamai perdirbus galima būtų gaminti biodegalus transportui.
Zander 2010	Mikrodumblių biomasės pagrindu sukurta biologinė CO ₂ gaudyklė išbandyta <i>Niederlaussem</i> elektrinėje, kaip galima alternatyva į atmosferą išmetamų emisijų mažinimui. Jacobs universiteto (Vokietija) mokslininkai paskaičiavo, kad, šiuo konkrečiu atveju, auginami mikrodumbliai per metus gali sugaudyti apie dvylika tonų CO ₂ . Žinant, kad elektrinė į aplinką išmeta apie 27 mln. tonų CO ₂ , biologinės anglies dvideginio gaudyklės įtaka švaresniam elektrinės darbui turėjo labai nedidelę įtaką. Universiteto profesorius mano, kad toks projektas pasiteisintų mikrodumblių auginimą įdiegus į mažų elektrinių gamybos procesą, kur CO ₂ mažinimas būtų kur kas labiau pastebimas. Tuo tarpu, remiantis <i>Niederlaussem</i> pavyzdžiu galima išauginti iki 100 t / ha dumblių biomasės per metus, tokiu atveju, būtų sugaudoama apie 200 tonų CO ₂ . Ši technologija nėra pigi, nes investicijos į vieną kvadratinį kilometrą biologinės CO ₂ gaudyklės ploto gali siekti 15 mln. Eur. Lyginant investicijų dydį su tuo metu galiojusi taršos mokesčiu (24 Eur už toną), padaryta išvada, kad tokia instaliacija yra ekonomiškai nerentabili.
Rapier 2012	2012 m. JAV Energetikos Departamentas atliko skaičiavimus kokia yra biodegalų gamybos iš mikrodumblių biomasės kaina. Apskaičiuota, kad vieno galono biodegalų, pagamintų iš mikrodumblių biomasės, užaugintos atviro tipo tvenkiniuose kaina yra 9,28 JAV dolerių, o fotobioreaktoriuose – 17,52 JAV dolerių. Dauguma įmonių nusprendė nebetęsti biodegalų gamybos dėl finansinio rentabilumo stokos bei naftos kainų santykinio mažėjimo.
Ernsting 2016	Autorius teigia, kad biodegalų gamybai iš dumblių buvo skirti milijardai dolerių, tačiau dalis šių lėšų buvo panaudota neskaidriai. Kaip pavyzdys pateikiama bendrovė <i>Sapphire Energy</i> , gavusi 50 mln. JAV dolerių subsidiją biodegalų iš mikrodumblių plėtrai inicijuoti, tačiau mikrodumblių biomasės pagrindu pagamintas aliejus vėliau buvo naudojamas maisto papildų gamybai.

Kaip rodo 1.5 lentelėje apibendrinti vykdytų projektų duomenys, daugeliu atveju, santykis tarp įdėtos ir gautos energijos srautų buvo neigiamas, nesiekė santykio 1:1. Manoma, kad vykdomi moksliniai tyrimai ir projektai padės išspręsti technologinius ir ekonominius iššūkius, susijusius su biodegalų iš dumblių biomasės gamybos savikainos mažinimu (Brownbridge *et al.* 2014). Šis tikslas, tikimasi bus pasiektas pasitelkus naujausias mokslines žinias apie biologinių CO₂ gaudyklių įrengimą šalia dūmus į atmosferą išmetančių energetinių objektų (Ghorbania *et al.* 2014), racionalų išspaudų panaudojimą kurui kogeneraciniame cikle (Collet *et al.* 2015), biotechnologinius sprendimus pramoninių mikrodumблиų rūšių padidintam atsparumui supančiai aplinkai (Bux *et al.* 2016), o taip pat apie įvairių sinergių naudojimą, pasitelkiant elektros energiją tausojančius šviessos diodus, produktyvumą didinantį elektromagnetinės stimuliacijos procesą, pramoninių nutekamųjų vandenų panaudojimą kaip terpę mikrodumблиams augti ir t. t.

1.2.2. Mikrodumблиų panaudojimo biodegalų gamyboje tyrimai Lietuvoje

Pirmosios publikacijos aliejingų mikrodumблиų panaudojimo biodegalų gavybos tema Lietuvoje datuojamos 2013 m. (1.6 lentelė), kuomet VDU (anksčiau Aleksandro Stulginskio) universiteto mokslininkai paskelbė tyrimų rezultatus apie mikrodumблиų auginimą, įvertindami skirtingus mitybos būdus (autotrofinį, heterotrofinį ir hibridinį) bei papildomą nutekamojo vandenį ir techninio glicerolio tiekimą, siekiant užauginti didžiausią biomasės kiekį (Makarevičienė *et al.* 2013).

Pastebėta, kad mikrodumблиuose *Scenedesmus sp.* generuojama 10,9 kartų didesnė aliejaus koncentracija, taikant hibridinį mitybos būdą, lyginant jį su įprastiniu – autotrofiniu. Taip pat užfiksuotas iki 19,3 padidėjęs anglies atomų C:N santykis, kuris laikomas racionaliū biodegalų gamybos procesui (Makarevičienė *et al.* 2013, Makarevičienė, Janulis 2013).

2014 m. KTU mokslininkai bendradarbiaudami su Maskvos Lomonosovo universiteto tyrėjais, aprašė įvairias cheminio virsmo technologijas, kurios galėtų būti pritaikytos efektyvinant biodegalų gamybą transportui. Išnagrinėti atviro tipo 500 litrų tūrio baseino ir 1 litro tūrio fotobioreaktoriaus eksploataciniai ypatumai, mikrodumблиus juose auginant skirtingose cheminėse terpėse esant skirtingoms aplinkos temperatūroms ir apšvietimo intensyvumui (Raslavičius *et al.* 2014).

Galima teigti, kad moksliniai tyrimai mikrodumблиų srityje Lietuvoje 2014 m. įgavo pagreitį, pradėtos nagrinėti jų pagrindu pagamintų biodegalų taikymo vidaus degimo varikliuose galimybės (Makarevičienė *et al.* 2014). Klaipėdos universitete buvo apginta daktaro disertacija, tema – „Dyzelinų variklių, dirbančių antrosios kartos biodegalų mišiniais, eksploatacinių charakteristikų tyrimai“, kurioje, be kitų tyrimų, aprašyti variklio eksploatacinių charakteristikų ypatumai jam

dirbant mišiniais, sudarytais iš mineralinio dyzelino ir biodyzelino gauto iš mikrodumблиų biomasės. Šiame darbe nustatyta, kad, naudojant biodyzeliną iš mikrodumблиų, santykinės efektyviosios degalų sąnaudos išaugo 3,0–3,5 % bei 2,5–3,0 % padidėjo variklio efektyvusis naudingumo koeficientas, lyginant su dyzelinu. Trečios kartos biodegalų priedas degaluose taip pat prisidėjo prie geresnių aplinkosauginių parametru, kurių reikšmės atitinkamai sumažėjo: CH (5–25 %), CO (10 %) ir dūmingumas (5–55 %). Pastebėta tendencija, kad mineralinio dyzelino mišiniai su mikrodumблиų metilesteriu, turėjo didesnę teigiamą poveikį mažinant deginių emisijas negu tokio paties santykio dyzelino – RME mišiniai (Žaglinskis *et al.* 2014).

1.6 lentelė. Per 2013–2019 metus Lietuvoje publikavo atlikti su mikrodumbliais susiję moksliniai tyrimai

Table 1.6. Microalgae under investigation in Lithuania during 2013–2019

Metai	Cheminė sudėtis, gyvavimo ciklo vertinimas, gamyba	Degimo teorija ir modelavimas. Vidaus degimo variklių standiniai bandymai	Politinių aspektų vertinimas, apžvalgos ir perspektyvos
2013	Makarevičienė <i>et al.</i> 2013; Makarevičienė, Janulis 2013	–	Raslavičius <i>et al.</i> 2013
2014	Makarevičienė 2014 <i>b</i>	Žaglinskis <i>et al.</i> 2014; Makarevičienė <i>et al.</i> 2014 <i>a</i>	Raslavičius <i>et al.</i> 2014
2015	Skorupskaitė <i>et al.</i> 2015	–	–
2016	Skorupskaitė <i>et al.</i> 2016	–	–
2017	Makarevičienė <i>et al.</i> 2017; Venckus <i>et al.</i> 2017	–	–
2018	Gumbytė <i>et al.</i> 2018	Raslavičius <i>et al.</i> 2018 <i>a</i>	Raslavičius <i>et al.</i> 2018 <i>b</i>
2019	–	Raslavičius <i>et al.</i> 2019	Felneris <i>et al.</i> 2019

2014 m. Vytauto Didžiojo universiteto tyrėjai tęsė mokslinius tyrimus, susijusius su biodyzelino gamyba iš mikrodumблиų aliejaus, ją optimizuojant pritaikius paviršiaus atsako metodiką (*angl. surface response methodology*). Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad metanolio / aliejaus molinis santykis – 7:1 yra racionalus biodyzelino sintezei, o katalizatoriaus (NaOH) koncentracija reakcijos metu neturi viršyti 1 % mikrodumблиų aliejaus masės (Makarevičienė *et al.* 2014). 2015 m. VDU (buvęs ASU) mokslininkai publikavo tyrimų duomenis apie galimybę pagreitinti *Chlorella sp.* biomasės augimo periodą, kaip maistines medžiagas naudojant techninį glicerolį bei biodujų gamybos proceso metu gautą skystąją frakciją. Pasirinkta metodika leido optimizuoti biomasės auginimo procesą, atsižvelgiant į glicerolio ir azoto (gauto iš skystos frakcijos atliekų) koncentraciją auginimui skirtoje terpėje. Laboratorinėmis sąlygomis, daugiausiai mikrodumблиų

biomasės (2,41 g/l) išauginta naudojant terpę, kurios sudėtyje buvo 0,114 g/l azoto ir 2,70 g/l techninio glicerolio (Skorupskaitė *et al.* 2015).

2016 m., VDU mokslininkai vykdė tyrimus, susijusius su aliejaus išgavimu iš mikrodumblų biomasės ir tolimesniu jo peresterinimo į biodyzeliną, du atskirus procesus apjungiant į vieną „in situ“ technologiją (Skorupskaitė *et al.* 2016).

2017 m. VDU (anksčiau ASU) mokslininkai išbandė septynias komercines lipazes bei detalesniems tyrimams pasirinko pačią efektyviausią iš jų – lipolazę 100L. Anksčiau tyrimams taikytą paviršiaus atsako metodiką, nustatytos efektyvios peresterinimo sąlygos cheminei reakcijai vykstant prie 30 °C, kai bendras lipazės kiekis sudarė 10 %, o etanolio–aliejaus molinis santykis 3:1. Praėjus 26 valandoms užfiksuoti akivaizdūs rezultatai, kuomet biodyzelino išgavimo efektyvumas pasiekė 96,9 %, kas yra reglamentuojama EN 14214 standarte (Makarevičienė *et al.* 2017).

Svarų indėlį į aliejingųjų mikrodumblų tyrinėjimą 2017 m. įnešė Vilniaus universiteto mokslininkai, kurie nagrinėjo *Chlorella vulgaris* biomasės auginimo galimybes, naudojant Vilniaus miesto komunalines nuotekas kaip terpę bei tyrė užaugintos biomasės cheminę sudėtį. Buvo nustatyta, kad biomasėje esančių lipidų, angliavandenių ir baltymų kiekis labai priklauso nuo fosforo bei azoto koncentracijų nutekamuose vandenyse. Didėjant azoto kiekiui terpėje, mikrodumblų biomasės prieaugis ima ženkliai didėti, savo ruožtu įsisavindamas iki 86 % azoto ir 87 % fosforo esančio komunalinėse nuotekose (Venckus *et al.* 2017).

2018 m. KTU, VGTU ir Lietuvos energetikos instituto mokslininkai ištyrė mikrodumblų *P.moriformis* aliejaus, biodyzelino ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu fizikinius, cheminius bei termininės analizės tyrimus, pritaikant Diferencinės skenavimo kalorimetrijos (DSC) ir Termogravimetrijos (TG) metodus. Iš gautų termogramų nustatyta, kad minėtų degalų rūšių virimo ir užsiliepsnojimo temperatūros išsidėsto šia tvarka: dyzelinas < aliejus < biodyzelinas ir atitinkamai dyzelinas < biodyzelinas < aliejus. Šių mokslininkų grupė taip pat sumodeliavo kogeneracinės jėgainės energetinį balansą, įvertinantį biologinės CO₂ gaudyklės įrengimo racionalumą energetinio objekto teritorijoje, kuomet užauginta mikrodumblų biomasė panaudojama biodegalų, skirtų transportui, gamybai (Raslavičius *et al.* 2018). Biodegalų iš mikrodumblų auginimo, perdirbimo ir jų panaudojimo perspektyvas transporto sektoriuje atliko VGTU tyrėjai 2019 m. Apžvalgoje pateiktos mikrodumblų auginimo perspektyvos Lietuvoje, iššūkiai juos perdirbant į biodegalus ir galimybių analizė pritaikant transporto sektoriuje Lietuvoje (Felneris *et al.* 2019). 2019 m. KTU ir VGTU tyrėjai atliko eksperimentinius ir skaitinio modeliavimo VDV tyrimus, panaudojant mikrodumblų aliejų ir mišinius su dyzelinu. Publikuotame tyrime aprašyti variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai keičiant variklio apkrovą ir degalų įpurškimo paskubos kampą (Raslavičius *et al.* 2019).

1.3. Atsinaujinantys energijos šaltiniai ir perspektyva iš ateities biožaliavų

Kaip alternatyvi degalų rūšis, augaliniai aliejai gali pasiūlyti beveik visus privalumus, kuriais pasižymi biodyzelinas: geresnes judančių variklio detalių tepimo savybes, didelį akumuliuotos energijos kiekį tūrio vienetu, ne tokius griežtus reikalavimus šiuos degalus saugant (sandėliuojant), panašias pasiekiamų eksploatacinių parametrų reikšmes artimas varikliui, dirbančiam su dyzelinu, bei gerokai sumažėjusią atmosferos taršą kenksmingais junginiais. Netgi jei augalinių aliejų naudojimas VDV nėra taip gerai ištyrinėtas kaip biodyzelino, šių abiejų degalų rūšių emisinės charakteristikos yra labai panašios: sieros ir jos junginių nebuvimas deginiuose, smarkiai sumažėjęs dūmingumas, žemesni nesudegusių angliavandenių ir anglies viendeginio kiekiai bei šiek tiek išaugusi azoto oksidų koncentracija (Stenman 2005). Pagrindinis augaliniu aliejumi varomos transporto priemonės pranašumas prieš naudojančias kitas alternatyvių degalų rūšis, kad toks automobilis sąlyginai gali vadintis „CO₂ neutraliu“ (angl. *Zero CO₂*). Toks apibūdinimas negali būti taikomas net pirmosios kartos biodyzelinui (1.7 lentelė) nes jo sudėtyje yra nedidelis kiekis iš naftos produktų gauto metanolio, naudojamo masinės biodegalų gamybos technologiniuose procesuose. Ši savybė yra būdinga labai nedideliame degalų, skirtų transportui, spektrui. Pagrindė tai sintetiniai degalai, pagaminti iš biologinės kilmės žaliavų, panaudojant kogeneracinių jėgainių išmetamuose dūmuose esančias anglies daleles.

1.7 lentelė. Biodyzelino iš aliejinių kultūrų gamybos sąnaudų palyginimas (Jacquot 2008)
Table 1.7. Appraisal of energy demand for biodiesel production from different oil crops (Jacquot 2008)

Aliejinės kultūros	Soja	Rapsai	Mikrodumbliai
ŠESD*	49	37	-183
Vandens išeiga	Aukšta	Aukšta	Vidutinė
Trąšų išeiga	Žema-vidutinė	Vidutinė	Žema
Pesticidų išeiga	Vidutinė	Vidutinė	Žema
Energijos sąnaudos	Žemos-vidutinės	Žemos-vidutinės	Aukštos
Technologinis parengties lygis	Pilnai komercializuotos. Konkuruoja su maistinėmis kultūromis	Pilnai komercializuotos. Konkuruoja su maistinėmis kultūromis	Technologijos vis dar vystomos. Yra didžiulių gamybos apimčių pasiekimo potencialas

Pastaba: * – CO₂ kiekis (kg), išsiskyręs pagaminus vieną MJ energijos (įvertinus kultūrų auginimą, derliaus nuėmimą, perdirbimą ir sudeginimą variklyje).

SSGG matrica (*angl.* SWOT) leidžia įvertinti aliejingas mikrodumblų kultūras iš kurių išgautas aliejus tiesiogiai panaudojamas vidaus degimo varikliuose (1.8 lentelė).

1.8 lentelė. Mikrodumblų aliejaus stiprybių, silpnybių, galimybių ir grėsmių matrica
Table 1.8. The SWOT analysis of microalgae oil has been formed

Stiprybės	Silpnybės
<ul style="list-style-type: none"> a) Mikrodumbliai greičiausiai auganti aliejinga kultūra pasaulyje, nereikalaujanti dirvožemio; b) augimo metu maitinasi CO₂ ir fotosintezės metu gamina deguonį; c) gali būti auginami net nepalankiose terpėse ar sąlygomis; d) sėkmingai pritaikomas vidaus degimo varikliuose; e) saugiai transportuojamas ir saugojamas dėl aukštos pliūpsnio temperatūros; f) mažesnės energijos sąnaudos gamybos metu kaip biodyzelino atveju; g) nėra toksiškas; h) klasifikuojamas kaip nekenksmingas požeminiams vandenims; i) išspaudų antrinis perdirbimas; j) didesnis deguonies kiekis lemia pilnesnį degiojo mišinio degimo procesą. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Sunku rasti mikrodumblų rūšį, kuri būtų labai aliejinga ir lengvai auginama; b) brangus aliejaus išgavimas iš mikrodumblų biomasės, o išėiga priklauso nuo auginamos kultūros rūšies; c) nėra komercelizuotas gamybos procesas; d) aliejui būdinga didelė klampa ir mažas lakumas; e) žema stingimo temperatūra; f) mažesnis šilumingumas negu mineralinio dyzelino.
Galimybės	Grėsmės
<ul style="list-style-type: none"> a) Didelė mikrodumblų rūšių įvairovė; b) išgautas aliejus lengvai maišomas su mineraliniu dyzelinu; c) mikrodumblų auginimui reikalingi dideli CO₂ kiekiai, todėl galima pritaikyti kogeneracinėse ar kito tipo elektrinėse, panaudojant kaip CO₂ gaudyklės; d) politiniai aspektai aplinkosauginiais klausimais ir subsidijos leistų atpiginti mikrodumblų auginimo ir gamybos technologijas; e) plačios biomasės išspaudų panaudojimo galimybės. f) mikrodumblų aliejus potencialiai gali konkuruoti su elektriniu transportu. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Biodegalų gamyba iš mikrodumblų finansiškai nėra patraukli dėl pigesnių technologijų gaminant antrosios kartos biodegalus; b) biodegalų iš mikrodumblų komercializavimas verslui nebus priimtinas tol, kol finansiškai netaps rentabilus. c) mikrodumblų komerciniam auginimui nepakanka ore esančio CO₂ reikalingas papildomas tiekimas; d) didelė konkurencija pigesnių degalų ir biodegalų gamyboje.

SSGG matricos dėka galima įvertinti mikrodumblų kultūrų stiprybes (kuo šios kultūros išskiria iš kitų ypač dažnai naudojamų pvz. rapsų ir t. t.), silpnybes (iš mikrodumblų išgauto aliejaus trūkumai lyginant su kitais augaliniais aliejais), galimybes (įvertinamas šių kultūrų potencialas biodegalų rinkoje ir galimos sėkmingos konkurencinės galimybės prieš įprastinius naftinės kilmės produktus ar pirmosios bei antrosios kartos biodegalus) (Moss 2016) ir grėsmes (įvertinami veiksniai, turintys neigiamų aspektų mikrodumblų kultūrų plėtros stadijai, įskaitant finansinius lūkesčius, apimant mikrodumblų auginimą, aliejaus išgavimą, valymą ir pritaikymą VDV).

1.3.1. Mikrodumblų auginimo technologijų analizė

Mikrodumblų sėkmingam auginimui užtikrinti reikalingi pagrindiniai keturi komponentai: vanduo, temperatūra palanki dauginimuisi, anglies dvideginis (maistinė medžiaga) ir pakankamas šviesos srautas. Atskirais atvejais, šių mikroorganizmų dauginimasis gali nepriklausyti nuo šviesos srauto, t. y. nevykdyti fotosintezės, o maitintis heterotrofiškai – vandenyje ištirpusiomis organinėmis medžiagomis. Nemažai mikrodumblų rūšių geba maitintis miksotrofiškai, kuomet vykdoma fotosintezė bei lygiagrečiai pasisavinamos maistinės medžiagos, esančios (ištirpusios) vandenyje. Vėsiojo ir drėgnojo klimato zonoje, kurioje yra Baltijos ir Šiaurės Europos šalys, metinis saulės radiacijos srautas nėra intensyvus (apie 2000 kWh/m²). Atsižvelgiant į tai, pramoniniam mikrodumblų auginimui reikalingi papildomi šviesos šaltiniai arba heterotrofinės-miksotrofinės mikrodumblų rūšies pasirinkimas, kas leistų šviesos trūkumą kompensuoti vandenyje ištirpintomis organinėmis medžiagomis arba pritaikyti abu mitybos būdus (autotrofinį ir heterotrofinį) ir taip užtikrinti pastovų biomasės prieaugį.

Komerčiniam mikrodumblų auginimui pasaulyje naudojamos keturių tipų sistemos: i) atviro tipo baseinai, ii) fotobioreaktoriai, iii) uždaro tipo hibridinės sistemos, iv) biologinių CO₂ gaudyklų įrengimas šalia energetinių objektų. Atviro tipo baseinų naudojimas yra santykinai nebrangus auginimo būdas, kuris kartu yra ir komplikuoatas užtikrinant reikiamas aplinkos sąlygas – apšvietimą, pastovią temperatūrą metų bėgyje. Fotobioreaktoriuose, priešingai negu atviro tipo baseinuose, biomasės auginimas yra pilnai kontroliuojamas: papildomai tiekiamas anglies dvideginis, reguliuojamas apšvietimas, temperatūra, pH lygis ir kt. Visgi ši technologija yra ypač brangi eksploataciniu požiūriu – didinant gamybos apimtį, produkcijos savikaina ima didėti, sunkiai realizuojamas pastovios pagaminamos produkcijos scenarijus į fotobioreaktorių patekus užkratui, kuomet būtinas priverstinis stabdymas valymui. Uždaro tipo hibridinės sistemos savo veikimo principu yra panašios į fotobioreaktorių veikimą, tačiau jose auginimo procesas vykdomas dviem etapais: i) pirminis biomasės auginimas fotobioreak-

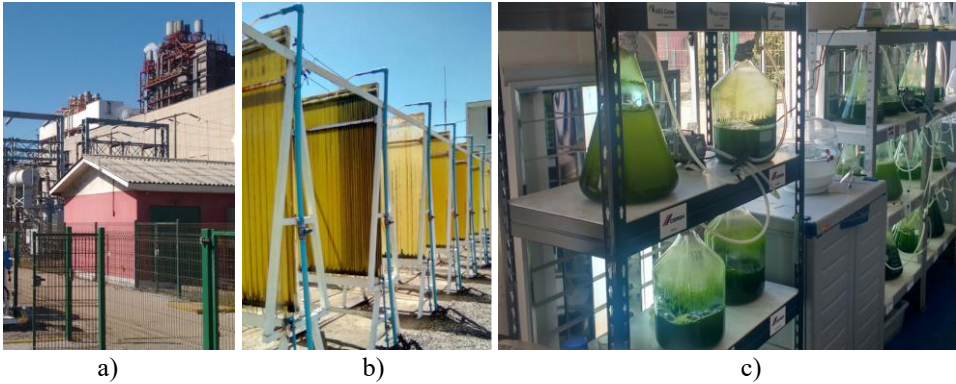
toriuose, kuomet užtikrinami pastovūs proceso technologiniai parametrai, ii) tolimesnis biomasės perkėlimas į atvirą baseiną. Ketvirtasis ir perspektyviausias mikrodumplių biomasės auginimo būdas – biologinių CO₂ gaudyklų įrengimas šalia kogeneracinių jėgainių arba elektrinių. Lyginant su prieš tai aptartais trimis metodais, šis sprendimas užtikrina daugiausiai privalumų, siekiant proceso komercializavimo: nuolatinis žemo potencialo energijos bei su dūmais išmetamo CO₂ kiekio tiekimas auginimo procesui, industrinių nutekamųjų vandenų tiekimas augimo terpei atnaujinti ir t. t.

Teoriškai apskaičiuota, kad 100 tonų mikrodumplių biomasės sugaudo 183 tonas CO₂ (Huang *et al.* 2014). Biomasėje sukaupia anglis sudaro apie 50 % sauso produkto bendros masės, kuri vėliau perdirbama į aliejų, biodyzeliną ar kitus produktus. Įprastinėmis sąlygomis ore esantis CO₂ (0,036 %) kiekis nėra pakankamas pramoniniam mikrodumplių auginimo procesui su didele išėiga užtikrinti, o anglies dvideginio generavimas specialia įranga nėra rentabilus tiek energetine prasme, tiek finansiškai. CO₂ atskyrimas iš degimo proceso metu generuojamų dūmų srauto (iki 15 % dūmų sudėties) ir nuvedimas į biologinę gaudyklę smarkiai sumažina išlaidas biožaliavos auginimo pakopeje.

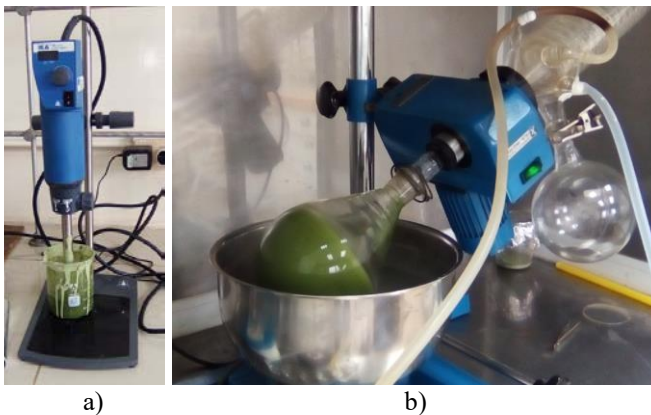
1.3.2. Lietuvos ir Čilės patirtis

2017 m. rugsėjo–gruodžio mėnesiais, Ventana mieste aplankyta viena didžiausių bendrovių užsiimanti elektros energijos gamyba Čilės Respublikoje – Chilean group AES Gener, kuri valdo dvi iškastiniu kuru kūrenamas jėgaines. Šalies centrinėje dalyje esanti Empresa Electrica Ventanas S.A. kogeneracinė jėgainė, sudaryta iš keturių blokų, kurių instaliuota galia yra atitinkamai 120 MW, 218 MW, 267 MW ir 272 MW. Dėl didelės atmosferos taršos, 2013 m. šios elektrinėje ketvirtajame bloke (1.3 pav. a) buvo įgyvendintas biologinės CO₂ gaudyklės diegimo projektas. Jėgainės teritorijoje įrengta mikrodumplių auginimo ferma (1.3 pav. a), į kurią, per dūmų kolektorių, kaip maistinis šaltinis nuolatos tiekiamos CO₂ dujos, susidarančios deginant iškastinį kurą. Mikrodumplių biomasės auginimui naudojama uždaro tipo hibridinė sistema (tarpinis technologinis variantas tarp atvirto tipo baseino ir fotobioreaktoriaus), leidžiantis kontroliuoti ir palaikyti pastovią CO₂ koncentraciją biomasės auginimui. Vamzdelinė PVC sistema (1.3 pav. b) užtikrina gerą šviesos ir šilumos laidumą, kas sudaro sąlygas fotosintezės procesui vykti. Auginama vietinė, gerai prisitaikiusi prie esamų klimatinių sąlygų *Tetraselmis suecica* žaliųjų jūrinių mikrodumplių rūšis, kurios kultivavimui nenaudojami jokie kiti jėgainės resursai, išskyrus išmetamą anglies dvideginį. Išauginata mikrodumplių biomasė paskatino galvoti apie tolimesnį jos panaudojimą, todėl netrukus greta šios uždaro tipo vamzdelinės fermos buvo įrengta laboratorija (1.3 pav. c) ir pradėti įvairių rūšių mikrodumplių tyrimai, įskaitant galimą jų virsmą į biodegalus transportui.

Doktorantūros stažuotės metu (D priedas D.1 pav.), naudojant Valparaiso (Čilės Respublika) Federico Santa Maria technikos universiteto laboratorinę įrangą, industrinėje CO₂ gaudyklėje užauginta *Tetraselmis suecica* mikrodumблиų biomasa buvo keičiama į degalams naudojamą aliejų (1.4 pav. a ir b).



1.3 pav. Electrica Ventanas jėgainė: a) ketvirtas blokas, b) mikrodumблиų auginimo ferma, c) mikrodumблиų tyrimo ir aliejaus išgavimo laboratorija
Fig. 1.3. Electrica Ventanas power plant: a) fourth block, b) microalgae cultivation farm, c) microalgae research and oil extraction laboratory view



1.4 pav. Aliejaus išgavimas iš mikrodumблиų biomasės Valparaiso (Čilės Respublika) Federico Santa Maria technikos universiteto laboratorijoje (2017 m.): a) biomasės ląstelių ardymo procesas; b) heksano tirpiklio garinimas ir aliejaus išskyrimas

Fig. 1.4. Oil extraction from microalgae biomass in the laboratory of Valparaiso (Republic of Chile) Federico Santa Maria Technical University (year 2017): a) microalgae cell destruction process, b) hexane solvent evaporation and oil extraction

Tyrimams taikytas mechaninis biomasės ląstelių ardymo metodas, naudojant prietaisą *T 25 Digital Ultra-Turrax* bei heksano tirpalą. Ardymo efektyvumas įprastai priklauso nuo i) biologinių veiksnių: ląstelės sienelės sudėties, jos formos ir mechaninių parametrų ir ii) konstrukcinių veiksnių: ardymo kelės konstrukcijos, varomosios jėgos ir t. t. Naudoto gamyboje taikomo metodo privalumas – galimybė ardyti ląsteles nepertraukiamu režimu, universalumas, prieinamumas, aukštas efektyvumas, atsikartojamumas, procedūrų standartizavimo ir ardymo procesų automatizavimo galimybė. Vienas iš šio projekto tikslų yra išsiaiškinti, kuri iš mikrodumplių rūšių galėtų absorbuoti didžiausius CO₂ kiekius bei užtikrinti didžiausią pagaminamą aliejaus kiekį biodegalų gamybos pramonei. Per keturis metus nuo projekto įgyvendinimo pradžios, šios biologinės gaudyklės dėka, įmonė gavo nemažai pajamų dėl gerokai sumažėjusių taršos mokesčių bei planuoja, kad iki 2020 m. įdiegta technologija pilnai atsipirks.

Mikrodumplių auginimą Lietuvoje apsinkina specifinės klimatinės sąlygos: pakankamai žema saulės spinduliuotė 1900 kWh/m² (pietiniuose pasaulio regionuose apie 3000 kWh/m²), žema oro metinė temperatūra 6 °C ir didelis išskrentančių kritulių kiekis. Įvertinus šiuos veiksnius mikrodumplių auginimui pasirinkta uždaro tipo (baseino) sistema, kuri instaliuota į kogeneracinę jėgainę kaip CO₂ gaudyklė. Matematiniam energetinio balanso skaičiavimams atlikti pasirinkta 50 MW galingumo kogeneracinė jėgainė, deginanti iškastinį kurą. Tokio tipo elektrinės diegimas buvo planuotas 2016 metais Kauno mieste ir atliktas energetinio balanso skaičiavimas įvertinant penkis scenarijus, sudarant technines ir ekonomines prielaidas mikrodumplių auginimui, biodegalų išgavimui ir pritaikymui Lietuvos transporto parke. Energetinio balanso apskaičiavimas pateiktas (B priede).

1.4. Augalinių aliejų naudojimo ir poveikio vidaus degimo varikliams analizė

Augalinių aliejų panaudojimo degalams transporte, problema pakankamai sena. Jau XIX šimtmetyje sukurti dyzeliniai VDV naudojo augalinius aliejus (Hebbal *et al.* 2006). Vėliau aliejai buvo naudojami ekstremaliomis karo ir stichinių nelaimių sąlygomis (Vaitilingom *et al.* 1992). Sumažėję naftos gamybos ir perdirkimo kaštai bei pakankamai didelės jų atsargos augalinius aliejus išstūmė iš rinkos. Didele dalimi prie to prisidėjo aliejų parametrų nestabilumas, didelė jų sklaida ne tik atskiroms žaliavos rūšims, bet ir dėl taikomos gamybos technologijos. Pakartotinai prie šių degalų rūšies buvo grįžta po pirmosios naftos krizės 70-ais metais. Šiuo metu papildomu akstinu aliejų ir jų pagrindu pagamintų energetinių produktų panaudojimui yra aplinkosauginiai aspektai. Skirtingai nuo mineralinių naftos produktų, aliejai yra CO₂ emisijų atžvilgiu neutralūs,

natūraliose sąlygose suyra (degraduoja) per 15–24 paras, nėra pavojaus vandens telkinių taršai (nulinė klasė), netoksiški, labai mažas rizikos laipsnis transportuojant. Palyginus su biodyzelinu, aliejaus gamybos kaštai, neskaitant auginimo ir nuėmimo, sudaro 32 % galutinio produkto kainos, aliejui tesudaro 15 % (džiovinimą ir spaudimą). Iš aliejaus kaip degalų pranašumų reikia paminėti nesudėtingą gamybą nenaudojant nuodingų ir agresyvių medžiagų (metanolis, esterizacijos proceso priedai), o technologinio proceso metu gautos atliekos gali būti naudojamos ir kaip pašaras, ir kaip kuras. Pagal savo energetinę vertę aliejus yra efektyviausia biodegalų rūšis ir užima tarpinę padėtį tarp mineralinio dyzelino ir benzino. 1.9 lentelėje pateiktos įvairių aliejų rūšių charakteristikos, kurių įtaka degimo procesams pakankamai skirtinga.

1.9 lentelė. Fizinės ir cheminės įvairių aliejų ir dyzelio savybės (Mat *et al.* 2018, Islam *et al.* 2013)

Table 1.9. Physical-chemical characteristics of different oils and diesel (Mat *et al.* 2018, Islam *et al.* 2013)

Aliejaus rūšis / Išskastiniai degalai	Tankis (15 °C), kg/dm ³	Šiluminin-gumas, MJ/kg	Klampus (20 °C), mm ² /s	Cetani-nis skaičius	Stingimo temperatūra, °C	Užsilieps-nojimo temperatūra, °C	Aliejaus kiekis, iš-gaunamas iš hektaro, l/ha
Dyzelinas	0,84	42,7	4–6	50	–26	80	–
Rapsų	0,92	37,6	74,0	49	0...–3	317	1190
Saulėgrąžų	0,93	37,1	66,0	35	–16...–18	316	952
Sojos	0,93	37,1	63,5	38	–8...–18	350	446
Linų	0,93	37,0	51,0	52	–18...–27	–	478
Alyvuogių	0,92	37,8	83,8	37	–5...–9	–	1212
Medvilnės	0,93	36,8	89,4	41	–6...–14	320	325
Riešutų	0,91	37,2	71,0	51	–	340	482–1059
Kokosų	0,87	35,3	21,7	–	14...25	–	2689
Palmių	0,92	37,0	29,4	42	27...43	267	5950
Mikrodumblų	0,90–0,92	35,0–38,9	35,1–35,4	28–68	–5	131–260	95 000

Šiluminin-gumas, tankis, Cetaninis skaičius mažai skiriasi nuo mineralinio dyzelino ir panaudojimo kurui bei degalams požiūriu nėra ypatingai svarbūs. Eksploatacinio požiūriu tai pasireiškė nežymiai didesnėmis degalų sąnaudomis. Didžiausi skirtumai yra temperatūrinių charakteristikų srityje, kurios sąlygoja aliejų panaudojimą degalams ir yra labai svarbios. Visiems aliejams būdinga daug didesnė kinematinė klampa ir didelė jos priklausomybė nuo temperatūros. Didelė

parametrų sklaida apskunkino ir kurui naudojamo aliejaus parametrus nustatančio norminio dokumento parengimą. Nors darbai šioje srityje pradėti 1990 metais, tik 2000 metais Vokietijoje buvo patvirtintas kokybės standartas rapso aliejui naudojamam kurui bei degalams. Šio dokumento pagrindu parengtas standartas DIN 51 605 reglamentuojantis kurui naudojamo aliejaus parametrus ir jų nustatymo metodus (Ruyck *et al.* 2006). Lietuvoje šiuo metu analogiškas dokumentas nėra ruošiamas. Iki jis bus parengtas reikia vadovautis minėtu dokumentu aliejaus naudojamo energetiniams tikslams savybėms reglamentuoti. Standartas numato dvi grupes parametrų, ribines jų vertes bei nustatymo metodus. Prie pagrindinių savybių priskiriama tankis, užsidegimo temperatūra, šiluminingumas, kinematinė klampa, Cetaninis skaičius, sieros kiekis koksuojančių medžiagų kiekis. Dalis aliejų savybių priklauso nuo perdirbimo technologijos bei žaliavos rūšies ir keičiasi gana plačiose ribose. Standarte jos priskirtos kintamų savybių grupei. Tai bendras užterštumas (<24 mg/kg), rūgštingumas ($\text{pH}<2$); temperatūrinis stabilumas (>6 h esant 110 °C), fosforo kiekis (<12 mg/kg), peleningumas ($<0,01$ %) ir vandens kiekis ($<0,075$ %). Šios savybės labai svarbios deginant aliejų vidaus degimo varikliuose. Didelis aliejaus klampumas ir mažas lakumas lemia prastą aliejaus išpurškimo savybes bei sukuria palankias sąlygas kokso formavimuisi, padidina degalų siurblio apkrovą (išauga energijos poreikis, greičiau susidėvi degalų siurblys ir purkštukai) (Alptekin *et al.* 2008). Dauguma augalinių aliejų pasižymi 10–20 % mažesniu Cetaniniu skaičiumi už dyzeliną (Sidibe *et al.* 2010) bei aukšta pliūpsnio temperatūra, kuri lemia sudėtingesnę aliejaus garų užsiliepsnojamą negu dyzelino, tačiau gali būti saugiai saugoma ir transportuojama. Dauguma degalų savybių gali būti ištirtos laboratorinėmis sąlygomis, pritaikius įprastus metodus ar remiantis kiek sudėtingesniais pvz. TGA ir DSC metodais, galima nustatyti termines degalų charakteristikas. Šių metodų pritaikymas yra ypač aktualus anksčiau netirtoms degalų (aliejų) rūšims, kurios nėra gaminamos pramoniniu būdu, o turimas kiekis yra itin mažas.

Viena iš teigiamų aliejaus savybių palyginus su biodyzelinu yra tai jog jis praktiškai neveikia plastmasinių detalių ir sandariklių, mažas korozinis aktyvumas. Remiantis tuo kas išdėstyta, galima teigti, kad tiesioginis aliejaus panaudojimas kurui bei degalams įmanomas. Tam reikalinga naudoti specialios konstrukcijos variklius, pritaikyti esamas konstrukcijas arba modifikuoti aliejų priedais, kurie sumažintų dinaminę klampą ir pagerintų savybes žemų temperatūrų diapazone.

Galimi augalinių aliejų panaudojimo būdai nemodifikuotame dyzeliniame variklyje:

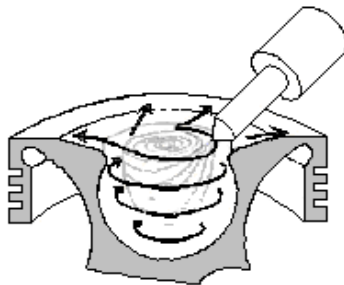
1. Gryno aliejaus naudojimas vidaus degimo varikliuose su tiesiogine ar prieškamertine įpurškimo sistemomis;

2. Aliejaus mišiniai su mineraliniu dyzelinu;
3. Aliejų kartu su jų savybes pagerinančiais priedais.

1.4.1. Vieno ir dviejų bakų sistemų pritaikymas varikliui veikiant grynu augaliniu aliejumi

Esamų variklių pritaikymas darbui su aliejumi reikalauja daug didesnių konstrukcijos pakeitimų negu pereinant darbui su biodyzelinu, kurio savybės labai artimos mineraliniam dyzelinui. Daugumoje atvejų pakanka pakeisti degalų sistemos sandariklius, degalų tiekimo vamzdelius, atlikti degalų siurblio reguliavimą kad variklis patikimai dirbtų su biodyzelinu. Iš esmės visi dyzelinų variklių tipai gali būti pritaikomi darbui su augaliniu aliejumi. Išimtį sudaro tik varikliai su skirstomuoju aukšto slėgio degalų siurbliu. Techninės informacijos analizė rodo, kad tokių firmų kaip CAV, LUCAS, STANADYNE, DELPHI, Roto-Diesel varikliai ir degalų tiekimo sistemos negali būti pritaikomos darbui su aliejumi ir tik iš dalies su biodyzelinu dėl juose naudojamų medžiagų. Netinka pritaikymui ir dyzeliniai varikliai su FAP kietų dalelių filtrais (PAS Peugeot-Citroen koncernas, Renault, Fiat). Lengviausiai pritaikomi varikliai su BOSCH firmos degalų tiekimo aparatūros sistemomis. Taip pat netinka pritaikymui trumpais ciklais dirbantys varikliai bei transporto priemonių varikliai kai dirbama trumpuose iki 20 km reisuose. Tokie varikliai per trumpą laiką nepasiekia reikiamos darbo temperatūros kad užtikrinti efektyvų degimo procesą cilindre.

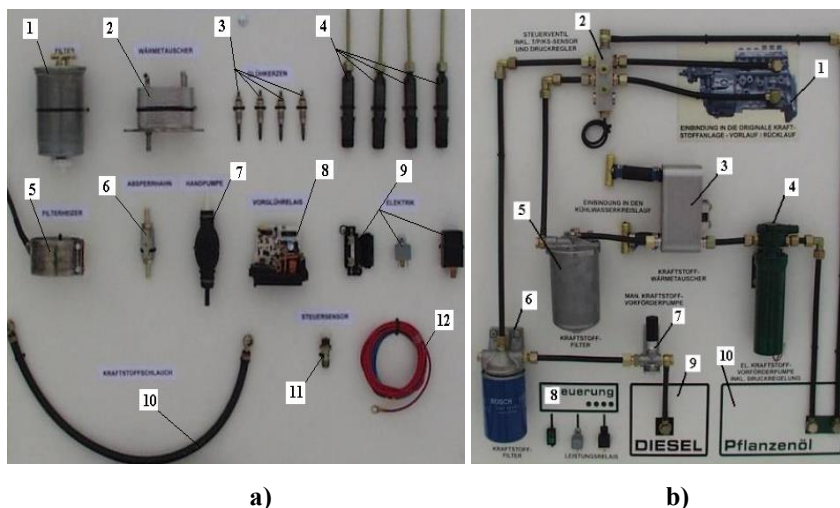
Kai taikoma vieno bako sistema, geriausi rezultatai gaunami pritaikant variklius, kurių konstrukcijoje panaudoti ELSBETT firmos konstrukciniai sprendimai. Jiems charakteringa speciali stūmoklio ir degimo kameros konstrukcija (1.5 pav.).



1.5 pav. ELSBETT konstrukcijos degimo kamera
Fig. 1.5. ELSBETT design combustion chamber

Tokioje eksperimentiškai optimizuotoje degimo kameroje pasiekiamas efektyvus degiojo mišinio sudarymas, patikimas uždegimas ir maži šilumos nuostoliai

naudojant didelio klampio degalus. Konstrukcijos atžvilgiu ELSBETT firmos varikliams artimiausi yra prieškameriniai dyzeliai. Minėtų konstrukcijų varikliuose galima naudoti vieno bako sistemą (1.6 pav. a). Variklio pritaikymas apima kaitinimo žvakių ir purkštukų pakeitimą, kurie pritaikyti darbui su klampesniais degalais bei įpurškimo momento koregavimą, atsižvelgiant į degalų Cetaninį skaičių.



1.6 pav. Įrangos komplektas variklio pritaikymui darbui su augaliniu aliejumi: a) vieno bako sistemoje (1 – papildomas degalų filtras – šildytuvas; 2 – šilumokaitis; 3 – kaitinimo žvakės; 4 – modifikuoti purkštukai; 5 – elektrinis degalų siurblys; 6 – temperatūrinė relė; 7 – rankinis degalų siurblys; 8 – elektroninis valdymo blokas; 9 – relijų komplektas; 10 – degalų pajungimo žarna; 11 – elektriniai kabeliai konstrukcijos degimo kamera). b) Dviejų bakų sistemoje (1 – degalų siurblys; 2 – degalų padavimo reguliavimo vožtuvas; 3 – aušinamo skysčio šilumokaitis; 4 – elektrinis degalų siurblys; 5 – aliejaus filtras; 6 – dyzelino filtras; 7 – dyzelino siurblys; 8 – valdymo komplektas; 9 – maža dyzelio talpa; 10 – aliejaus talpa)

Fig. 1.6. Complete set of equipment for adapting the engine to work with oils: a – one-tank system (1 – oil fuel filter, 2 – heat exchanger, 3 – glow plugs, 4 – modified fuel injectors, 5 – electric fuel pump, 6 – temperature relay, 7 – manual fuel pump, 8 – electronic control unit, 9 – relay kit, 10 – fuel hose connection, 11 – electrical cables), b – dual tank (bi-fuel) system (1 – fuel pump, 2 – fuel supply regulating valve, 3 – liquid cooled heat exchanger, 4 – electric fuel pump, 5 – oil filter, 6 – diesel fuel filter, 7 – diesel fuel pump, 8 – control unit, 9 – auxiliary diesel tank, 10 – oil tank)

Papildomai montuojamas degalų filtras bei šilumokaitis aliejaus pašildymui. Kiti variklio agregatai lieka nekeičiami. Pagrindinis šio varianto trūkumas tame, jog sistema priklausomai nuo aliejaus tirštėjimo temperatūros gali sėkmingai veikti nuo +5 iki -10 °C temperatūroje. Šis variantas negali būti taikomas „Common Rail“ tipo varikliams (CDI, HDI ir pan.).

Universalesnis yra dviejų bakų variantas (1.6 pav. b). Paleidimo metu variklis paleidžiamas naudojant mineralinį dyzeliną arba biodyzeliną, o pasiekus darbinę temperatūrą perjungiamas darbui su pašildytu aliejumi. Pritaikant variklį montuojamas papildomas bakas mineraliniam dyzelinui, aliejaus šildymo šilumokaitis, aliejaus filtras ir perjungiantis vožtuvas su valdymo automatika. Atlikti įvairiose firmose ir laboratorijose bandymai parodė, kad pašildyto iki 80 °C aliejus išpurškimas ir degalų mišinio sudarymas nesiskiria nuo mineralinio dyzelino. Tokia sistema tinka praktiškai visų tipų varikliams, įskaitant ir „Common Rail“.

1.4.2. Eksperimentinių tyrimų analizė dyzeliniam varikliui dirbant aliejumi

Gryno augalinio aliejaus panaudojimas vidaus degimo variklyje tirtas mokslininkų iš įvairių pasaulio universitetų ir mokslo centrų, įvertinant eksploatacines ir aplinkosaugines keturtakčio viencilindrio tiesioginio įpurškimo dyzelinio variklio charakteristikas. Apibendrinti rezultatai, varikliui veikiant 1200–1800 min⁻¹ sukimosi greičiu, keičiant variklio apkrovą ($BMEP_{min} - BMEP_{max}$) pateikti 1.10 lentelėje. Tyrejai pastebėjo, kad pašildyto aliejaus klampa tapo beveik identiška mineralinio dyzelino klampai, pasinaudodami šiuo privalumu didžiąją dalį eksperimentinių tyrimų atliko naudojant pašildytą aliejų.

Variklio eksploatacinių ir emisinių savybių nustatymui buvo įvertinti šie parametrai: variklio apkrova, alkūninio veleno sukimosi greitis, degalų mišinio homogeniškumas, degalų fizinės–cheminės charakteristikos (klampa, šilumingumas, cetaninis skaičius), aplinkos sąlygos (temperatūra, slėgis, drėgnumas), degalų įpurškimo tipas (tiesioginis arba prieškamerinis), kurie daro didžiausią įtaką variklio darbui su aliejumi. Eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti dyzelinio variklio emisinių ir eksploatacinių charakteristikų rodiklių teigiamu arba neigiamu pokyčiu, priimant VDV darbą su mineraliniu dyzelinu kaip atskaitos tašką.

Degalų sąnaudos. Eksperimentinių tyrimų metu užfiksuota, kad didelis aliejaus tankis, klampumas ir mažas žemutinis šilumingumas turėjo įtakos išaugusioms degalų sąnaudoms lyginant su dyzelinu (Kalam *et al.* 2003, Pramanik *et al.* 2003, Rakopoulos *et al.* 2006). Autoriai (Murugesan *et al.* 2009) bandymų metu nustatė 4–8 % didesnes degalų sąnaudas, lyginant su mineraliniu dyzelinu.

1.10 lentelė. Nustatytos eksploatacinės ir emisinės charakteristikos dyzeliniam varikliui dirbant grynu augaliniu aliejumi

Table 1.10. The performance and emission characteristics of the diesel engine with pure vegetable oil have been determined

Aliejaus rūšis	Variklio tipas, bandymo sąlygos	Emisijų pokytis lyginant su dyzelinu	Eksploatacinių savybių pokytis lyginant su dyzelinu
1	2	3	4
Braivėlio (Jatropha) (Agarwal <i>et al.</i> 2007)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Aliejus tiekiamas nepašildytas. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1500$ aps./min	Dūmingumas ↑ CO ↑ CO ₂ ↑ CH ↑	b_e ↑ η_t ↓ T_{id} ↑
Braivėlio (Jatropha) (Agarwal <i>et al.</i> 2007)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1500$ aps./min	Dūmingumas ↑ CO ↑ CO ₂ ↑ CH ↑	b_e ↑ (mažesnės negu nepašildyto aliejaus) η_t ↓ T_{id} ↓
Rapsų (išvalytas) (Jazair <i>et al.</i> 2011)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu, be turbokompresoriaus. Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1800$ aps./min	Dūmingumas ↓ NO _x ↑ CO ↑ ($BMEP_{min}$) CO ↓ ($BMEP_{med}$, $BMEP_{max}$) CH ↓	E_e nepakito
Palmių (Ndayishimiye <i>et al.</i> 2011)	Keturaktis dyzelinis oru aušinamas vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1800$ aps./min	NO _x ↓ ($BMEP_{min}$, $BMEP_{max}$) NO _x ↑ ($BMEP_{med}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$, $BMEP_{med}$) CO ↓ ($BMEP_{max}$) CH ↓	b_e ↑ η_t ↓ E_{id} ↑
Saulėgražų (Shehata <i>et al.</i> 2011)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n_{min} - n_{max}$	NO _x ↓ CO ↑ CO ₂ ↑	b_e ↑ η_t ↓ P_e ↓ M_e ↓
Kukurūzų (Hellier <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Pastovi degalų įpurškimo pradžia ir kampas (AV atžvilgiu). Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min}$, $n = 1200$ aps./min	KD ↑ NO _x ↓ ($BMEP_{min}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$) CH ↑ ($BMEP_{min}$)	Degalų užsiliptojimo gaišties periodas ↑ Šilumos išsiskyrimas ↓
Žemės riešutų (Hellier <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Pastovi degalų įpurškimo pradžia ir kampas (AV atžvilgiu). Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min}$, $n = 1200$ aps./min	KD ↑ NO _x ↓ ($BMEP_{min}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$) CH ↑ ($BMEP_{min}$)	Degalų užsiliptojimo gaišties periodas ↓ Šilumos išsiskyrimas ↓

1.10 lentelės pabaiga

1	2	3	4
Palmių (Hellier <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Pastovi degalų įpurškimo pradžia ir kampas (AV atžvilgiu). Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min}$, $n = 1200$ aps./min	KD ↑ NO_x ↓ ($BMEP_{min}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$) CH ↑ ($BMEP_{min}$)	Degalų užsiliepsnojimo gaišties periodas ↓ Šilumos išsiskyrimas ↓
Rapsų (Hellier <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Pastovi degalų įpurškimo pradžia ir kampas (AV atžvilgiu). Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min}$, $n = 1200$ aps./min	KD ↑ NO_x ↓ ($BMEP_{min}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$) CH ↑ ($BMEP_{min}$)	Degalų užsiliepsnojimo gaišties periodas ↑ Šilumos išsiskyrimas ↓
Sojos (Hellier <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Pastovi degalų įpurškimo pradžia ir kampas (AV atžvilgiu). Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min}$, $n = 1200$ aps./min	KD ↑ NO_x ↓ ($BMEP_{min}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$) CH ↑ ($BMEP_{min}$)	Degalų užsiliepsnojimo gaišties periodas ↑ Šilumos išsiskyrimas ↓
Saulėgražų (Hellier <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Pastovi degalų įpurškimo pradžia ir kampas (AV atžvilgiu). Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min}$, $n = 1200$ aps./min	KD ↑ NO_x ↓ ($BMEP_{min}$) CO ↑ ($BMEP_{min}$) CH ↑ ($BMEP_{min}$)	Degalų užsiliepsnojimo gaišties periodas ↑ Šilumos išsiskyrimas ↓
Madukos (Sonar <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro vandeniu aušinamas variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Kintantis degalų įpurškimo slėgis. Aliejus tiekiamas nepašildytas. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1500$ aps./min	NO_x ↓ ($BMEP_{min}$) NO_x ↑ ($BMEP_{med}$, $BMEP_{max}$) CO ↓ CH ↓	b_e ↑ η_t ↓ T_{id} ↑
Madukos (Sonar <i>et al.</i> 2015)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro vandeniu aušinamas variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Kintantis degalų įpurškimo slėgis. Aliejus tiekiamas pašildytas. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1500$ aps./min	NO_x ↓ ($BMEP_{min}$) NO_x ↑ ($BMEP_{med}$, $BMEP_{max}$) CO ↓ CH ↓	b_e ↑ η_t ↓ T_{id} ↑

Pastaba: *↑ – padidėjo lyginant su dyzeliniu, ↓ – sumažėjo lyginant su dyzeliniu.

Tyrėjai (Nettles-Anderson *et al.* 2014) pastebėjo, kad tarp aliejaus šilumingumo ir degalų sąnaudų yra priešinga tendencija, kuri buvo nustatyta bandymų metu. 10–15 % mažesnis žemutinis šilumingumas už dyzelino lėmė 13–15 % išaugusias degalų sąnaudas VDV veikiant didžiausia apkrova. Autoriai (Vaitilingom *et al.* 2006, Agarwal *et al.* 2009, Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.*

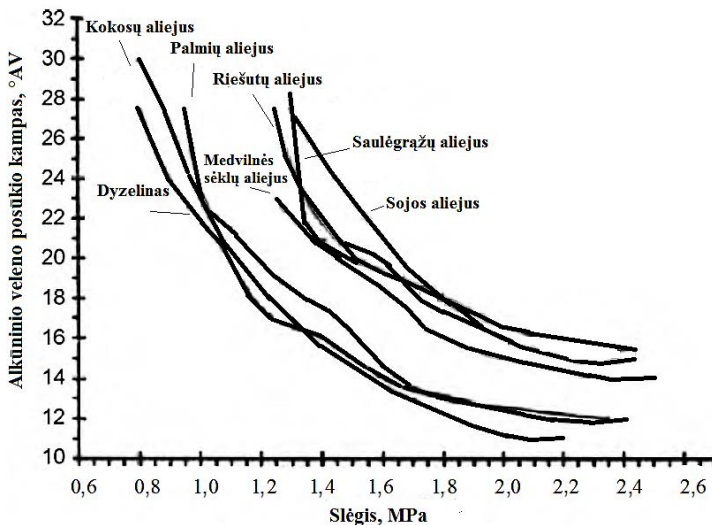
2007, Wang *et al.* 2006, Altin *et al.* 2001, Charlet *et al.* 1994, Pramanik *et al.* 2003, Vaitilingom *et al.* 2006, Vanhemelryck *et al.* 1997) tyrimuose publikavo, kad lyginamosios degalų sąnaudos mažėja didinant variklio apkrovą o aliejaus panaudojimo atveju gautos 8 % didesnės degalų sąnaudos negu dyzelino (Altin *et al.* 2001, Kalam *et al.* 2003, Wang *et al.* 2006, Pramanik *et al.* 2003). Autorius (Tsaousis *et al.* 2014) pastebėjo, kad degalų sąnaudos proporcingai mažėjo didinant variklio apkrovą, o mažiausios degalų sąnaudos pasiektos dyzeliniam varikliui veikiant didžiausia apkrova.

Variklio efektyvūs naudingumo koeficientas. Priklausomai nuo variklio darbo apkrovos ir sūkių dažnio, aliejaus naudojimo atveju terminis variklio darbo efektyvumas sumažėjo iki 10 % dėl dažnu atveju prastesnių aliejaus degimo cilindre savybių (Agarwal *et al.* 2007, Pramanik *et al.* 2003). Eksperimentiniai bandymai parodė, kad paankstinus degimo pradžią variklio efektyvūs naudingumo koeficientas išaugo iki 3 %, lyginant su dyzelinu (Knothe *et al.* 2003). Aliejui pritaikytame modifikuotame dyzeliniame variklyje (Vaitilingom *et al.* 2006) gavo geresnį variklio terminį efektyvumą negu dyzelino atveju.

Užsiliepsnojimas cilindre ir degimas. Laiko momentas nuo degalų įpurškimo iki degimo pradžios įvardinamas kaip degalų užsiliepsnojimo gaišties periodu. Tyrimais nustatyta, kad šis laiko intervalas augalinių aliejų atveju, nors ir neženkliai, bet ilgesnis negu dyzelino, dėl dažnu atveju mažesnio cetaninio skaičiaus (Vaitilingom *et al.* 1992, Narayana *et al.* 2006, Vanhemelryck *et al.* 1997). Gauti ir priešingi rezultatai, kai aliejaus naudojimo atveju dyzeliniame variklyje autoriai (Fort *et al.* 1982, Jalinier *et al.* 1988) nustatė trumpesnį degalų užsiliepsnojimo gaišties periodą negu dyzelino atveju. Pakankamai aukštas aliejaus Cetaninis skaičius ar net didesnis kaip dyzelino taip pat pasitaiko, tačiau degalų užsiliepsnojimo gaišties periodas labai priklauso nuo bandymo sąlygų, įrangos ir kitų veiksnių (Plank *et al.* 2017). Dyzeliniame variklyje panaudojus aliejų su žemesniu Cetaniniu skaičiumi negu mineralinio dyzelino (Vaitilingom *et al.* 1992) atliko bandymus, kurių metu į VDV buvo tiekiamas iki 100 °C įkaitęs oras ir gautas toks pat aliejaus užsiliepsnojimo gaišties periodas kaip ir dyzelino, o esant 500 °C gautos identiškos degalų garavimo charakteristikos (1.7 pav.).

CO emisijos. Dyzeliniam varikliui veikiant augaliniu aliejumi į aplinką išmetamų CO emisijų kiekis mažėja, o didinant variklio apkrovą anglies viendeginių kiekis mažėja dar efektyviau negu dyzelino atveju (Yilmaz *et al.* 2011, Nettles-Anderson *et al.* 2014). Padidinus VDV apkrovą iki 75 % eksperimentinių tyrimų metu gautos mažiausios CO emisijų reikšmės ir 31,6 % mažesnės negu dyzelino atveju (Wang *et al.* 2006). Didinant variklio apkrovą ir toliau CO emisijų kiekis pradeda didėti (Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Altin *et al.* 2001, Vanhemelryck *et al.* 1997, Sendzikiene *et al.* 2006). Toks CO emisijų augimas susijęs su aliejui būdinga didele klampa ir mažu lakumu, lemiančia prastesnes degimo savybes negu mineralinio dyzelino atveju. Pastebėta, kad

pašildžius aliejų jo klampa ženkliai sumažėja ir pasidaro praktiškai identiška mineraliniam dyzelinui, atitinkamai gautos labai panašios ar net mažesnės CO emisijos, lyginant su mineraliniu dyzelinu (Bari *et al.* 2002, Kalam *et al.* 2003), panaši tendencija gauta paankstinus degalų įpurškimą (Bari *et al.* 2002, Nwafor *et al.* 2000).



1.7 pav. Degalų užsiliepsnojimo gaišties periodo priklausomybė nuo slėgio skirtingoms aliejų rūšims (Vaitilingom *et al.* 1992)

Fig. 1.7. Ignition delay of the fuel dependence on the pressure for various oils (Vaitilingom *et al.* 1992)

CO₂ emisijos. Aliejaus naudojimas dyzeliniame variklyje lėmė geresnį oro pertekliaus koeficientą ypač esant padidintai nominaliai variklio galiai. Susiformavo pilnesnis degimo procesas cilindre, atitinkamai išaugo degimo temperatūra ir degimo produktų kiekis – CO₂ emisijos. Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad VDV veikiant aliejumi gautos apie 20 % didesnės CO₂ emisijos negu dyzelino atveju (Agarwal *et al.* 2007). Padidinus variklio apkrovą iki 80 % buvo užfiksuotas CO₂ emisijų kiekio sumažėjimas 6 % (Wang *et al.* 2006). Verta pažymėti, kad VDV veikiant aliejumi į aplinką išmetamas CO₂ neprisideda prie ŠESD neigiamo efekto, kadangi anglies dvideginis yra sunaudojamas aliejingų kultūrų auginimo metu.

CH emisijos. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad aliejaus panaudojimas dyzeliniame variklyje prisidėjo prie CH sumažėjimo lyginant su dyzelinu, ypač esant didelei variklio apkrovai (Kalam *et al.* 2003, Kalam *et al.* 2004, Vanhemelryck *et al.* 1997, Yilmaz *et al.* 2011, Nettles-Anderson *et al.* 2014). Tačiau

gauti ir priešaringi rezultatai, kai aliejaus pritaikymas dyzeliniame variklyje lėmė CH emisijų didėjimą mineralinio dyzelino atveju (Vaitilingom *et al.* 2006, Wang *et al.* 2006, Rakopoulos *et al.* 2006). Didesnis angliavandenilių kiekis išmetamuosiuose dūmuose susidarė dėl augaliniam aliejui būdingo mažesnio žemutinio šilumingumo, darančio įtaką prastam aliejaus išpurškimui. Degalų purkštukas prastai išpurškia aliejų, susidaro netolygus liepsnos fakelas degimo kameroje ir tam tikrose zonose prasideda riebaus mišinio zonų formavimasis, turintis tiesioginę įtaką CH emisijų susidarymui.

NO_x emisijos. Išanalizavus anksčiau atliktus tyrimus su augaliniu aliejumi pastebėta, kad beveik visais atvejais buvo užfiksuoti padidėję NO_x kiekiai lyginant su dyzelinu, tačiau (Shaheed *et al.* 1999, Almeida *et al.* 2002, Vaitilingom *et al.* 2006, Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Altin *et al.* 2001, Rakopoulos *et al.* 2006) užfiksavo priešingus rezultatus. Dyzeliniam varikliui veikiant didžiausiu apkrovimu (100 %) augaliniu aliejumi užfiksuotas 40,3 % NO_x sumažėjimas (Wang *et al.* 2006). Žemesnė aliejaus žemutinio šilumingumo reikšmė leidžia sumažinti degimo kameroje susidarancius temperatūrų pikus, kurie turi įtakos mažesnėms NO_x emisijų kiekiui išmetamuosiuose dujose (Kalam *et al.* 2003, Masjuki *et al.* 2000). Tačiau, dažnais atvejais eksperimentinių tyrimų rezultatai parodo, kad augalinio aliejaus naudojimas turi neigiamos įtakos NO_x emisijų didėjimui (Bari *et al.* 2002, Nwafor *et al.* 2003). Augalinio aliejaus degimo proceso metu degimo kameroje susiformuoja likučiai, kurie prisideda didėjant temperatūrai ir atitinkamai NO_x emisijų kiekiui. Netinkamas variklio komponentų (degalų siurblys, filtras) ar įrangos parinkimas, lemia didėjančią anglies oksidų koncentraciją išmetamosiose dujose (Yilmaz *et al.* 2011, Nettles-Anderson *et al.* 2014).

SO₂ emisijos. Praktiškai nepastebimos VDV veikiant aliejumi, todėl eksperimentiniuose bandymuose dažniausiai netgi nėra lyginamos su mineraliniu dyzelinu (Vaitilingom *et al.* 1992, Daho *et al.* 2009).

Dūmingumas. Nustatyta, kad aliejaus panaudojimas dyzeliniame variklyje turėjo teigiamos įtakos dūmingumo mažinimui, o geriausi rezultatai užfiksuoti esant žemai variklio apkrovai (Vaitilingom *et al.* 1992, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Daho *et al.* 2009).

Apašų susidarymas. Dyzeliną pakeitus aliejumi užfiksuotos nuosėdų sankaupos ant degalų purkštukų, kurios taip pat prilimpa prie degimo kameros sienelių bei stūmoklio paviršiaus (Vaitilingom *et al.* 1992, Higelin *et al.* 1992, Charlet *et al.* 1994, Rakopoulos *et al.* 2006). Autoriai (Vaitilingom *et al.* 1992, Higelin *et al.* 1992, Labeckas *et al.* 2006) pastebėjo, kad nuosėdos pirmiausiai formuojasi ant šalčiausių degimo kameros elementų – degalų purkštukų, tuomet degimo kameros sienelių, cilindro sienelių ir t. t. Nuosėdų formavimuisi ir intensyvumui didelę įtaką turi variklio konstrukcija, aliejaus fizikinės–cheminės savybės (trigliceridų kiekis) bei kokybė, priklausanti nuo aliejaus perdirbimo technologijos,

filtravimo kokybės, klampumo ir t. t. Trigliceridų kiekis aliejaus cheminėje sudėtyje lemia nuosėdų kiekį degimo proceso metu, esant mažam trigliceridų kiekiui pastebimas mažesnis nuosėdų kiekis variklio cilindre (Vaitilingom *et al.* 1992, Higelin *et al.* 1992, Charlet *et al.* 1994). Prastai išvalytas aliejus perdirbimo proceso metu taip pat lemia nuosėdų kiekio augimą ant VDV komponentų (Vaitilingom *et al.* 1992). Dauguma tyrėjų didelę aliejaus klampą ir mažą lakumą įvardino kaip vieną pagrindinių fizikinių savybių lemiančių nuosėdų formavimąsi (Rakopoulos *et al.* 2006, Ryan *et al.* 1984, Vanhemelryck *et al.* 1997, Harwood *et al.* 1984). Didelė aliejaus klampa gali visiškai užkimšti ir sugadinti degalų filtrą (Labeckas *et al.* 2006). Vienas paprasčiausių sprendimo būdų – aliejaus pašildymas, kurio metu aliejaus klampa tampa artima mineralinio dyzelino klampai, atitinkamai pagerėja degalų išpurškimo, degimo savybės ir sumažėja nuosėdų kiekis (Vaitilingom *et al.* 1992). Dėl mažo lakumo aliejus prastai garuoja, aliejaus lašeliai prilimpa prie degimo kameros sienelių ir terminio skilimo metu formuoja nuosėdas (Daho *et al.* 2009). Dyzeliniuose varikliuose su tiesioginio įpurškimo sistema degimo proceso metu užfiksuota žemesnė temperatūra negu prieškamerinio įpurškimo sistemose. Esant žemesnei temperatūrai prastai (nevisiškai) sudegusio aliejaus nuosėdos prikimba prie variklio dalių, taip formuojasi didesni nuosėdų kiekiai. Eksperimentinių tyrimų metu autoriai (Vaitilingom *et al.* 1992, Higelin *et al.* 1992, Charlet *et al.* 1994) pastebėjo, kad degimo kameroje pasiekus 500 °C temperatūrą nuosėdos nebesiformuoja. Remiantis (Daho *et al.* 2009) atliktais tyrimais nustatyta, kad aliejaus naudojimas dyzeliniame variklyje su prieškamerine degalų įpurškimo sistema nedaro jokio poveikio variklio ilgaamžiškumui. Tuo tarpu dyzeliniame variklyje su tiesioginio įpurškimo sistema aliejaus naudojimas lėmė nuosėdų atsiradimą ant degimo kameroje esančių elementų.

1.4.3. Aliejų ir jų mišinių su dyzelinu panaudojimas vidaus degimo varikliuose

Augalinius aliejus savo prigimtimi yra panašus į mikrodumblių aliejų ir yra lengvai maišomas su mineraliniu dyzelinu taip sumažinant ar visiškai panaikinant augaliniam aliejui būdingą didelę klampą. Atlikus eksperimentinių tyrimų analizę, kai augalinis aliejus buvo maišomas su mineraliniu dyzelinu įvairiomis proporcijomis (10–80 %), nustatytos variklio eksploatacinės ir aplinkosauginės charakteristikos, o rezultatai pateikti 1.11 lentelėje. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoti aplinkos temperatūros bei pašildyti degalų mišiniai.

Augalinio aliejaus ir dyzelino mišinių naudojimas padeda sumažinti aliejui būdingą didelę dinaminę klampą ir pagerina degimo savybes žemų temperatūrų diapazone. Aliejaus ir dyzelino mišinių panaudojimas buvo ištirtas keturtakčiame viencilindriame tiesioginio įpurškimo dyzeliniame variklyje, įvertinant eksploatacines ir aplinkosaugines charakteristikas, o apibendrinti rezultatai pateikti

1.112 lentelėje. Į dyzeliną įmaišius mažiau negu 30 % aliejaus gauti geresni vidaus degimo variklio parametrai negu mineralinio dyzelino atveju (Murugesan *et al.* 2009, Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Kalam *et al.* 2003, Pramanik *et al.* 2003), neatlikus jokių VDV modifikacijų.

Variklio sukimo momentas ir galingumas. Efektyvus aliejaus klampos sumažėjimas buvo pasiektas jį maišant su dyzelinu, taip pasiekiant geresnę degalų išpurškimą, kuris turi didelę įtaką emisijų mažėjimui (Demirbas *et al.* 2009). Pastebėta, kad degalų mišiniai su mažesniu kaip 20 % aliejaus kiekiu praktiškai neturėjo jokio neigiamo poveikio VDV darbui, veikė kaip su įprastu dyzelinu. Didelis aliejaus kiekis degalų mišiniuose lėmė dyzelinio variklio išvystomos galios sumažėjimą iki 10 %. Nustatyta, kad dyzeliniams varikliams dirbant degalų mišiniais su aliejumi, priklausomai nuo naudojamos aliejaus rūšies ir santykio degalų mišiniuose variklio efektyvioji galia nepakito lyginant su mineraliniu dyzelinu, sumažėjo arba padidėjo. Eksperimentinių tyrimų metu (Hazar *et al.* 2010) užfiksavo, kad variklio išvystoma galia priklausomai nuo aliejaus santykio degalų mišinyje nepakito arba sumažėjo didinant aliejaus proporciją degalų mišinyje. Autoriai (Daho *et al.* 2009, Altin *et al.* 2001, Vanhemelryck *et al.* 1997) įvardino pagrindinę priežastį nulėmusią galios sumažėjimą – aliejui būdingas mažesnis žemutinis šilumingumas ir didelė klampa. Tyrimų metu (Yusaf *et al.* 2011) buvo gauti priešingi rezultatai, kurių metu užfiksuotas variklio nominalios galios padidėjimas, proporcingai didinant aliejaus santykį degalų mišinyje. Autoriai (Nagaraja *et al.* 2015) bandymų metu patvirtino, kad variklio galia padidėjo naudojant degalų mišinį su aliejumi negu tuo atveju, kai buvo naudojamas mineralinis dyzelinas. Būtina pažymėti, kad eksperimentinių tyrimų metu naudoti pašildyti degalų mišiniai su aliejumi, leidę sumažinti aliejaus klampą.

Variklio efektyvusis naudingumo koeficientas. Tyrimų metu užfiksuota, kad didinant aliejaus santykį degalų mišiniuose variklio efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėjo lyginant su dyzelinu (Pandey *et al.* 2012, Uddin *et al.* 2015). Autoriai (Agarwal *et al.* 2007, Agarwal *et al.* 2008, Rakopoulos *et al.* 2006) eksperimentinių bandymų metu nustatė, kad degalų mišiniuose su aliejumi variklio efektyvusis naudingumo koeficientas nepakito ar netgi išaugo lyginant su mineraliniu dyzelinu. Maža variklio apkrova, naudojant degalų mišinį su aliejumi, turėjo teigiamos įtakos variklio efektyviajam naudingumo koeficientui, kuris lyginant su dyzelinu išaugo.

Degalų sąnaudos. Lyginamosios degalų sąnaudos didėjo priklausomai nuo aliejaus kiekio degalų mišiniuose (Daho *et al.* 2009), didžiausias skirtumas gautas esant vidutinei variklio apkrovai (50–75 %). Agarwal *et al.* (2007) teigia, kad mažesnis žemutinis šilumingumas yra pagrindinė degalų sąnaudų didėjimo priežastis. Aliejaus santykis degalų mišinyje proporcingai prisideda prie išaugusių degalų sąnaudų lyginant su mineraliniu dyzelinu. Pastebėta, kad degalų sąnaudos praktiškai nepakito, kai aliejaus santykis degalų mišinyje neviršijo 5 %.

1.11 lentelė. Nustatytos eksploatacinės ir emisinės charakteristikos dyzeliniam varikliui dirbant su augalinio aliejaus ir dyzelino mišiniais

Table 1.11. The performance and emission characteristics of the diesel engine with blends of vegetable oil and diesel have been determined

Aliejaus rūšis ir santykis (%) degalų mišinyje	Variklio tipas, bandymo sąlygos	Emisijų pokytis lyginant su dyze- linu	Eksploataci- nių savybių pokytis lygi- nant su dyze- linu
1	2	3	4
Rapsų sėklų <i>Aliejaus san- tykis 20–50 %</i> (Hazar <i>et al.</i> 2010)	Keturtaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{max}$, $n_{min}-n_{max} \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 20 %</u> Dūmingumas ↑ NO _x ↓ CO ↓	Me ↓ Pe nepakito be ↑ T _{id} ↑
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 50 %</u> Dūmingumas ↑ NO _x ↓ CO ↓	Me ↓ Pe ↓ be ↑ T _{id} ↑
Rapsų sėklų <i>Aliejaus san- tykis 20–50 %</i> (Hazar <i>et al.</i> 2010)	Keturtaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu be turbokompresoriaus. Aliejus tiekiamas pašil- dytas iki 100 °C. $BMEP_{max}$, $n_{min}-n_{max} \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 20 %</u> Dūmingumas ↓ NO _x ↓ CO ↓	Me ↓ Pe ↓ be ↑ T _{id} ↑
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 50 %</u> Dūmingumas ↓ NO _x ↑ (n_{min}, n_{med}) NO _x ↓ (n_{max}) CO ↓	Me ↓ Pe ↓ be ↑ T _{id} ↑
Kaučiukme- džio <i>aliejaus santy- kis 20–80 %</i> (Ramadhas <i>et al.</i> 2005)	Keturtaktis dyzelinis vieno cilindro vandeniu aušinamas variklis su tiesioginiu degalų įpurš- kimu. $BMEP_{min}-BMEP_{max}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 20–40 %</u> Dūmingumas ↑ ($BMEP_{max}$)	η_t ↑ ($BMEP_{med}$) η_e ↓ ($BMEP_{max}$)
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 60 %</u> Dūmingumas ↓ ($BMEP_{max}$)	be ↑ η_t ↓ ($BMEP_{max}$) T _{id} ↑
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 80 %</u> Dūmingumas ↓ ($BMEP_{max}$)	be ↑ η_e ↓ T _{id} ↑
Palmių <i>Aliejaus san- tykis 10–20 %</i> (Nagaraja <i>et al.</i> 2015)	Keturtaktis vandeniu aušinamas vieno ci- lindro dyzelinis variklis Aliejus tiekiamas pašil- dytas iki 90 °C. $BMEP_{max}$, $SL_{min}-SL_{max}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	CO ↓ (SL_{min}, SL_{max}) CO nepakito (SL_{med}) CO ₂ ↑ CH ↓	Pe ↑ T _{id} ↓

1.11 lentelės tęsinys

1	2	3	4
Kukurūzų <i>Aliejaus santykis 10–20 %</i> (Rakopoulos et al. 2006)	Keturtaktis dyzelinis „Ricardo/Cussons“ variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{med} - BMEP_{max}$, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↑ $NO_x \downarrow$ $CO \uparrow$ $CH \uparrow$	$b_e \uparrow$ $\eta_t \uparrow$ ($BMEP_{med}$) $\eta_t \downarrow$ ($BMEP_{max}$)
Rapsų <i>Aliejaus santykis 5–20 %</i> (Roy et al. 2013)	Keturtaktis dyzelinis dviejų cilindrų variklis be turbokompresoriaus. $BMEP = 10–15 \%$ $n = 1200–1800 \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 5 %</u> NO_x nepakito $CO \downarrow$ $CH \downarrow (n_{min}, n_{med})$ $CH \uparrow (n_{max})$	b_e nepakito
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 10 %</u> $NO_x \uparrow$ $CO \downarrow$ $CH \downarrow (n_{min})$ CH nepakito (n_{med}) $CH \uparrow (n_{max})$	$b_e \uparrow$
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 20 %</u> $NO_x \uparrow$ $CO \downarrow (n_{min}, n_{med})$ CO nepakito (n_{max}) CH nepakito (n_{min}, n_{med}) $CH \uparrow (n_{max})$	$b_e \uparrow$
Linų sėmenų <i>Aliejaus santykis 10–50 %</i> (Agarwal et al. 2007)	Keturtaktis vandeniui aušinamas vieno cilindro dyzelinis variklis $BMEP_{mir} - BMEP_{max}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 10–30 %</u> Dūmingumas ↓	$b_e \uparrow$ η_t nepakito E_c nepakito
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 50 %</u> Dūmingumas ↑	$b_e \uparrow$ η_t nepakito E_c nepakito
Palmių <i>Aliejaus santykis 25–75 %</i> (Yusaf et al. 2011)	Keturtaktis vandeniui aušinamas keturių cilindrų variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. Aliejus tiekiamas pašildytas iki 60 °C. $BMEP_{mir} - BMEP_{max}$, $n_{min} - n_{max} \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 25 %</u> $CO \uparrow (n_{min}, n_{med})$ $NO_x \downarrow (n_{min})$ $NO_x \uparrow (n_{max})$	$M_e \uparrow (n_{med})$ $P_e \downarrow (n_{min})$ $b_e \uparrow$ $T_{id} \uparrow$
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 50 %</u> $CO \uparrow (n_{min}, n_{med})$ $NO_x \downarrow (n_{min})$	$M_e \uparrow (n_{med})$ $P_e \uparrow (n_{min})$ $b_e \uparrow$ $T_{id} \uparrow$
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 75 %</u> $CO \uparrow (n_{min}, n_{med})$ $NO_x \downarrow (n_{min})$	$M_e \uparrow (n_{med})$ $P_e \uparrow (n_{min})$ $b_e \uparrow$ $T_{id} \downarrow (n_{max})$
Ryžių sėlenų <i>Aliejaus santykis 10–30 %</i> (Agarwal et al. 2008)	Keturtaktis vandeniui aušinamas vieno cilindro dyzelinis variklis $BMEP_{mir} - BMEP_{max}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↓ ($BMEP_{max}$)	$b_e \uparrow$; $\eta_t \uparrow$ ($BMEP_{min}$) η_t nepakito ($BMEP_{max}$) $E_c \downarrow$

1.11 lentelės pabaiga

1	2	3	4
Saulėgražų <i>Aliejaus santykis 10–20 %</i> (Rakopoulos et al. 2006)	Keturaktis dyzelinis „Ricardo/Cussons“ variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{med} - BMEP_{max}$, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↑ NO_x ↓ CO ↑ CH ↑ ($BMEP_{med}$) CH nepakito ($BMEP_{max}$)	b_e nepakito η_t ↑
Sojos <i>Aliejaus santykis 10–20 %</i> (Rakopoulos et al. 2006)	Keturaktis dyzelinis „Ricardo/Cussons“ variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{med} - BMEP_{max}$, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↑ NO_x ↓ CO ↑ CH ↑ ($BMEP_{med}$) CH nepakito ($BMEP_{max}$)	b_e ↑ η_t ↑ ($BMEP_{med}$) η_t ↓ ($BMEP_{max}$)
Medvilnės sėklų <i>Aliejaus santykis 10–20 %</i> (Rakopoulos et al. 2006)	Keturaktis dyzelinis „Ricardo/Cussons“ variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{med} - BMEP_{max}$, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↑ NO_x ↓ CO ↑ CH ↑ ($BMEP_{med}$)	b_e ↑ η_t ↑ ($BMEP_{med}$) η_t ↓ ($BMEP_{max}$)
Alyvuogių <i>Aliejaus santykis 10–20 %</i> (Hazar et al. 2010)	Keturaktis dyzelinis „Ricardo/Cussons“ variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu. $BMEP_{med} - BMEP_{max}$, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↑ NO_x ↓ CO ↑ CH ↑ ($BMEP_{med}$)	b_e nepakito η_t ↑
Madukos <i>Aliejaus santykis 10–30 %</i> (Agarwal et al. 2007)	Keturaktis vandeniu aušinamas vieno cilindro dyzelinis variklis $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	Dūmingumas ↓ ($BMEP_{max}$)	b_e ↑ η_t ↑ ($BMEP_{min}$) η_t nepakito ($BMEP_{max}$)
Indinės miltijos <i>Aliejaus santykis 10–50 %</i> (Agarwal et al. 2013)	Keturaktis dyzelinis vieno cilindro variklis su tiesioginiu degalų įpurškimu Aliejus tiekiamas pašildytas iki 100 °C. $BMEP_{min} - BMEP_{max}$, $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	<u>Aliejaus santykis mišinyje 10 %</u> Dūmingumas ↓ NO_x ↑ ($BMEP_{min}$, $BMEP_{med}$) NO_x nepakito ($BMEP_{max}$) CO nepakito ($BMEP_{min}$, $BMEP_{med}$) CO ↓ ($BMEP_{max}$) CH ↓	b_e ↑ T_{id} ↑ η_t ↓
		<u>Aliejaus santykis mišinyje 20–50 %</u> Dūmingumas ↓ NO_x ↑ CO ↓ CH ↓	b_e ↑ T_{id} ↑ η_t ↓

Pastaba: *↑ – padidėjo lyginant su dyzelinu, ↓ – sumažėjo lyginant su dyzelinu.

CO emisijos. VDV veikiant maža apkrova degalų mišiniais su aliejumi fiksuotos mažesnės CO emisijos lyginant su dyzelinu. Padidinus variklio apkrovą iki vidutinės (60–80 %) CO emisijos degalų mišinių atveju išliko mažesnės negu dyzelino, tačiau didinant variklio apkrovą ir toliau CO emisijų lygis pradėjo didėti iki kol pasiekė didžiausią 100 % variklio apkrovą (Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006).

CO₂ emisijos. Išmetamuosiose dujose susidaręs anglies dvideginio kiekis yra panašus kaip ir dyzelino arba šiek tiek didesnis (Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Altin *et al.* 2001). Autoriai (Wang *et al.* 2006) pateikė eksperimentinių tyrimų rezultatus, kuriuose akivaizdžiai matyti, kad deguonis, esanti aliejaus molekulėse lemia visišką degalų mišinio su aliejumi degimo procesą ir atitinkamai išaugusį CO₂ emisijų išsiskyrimą į aplinką negu dyzelino atveju. Aliejingų degalų sąnaudos lyginant su mineraliniu dyzelinu didesnės, į degimo kamerą įpurškiamą didesnę degalų porciją ir proporcingai didėja CO₂ emisijų kiekis.

CH emisijos. Remiantis (Kalam *et al.* 2003, Nwafor *et al.* 1996) atliktais tyrimais galima teigti, kad CH emisijos yra ženkliai mažesnės už dyzeliną, kai naudojami degalų mišiniai su aliejumi. Visgi buvo gauti ir priešingi rezultatai, kai aliejaus mišinių naudojimas lėmė išaugusias CH emisijas (Agarwal *et al.* 2007).

NO_x emisijos. Atlikus bandymus VDV, naudojant degalų mišinius su aliejumi nustatyta mažesnė NO_x emisijų koncentracija išmetamuosiuose dujose negu naudojant gryną dyzeliną (Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Hazar *et al.* 2010, Rakopoulos *et al.* 2006, Yusaf *et al.* 2011). Tokia NO_x emisijų formavimosi tendencija priklauso nuo degimo produktų temperatūros – kuo ji aukštesnė tuo NO_x emisijos yra didesnės. Pažymėtina, kad gauti ir priešingi rezultatai būdingi gryną aliejų pritaikymo dyzeliniuose varikliuose atveju, kai NO_x emisijų kiekis buvo didesnis negu varikliui veikiant įprastais degalais – mineraliniu dyzelinu (Agarwal *et al.* 2013, Roy *et al.* 2013, Hazar *et al.* 2010).

1.4.4. Aliejų fizikinių-cheminių savybių gerinimui skirti priedai

Tyrėjai (Fontaras *et al.* 2011, Corsini *et al.* 2015, Misra *et al.* 2010, Silvio *et al.* 2002, Bari *et al.* 2002) dyzelinių variklių eksperimentiniuose tyrimuose pritaikę gryną augalinį aliejų pastebėjo, kad dėl didelio aliejaus klampumo suprastėja degalų išpurškimo savybės, kurios lemia prastesnes degimo sąlygas negu mineralinio dyzelino atveju. Susidaro nevisiško degimo sąlygos bei pradeda formuotis anglies sankaupos ant degalų purkštukų, cilindro sienelių, stūmoklio žiedų ir t. t. (Senthur *et al.* 2018). Todėl (Bari *et al.* 2002) pasiūlė augalinį aliejų pašildyti iki 92 °C ir eliminuoti dešimteriopai didesnę aliejaus klampą negu mineralinio dyzelino. Kitas būdas – naudoti priedus, kurie sumažintų aliejaus klampą jo nešildant.

Alkoholiai. Augalinio aliejaus sumaišymas su alkoholiais leidžia sumažinti aliejaus klampą ir tankį, bei pagerina lakumą. Reikėtų pažymėti, kad alkoholiai

sunkiai tirpsta gryname aliejuje, todėl jų sumaišymas negali būti atliktas greitai. Emulsiklių naudojimas pagerina alkoholių tirpimo ir susimaišymo su aliejumi savybes bei padidina degalų mišinio stabilumą. Nustatyta, kad alkoholių sumaišymas su augaliniu aliejumi pagerino dyzelinio variklio degalų sąnaudų rodiklius, tačiau nepasiekė lygio, kuomet naudojamas mineralinis dyzelinas. Kai alkoholio koncentracija aliejaus mišinyje neviršija 50 %, gaunamos mažesnės degalų sąnaudos, tačiau viršijus 50 % ribą degalų sąnaudos išauga, dėl galimai sumažėjusio Cetaninio skaičiaus vertės. Alkoholiai turintys trumpas chemines grandines (metanolis ir etanolis) turi mažesnę Cetaninį skaičių kaip pvz. n-butanolis. Įvertinus anksčiau atliktus tyrimus galima teigti, kad augalinio aliejaus ir alkoholio mišiniai prisideda prie kiek išaugusių CO ir CH emisijų kiekio lyginant su dyzelinu, bet pastebėtas sumažėjimas lyginant su grynu augaliniu aliejumi (Sharzali *et al.* 2018).

N-butanolis. Vienas dažniausiai naudojamų priedų – n-butanolis, kurio dėka aliejus yra sklandžiai išpurškiamas per standartinius degalų purkštukus skirtus mineraliniam dyzelinui, susidaro pilnesnio degimo sąlygos bei ženkliai sumažėja nuosėdos ant variklio detalių. N-butanolio koncentracija aliejuje turi didelės įtakos emisijų susidarymui: 5–10 % n-butanolio priedas aliejuje leidžia sumažinti CO emisijas, bet atitinkamai išauga NO_x emisijų lyginant su dyzelinu, 20 % n-butanolio lemia didesnes CO ir CH emisijas, bet sumažėjusį dūmingumą, išmetamųjų dujų temperatūrą ir NO_x emisijas lyginant su dyzelinu (Atmanli *et al.* 2016, Nadir *et al.* 2014, Yilmaz *et al.* 2014, Dogan *et al.* 2011). Užfiksuota, kad n-butanolio kiekis aliejuje prisideda prie išaugusių degalų sąnaudų. Butanolis kaip degalų priedas turi daug pranašumų lyginant su etanoliumi ar metanoliumi dėl didesnio Cetaninio skaičiaus, mažesnės garavimo temperatūros, didesnio žemutinio šilumingumo, galimybės panaudoti didelę koncentraciją degalų mišinyje nepakenkiant dyzelinio variklio eksploatacinėms savybėms (Rakopoulos *et al.* 2011).

Antioksidantai. Antioksidantų kaip priedų panaudojimas leidžia sumažinti išmetamųjų dujų emisijas, pagerina degalų saugojimo (laikymo) galimybes bei sumažina degalų degradaciją. Fenoliniai antioksidantai: tret-butylhidrochinonas, beta hidroksi rūgštis, butilintas hidroksitoluenas dažniausiai naudojami degalų degradacijos kontrolei, padidėja stabilumas oksidacijai, tačiau užfiksuotas ženklus NO_x emisijų sumažėjimas bei dūmingumo, CO ir CH emisijų padidėjimas (Varatharajan *et al.* 2013, Varatharajan *et al.* 2011, Rashedul *et al.* 2015). Tyrimų metu nustatyta, kad antioksidantai paspartina degalų užsiliepsnojamą, tokiu būdu sutrumpėja degalų užsiliepsnojimo gaišties periodas. Užfiksuotas efektyvusis variklio nominalios galios bei variklio efektyviojo naudingumo koeficiento padidėjimas bei lyginamųjų degalų sąnaudų sumažėjimas. Autorius (Ryu *et al.* 2010) apibendrina antioksidentus ir jų panaudojimo galimybes kaip degalų priedus pagal jų efektyvumą: tret-butylhidrochinonas > butilintas hidroksianisolas > butilintas hidroksitoluenas.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Nustatyti transporto subsektoriai, kuriems alternatyvos kaip mažinti taršą ir priklausomybę nuo iškastinio kuro vis dar nerastos pasauliniu mastu. Tai oro transportas, jūrų ir vidaus vandenų transportas, bei karinių pajėgų disponuojamos motorizuotos kelių ir bekelės transporto priemonės.
2. Apžvalginiai tyrimai leidžia teigti, kad visiems be išimties išnagrinėtiems transporto sektoriams, įskaitant aviaciją, alternatyvūs degalai gali būti gaminami iš aliejingųjų mikrodumplių rūšių biomasės. Mikrodumplių aliejaus naudojimas kelių transporte leistų tokius automobilius priskirti „CO₂ neutraliems“, įvertinus visą auginimo ir perdirbimo procesą, ko negalima pasakyti apie biodyzelino naudojimą.
3. Nustatyta, kad nuo 2007 metų buvo vykdyta daug pilotinių projektų, susijusių su mikrodumplių auginimu ir tolimesniu jų pakeitimu į biodegalus. Dalis jų buvo nesėkmingi dėl gauto neigiamo energijos balanso, kurį lėmė didelės energijos sąnaudos, patirtos šaltesnio klimato zonose esančiose Europos šalyse apdirbant pramoninėms priskiriamas mikrodumplių rūšis. Tai suponuoja būtinybę ieškoti sinergijų įvairiose gamybos pakopose bei aktyviau vykdyti kitų, ne pramoninės paskirties, aliejingųjų mikrodumplių rūšių tyrimus.
4. Galimai dėl plačiose ribose varijuojančių aliejų charakteristikų, iki 2017 metų išspausdintų mokslinių publikacijų apie įvairių mikrodumplių aliejų daromą poveikį VDV eksploatacinėms bei emisinėms charakteristikoms rasti pavyko tik keletą. Ši sritis yra itin menkai ištyrinėta ir savyje turinti daug potencialo naujų žinių sukūrimui pramonės sektorių plėtrai netolimoje ateityje. Taip pat trūksta patikimos mokslinės informacijos apie tokių biodegalų sandėliavimo metu vykstančio garavimo proceso intensyvumą bei jo atitikimą saugos normoms.
5. Čilės Respublikos patirtis į kogeneracinės jėgainės procesą integruoti CO₂ biologinę gaudyklę leido pasiekti visuotinai priimtinus „darumo“ ir „švaresnės gamybos“ kriterijus. Tai praktiškai beatliekinė ir aplinkos neteršianti technologija, kurios pagrindu gauti produktai yra skirti transporto ir energetikos sektoriams.

Atsižvelgiant į šio skyriaus išvadas, tikslui pasiekti buvo iškelti šie uždaviniai:

1. Tiriamoms degalų rūšims eksperimentiškai ištirti ir charakterizuoti energijos virsmus, fazinius pokyčius ir terminį irimą degimo ir pirolizės procesų metu nustatyti šias charakteristikas: virimo tašką, užsiliepsnojimo temperatūrą, terminį stabilumą, apskaičiuotąjį Cetaninį indeksą ir riebalų rūgščių sudėtį.
2. Remiantis gautais laboratoriniais tyrimų rezultatais atlikta mikrodumplių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu šilumos išsiskyrimo cilindre palyginamoji analizė, naudojant AVL BOOST programinį paketą.
3. Eksperimentiškai ištirti mikrodumplių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu įtaką slėginio uždegimo variklio apkrovos charakteristikai esant aktyviam ir neaktyviam išmetamųjų deginių recirkuliaciniam vožtuvui, reguliavimo charakteristikai esant skirtingam degalų įpurškimo paskubos kampui ir greituminei charakteristikai.
4. Remiantis gautais eksperimentinių tyrimų rezultatais pasiūlyti geriausias reguliavimo charakteristikas nemodifikuoto VDV veikimui žemos apkrovos režime su mikrodumplių aliejumi ir jo mišiniais su mineraliniu dyzelinu.

2

Eksperimentinių tyrimų metodologija ir degalų terminės analizės rezultatai

Skyriaus tematika paskelbtos dvi publikacijos (Raslavičius *et al.* 2019 ir Raslavičius *et al.* 2018).

2.1. Tyrimams naudoti degalai ir jų paruošimas

Eksperimentiniams tyrimams naudotos šios degalų rūšys:

Gryni (baziniai) degalai (2.1 pav.):

- a) Aukšto išvalymo laipsnio mikrodumblių *Prototheca moriformis* aliejus (PMA100), įsigytas iš JAV, atitinkantis standartą ASTM D 6751.
- b) Mineralinis dyzelinas (D100), neturintis biodegalų priedų savo sudėtyje ir atitinkantis standartą LST EN 590:2014 (A priedas A.1 pav.).
- c) Mikrodmblių aliejaus riebalų rūgščių metilo esteris (PMME100), peristerintas KTU cheminės technologijos fakultete, Organinės chemijos

katedroje. PMME100 ir jo mišiniai su mikrodumblių aliejumi ir mineraliniu dyzelinu buvo naudoti tik termogravimetrinės analizės tyrimuose.

Degalų mišiniai:

- a) Šeši degalų mišiniai, sudaryti iš bazinių rūšių, santykiu 30/70 ir 70/30 pagal tūrį: PMA30/D70, PMME30/D70, PMA30/PMME70, PMA70/D30, PMME70/D30, PMA70/PMME30, skirti variklio stendiniams bandymams.
- b) Vienas degalų mišinys, sudarytas iš D100 ir PMA100, santykiu 50/50 pagal tūrį (PMA50/D50), skirtas automobilio variklio eksploatacinių charakteristikų nustatymui.



2.1 pav. Tyrimams naudotos bazinės degalų rūšys

Fig. 2.1. Basic fuels used for investigations

Degalų terminės analizės tyrimams buvo naudotos anksčiau pateiktos devynios degalų rūšys. Degalai buvo laikomi 25 ml laboratoriniuose stikliniuose DURAN® buteliukuose (ISO 4796–2:2000, padalos vertė 5 ml, paklaida $\pm 10\%$) su kamščiu, apsaugant juos nuo garavimo ir tiesioginių saulės spindulių. Degalų mišiniai buvo dozuojami 1 ml pipete (padalos vertė 0,25 ml, ilgis 153 mm). Visiems degalų mišiniams naudotos atskiros pipetės.

Visos degalų rūšys, naudotos varikliniams bandymams buvo saugomos plastikinėse graduotose 30 litrų talpos induose su užsukamu dangčiu. Mišinių komponentai dozuoti iš polipropileno pagamintais A klasės matavimo indais (500 ± 5 ml tūrio, padalos vertė 10 ml). Mišinių homogeniškumui užtikrinti 30 litrų talpos buvo intensyviai purtomos apie 10 minučių, likus vienai valandai iki VDV stendinių bandymų pradžios. Visoms nagrinėtoms degalų rūšims naudotos naujos talpos, o bazinės rūšys saugotos neapšviestoje patalpoje, kambario temperatūroje.

Aliejaus peresterinimas etanolio į biodyzeliną. Mikrodumblių aliejaus riebalų rūgščių metilo esteris (biodyzelinas, PMME100), išgautas peresterinimo etanolio procesu. Biodyzelino sintezė atlikta apvalaus dugno $250 \pm 0,12$ ml laboratorinėje

kolboje, maišant magnetine maišykle *Agimatic-Rev-TFT* su kaitinimo funkcija. Kolba kaitinta glicerolio vonelėje. Laboratorinio indo kaklelis buvo sujungtas su vandeniu aušinamu grįžtamuju kondensatoriumi. Biodyzelino gamybos procesui naudota $80 \pm 0,08$ g aukšto išvalymo laipsnio mikrodumplių aliejaus, $34,13 \pm 0,05$ g metanolio ir $0,8 \pm 0,006$ g natrio šarmo (apytiksliai 1 % aliejaus masės). Cheminė reakcija truko 120 min., esant pastoviai 65 °C temperatūrai ir intensyviai maišymui. Gauta mišinio skystoji fazė perskirstyta dalomajame piltuve, o mažesnio tankio (viršutinė) fazė pakartotinai praplauta distiliuotu vandeniu (2 kartus po 80 ml). Praplauta glicerolio fazė vėliau išdžiovinta bevandeniu magnio sulfatu (MgO_4S) ir išfiltruota. 80 g mikrodumplių aliejaus perestirenimo etanoliumu metu gauta $65 \pm 0,08$ g biodyzelino.

2.2. Degalų fizikinių-cheminių charakteristikų nustatymas

PMA100 ir biodyzelino riebalų rūgščių sudėtis (% masės) nustatyta vadovaujantis LST EN ISO5508 standartu. Laboratorinių bandymų rezultatai pateikti A priede A.2 ir A.3 paveiksluose. Šių degalų rūšių žemutinių ir viršutinių šilumingumų reikšmės nustatytos KTU Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto laboratorijoje, naudojant IKA C5000 kalorimetrą ir vadovaujantis standartu EN 14 918. KTU Šilumos ir atomo energetikos katedoroje taip pat nustatytas minėtų degalų rūšių tankis, esant 15 °C (LST EN ISO 12185, ASTM D 4052). Gauti duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Bazinių degalų fizikinės-cheminės charakteristikos

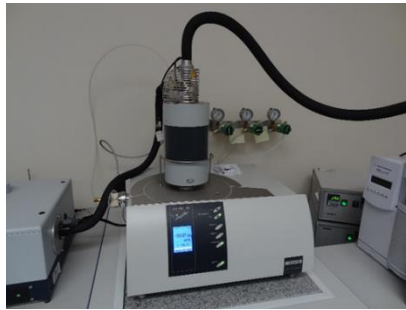
Table 2.1. Physical-chemical characteristics of basic types of fuel

Parametrai	D100	PMME100	PMA100
Cheminė elementinė sudėtis, %	86,20 C, 13,00 H, 0 O	77,61 C, 12,03 H, 10,36 O	77,81 C, 11,71 H, 10,48 O
Tankis, esant 15 °C temperatūrai, kg/m^3	834,5	879,5	915,8
Plūpsnio temperatūra, °C	67	165	227±5
Klampa, esant 40 °C temperatūrai, mm^2/s	2,286	4,873	5,287
Žemutinis šilumingumas, MJ/kg	42,80	36,86±2,717	33,80±0,421
Viršutinis šilumingumas, MJ/kg	44,80	39,01±2,853	36,65±0,382
CS/CI (reglamentuota)	51,0/46,0*	ne	ne
CS/CI (nustatyta)	52,4/50,0*	61,0**/-	55,6***/-

Pastaba: * UAB AVE–MATROX ir Neste OYJ Oil Refining sertifikato duomenys (A priedas A.1 pav.), ** Franklin *et al.* 2012, *** Tsaousis *et al.* 2014

2.3. Termogravimetrinės analizės ir diferencinės skenavimo kalorimetrijos eksperimentų planavimas

Degalų tyrimai naudojant TGA ir DSC metodus atlikti Lietuvos energetikos instituto Degimų procesų laboratorijoje. Terminė analizė ir gautų duomenų apdorojimas atlikti naudojant *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* su *SiC* įrenginį (2.2 pav.), kuomet buvo stebimas degalų masės praradimas didėjant aplinkos temperatūrai dėl bandinio terminio irimo ir garavimo.



2.2 pav. *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* įrenginys su *SiC* krosnimi
Fig. 2.2. *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* equipment with *SiC* furnace

TGA ir DSC tyrimams atlikti mėginiai buvo komponuojami iš skystos ir kietos (Al_2O_3 milteliai) dedamųjų. Degalai dozuoti specialia 1 ml pipete (padalos vertė – 0,25 ml, ilgis 153 mm), o aliuminio oksido milteliai smulkiai susmulkinti grūstuvėje. Sumaišius dvi dalis gautas tirštas mišinys, neleidžiantis degalams pasiekti jiems įprastai būdingų virimo temperatūrų.

Mėginiai buvo sveriami naudojant *Semi-Micro Denver Instrument PI-225D* svarstyklės, kurių tikslumas $\pm 0,0001$ g. Nagrinėtų mėginių masė – 100 mg, o sudėtis – 58 % Al_2O_3 ir 42 % degalai. Racionalus komponentų santykis 58/42, nustatytas priartėjimų keliu, kuomet maišant santykiais (30/70, 50/50, 55/45) gauta per skysta mėginio konsistencija, o 60/40 – per tiršta. Mėginių svėrimui naudotos hermetinės svarstyklės, kurios leido išvengti oro srauto įtakos rodmenų tikslumui. Aliuminio oksido miltelių dozavimui naudotas laboratorinis špatelis (ilgis – 180 mm, galo su grioveliu plotis 8 mm, plokščiojo galo plotis – 9 mm). Tiksliai sudozavus komponentus mėginio masė buvo maišoma apie 3 minutes špatelio plokščiuoju galu, kad įgautų klampią konsistenciją. Iš sumaišytos mėginio masės kiekvieną kartą imtas 15 mg kiekis, kuris buvo dedamas į tiglą, galintį atlaikyti iki 1750 °C išaugantį karštį. Mėginio masė paskirstyta po dugną taip, kad tiglio dug-

nas būtų tolygiai padengtas degalų ir aliuminio oksido mišiniu. Tuomet tигlis uždengiamas 6,8 mm skersmens dangteliu ir patalpinamas į termoanalizatoriaus krosnį sumontuotą ant *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* įrenginio viršaus (2.2 pav.). Krosnies ertmė padengta karščiui atspariu silicio karbidu. Į įrenginio operacinę sistemą būdavo įvedama tiksli mėginio masė, o krosnies vidinės svarstyklės fiksuodavo masės praradimo greitį didėjant temperatūrai. Degalų mėginiai analizuoti pirolizės proceso metu azoto aplinkoje (N_2 dujų tiekimo greitis 60 ml/min) ir degimo proceso metu deguonies–azoto aplinkoje (O_2 padavimo greitis 25 ml/min, N_2 – 35 ml/min). Eksperimentų metu krosnies temperatūra buvo didinama nuo 20 °C iki 900 °C, 10 °C/min greičiu.

2.3.1. Degalų virimo ir užsiliepsnojimo temperatūrų nustatymas

Terminės analizės *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* įrangą palaikantis programinis paketas turi integruotą funkciją, leidžiančią išskaičiuoti mėginių virimo temperatūrą TGA ir DSC eksperimentų metu, naudojant liestinių metodą. Ši metodika aprašyta (Santander *et al.* 2012) tyrimams vykdyti, taikant termogravimetrinės analizės TGA metodą, kuris išskirtinai taikomas riebalų rūgščių etilo ir metilo esteriams bei trigliceridams. Pirma liestinė yra brėžiama per atitinkamą degalų rūšį charakterizuojančios kreivės atkarpą, žyminčią pradinį bandinio šilimą didėjant temperatūrai, be vizualiai pastebimų masės mažėjimo nuostolių, o antra liestinė – per kreivės atkarpą, charakterizuojančią staigų masės kritimą virimo proceso metu. Šių liestinių susikirtimas parodo izoterminio virimo pradžią žymintį tašką. Išvestinio medžiagos būvio vertinimas (diferencinė termogravimetrija, DTG) yra skirtas degalų mėginio masės mažėjimo greičio (%/min) nuo temperatūros nustatymui. Santander *et al.* (2012) eksperimentiškai įrodė, kad degalų virimo temperatūros nustatymas naudojant TGA metodą Celsijaus skalėje gali turėti 6 % paklaidą.

Diferencinės skenavimo kalorimetrijos (DSC) metodo taikymas degalų virimo temperatūrai nustatyti buvo ištobulintas Troni *et al.* (2016). Šis metodas leido nustatyti entalpijos pasikeitimus ir agregatinės būsenos pokytį mėginyje. Kaip ir TGA atveju naudojant *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* programinį paketą ir naudojant liestinių metodą leido nustatyti didžiausią garavimo greitį ir degalų virimo pradžios temperatūrą endoterminių reakcijų metu.

Degalų užsiliepsnojimo temperatūrų reikšmės, nustatytos dviem skirtingais metodais: i) demarkacijos metodas (Versan *et al.* 2016), leidžiantis apskaičiuoti vidurkius termogravimetrijos ir diferencinės termogravimetrijos metodais nustatytas charakteringas temperatūrų reikšmes degalų pirolizės ir degimo kreivėms; ir ii) aprašytas liestinių metodas, kuris yra paremtas Lu *et al.* (2015) tyrimų rezulta-

tais. Degalų užsiliepsnojimo temperatūros, nustatytos pagal Lu *et al.* (2015) publikuotą metodiką, sąlyginai žymimos T_{iTL} , o remiantis Versan *et al.* (2016) metodika – T_{iA} , kuri apskaičiuota pagal formulę:

$$T_{iA} = \frac{T_{TG} + T_{DTG}}{2}, \quad (2.1)$$

čia T_{TG} – degalų užsiliepsnojimo temperatūra nustatyta iš TG kreivių pirolizės ir degimo atvejams, T_{DTG} – degalų užsiliepsnojimo temperatūra nustatyta iš DTG kreivių pirolizės ir degimo atvejams.

Vykstant egzoterminei reakcijai, intensyvėjantis šilumos srautas dėl degimo metu išaugusios temperatūros, sugeneruoja pakankamą degalų garų kiekį, kad T_{iTL} pasiektų savo kritinę reikšmę, prie kurios degalai savaime užsiliepsnoja. Tuo tarpu, T_{iA} yra apskaičiuojama matematiškai iš TG ir DTG kreivių charakteringų taškų.

2.3.2. Cetaninio indekso nustatymas

Cetaninis indeksas apskaičiuotas, taikant tris skirtingus aprobuotus tyrimų metodus:

1. CCI_1 – keturių kintamųjų lygtis, reglamentuojama ASTM D4737 standarto. CI apskaičiuotas pagal 2.2 formulę, naudojant nustatytas degalų tankio (ASTM D 4052) ir distiliacijos temperatūrų (ASTM D86) reikšmes iš slėgio ir temperatūros nomogramų. Šis metodas taikomas, kai degalų bandinio kiekis yra per mažas atlikti cetaninio skaičiaus nustatymą reglamentuotų variklinių bandymų metu;
2. CCI_2 – apskaičiuotas, remiantis ASTM D4737 standarte pateiktomis matematinėmis formulėmis. Skaičiavimai paremti keturių kintamųjų lygtimi (2.2 formulė), kur degalų distiliacijos temperatūros (T_{10} , T_{50} ir T_{90}) nustatytos iš TGA termogramų, o tankis iš slėgio ir temperatūros nomogramų.
3. CCI_3 – Koseoglu *et al.* (2016) patentuotas metodas, remiantis kuriuo CI aprašomas kaip degalų tankio ir TGA indekso funkcija. TGA indeksas apskaičiuotas pagal tiriamų degalų rūšių termogramas, rodančias jų masės praradimo procentinę dalį priklausomai nuo temperatūros.

CCI_1 ir CCI_2 apskaičiuoti remiantis ASTM D4737 standartu, nustatant koreliaciją tarp degalų tankio ir 10 %, 50 %, 90 % distiliacijos temperatūrų. Skaičiavimuose (2.2 lygtis) naudojami šie kintamieji: degalų tankis, virimo taško temperatūra (2.3.1 poskyris) ir temperatūros (T_{10} , T_{50} ir T_{90}) prie kurių distiliavosi 10 %, 50 % ir 90 % degalų dalis. CI nustatymui užrašoma formulė (Khadka 2015):

$$CCI = 45,2 + 0,0892 \times T_{10N} + (0,131 + 0,901 \times BP) \times T_{50N} + (0,0523 - 0,420 \times BP) \times T_{90N} + 0,00049 \times ((T_{10N})^2 - (T_{90N})^2) + 107 \times BP + 60 \times BP^2, \quad (2.2)$$

čia BP – virimo taško temperatūra, °C; T_{10N} – temperatūra kurią pasiekus distiliavosi 10 % degalų masės, °C; T_{50N} – temperatūra kurią pasiekus distiliavosi 50 % degalų masės, °C; T_{90N} – temperatūra kurią pasiekus distiliavosi 90 % degalų masės, °C.

$$BP = (e^{-3,5 \times \rho N}) - 1, \quad (2.3)$$

čia ρN – perskaičiuotas degalų tankis, g/cm³ esant 15 °C temperatūrai.

$$\rho N = \rho - 0,85, \quad (2.4)$$

čia ρ – degalų tankis, g/cm³ esant 15 °C temperatūrai.

Remiantis ASTM D86 standartu distiliavimosi temperatūros buvo perskaičiuotos pagal standartinį atmosferinį slėgį:

$$T_{10N} = T_{10} - 215, \quad (2.5)$$

čia T_{10} – temperatūra kurią pasiekus distiliavosi 10 % degalų, °C.

$$T_{50N} = T_{50} - 260, \quad (2.6)$$

čia T_{50} – temperatūra esant kuriai distiliavosi 50 % degalų, °C.

$$T_{90N} = T_{90} - 310, \quad (2.7)$$

čia T_{90} – temperatūra esant kuriai distiliavosi 90 % degalų, °C.

CCI_1 skaičiavimuose distiliacijos taškai paimti iš slėgio ir temperatūros monogramų, remiantis ASTM D86 standartu, o metodo CCI_2 skaičiavimai pagrįsti distiliavimo temperatūromis, nustatytomis iš TGA termogramų.

Trečiajam Cetaninio indekso nustatymo metodui CCI_3 yra apskaičiuojamas TGA indeksas (TGAI) (Khadka 2015):

$$TGAI = \frac{[5 \times T_5 + 10 \times T_{10} + 20 \times T_{20} + 30 \times T_{30} + 40 \times T_{40} + 50 \times T_{50} + 60 \times T_{60} + 70 \times T_{70} + 80 \times T_{80} + 90 \times T_{90} + 95 \times T_{95}]}{[5 + 10 + 20 + 30 + 40 + 50 + 60 + 70 + 80 + 90 + 95]}, \quad (2.8)$$

čia $T_{5,10,20,30,40,50,60,70,80,90,95}$ – temperatūrų reikšmės esant kuriai, degalai neteko atitinkamos procentinės dalies savo masės, °C.

CCI_3 apskaičiuojamas kaip degalų tankio ir TGA indekso funkcija (Khadka 2015):

$$CCI_3 = f(\rho, TGA), \quad (2.9)$$

2.4. Degalų ir jų mišinių terminės analizės rezultatai

Taikant terminės analizės metodą detaliam išnagrinėti tyrimams naudotų degalų savybės. plačiame temperatūrų diapazone 20–900 °C, deguonies ir azoto dujų aplinkose. Tyrimams naudota *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* su *SiC* įranga, o eksperimentiniai rezultatai pateikti grafinėmis bei skaitinėmis reikšmėmis. Degalų terminis stabilumas analizuotas taikant: i) termogravimetrinės analizės metodą (TGA), kur buvo gautos degalų masės praradimo (TG) ir masės praradimo greičio kitimo (DTG) kreivės; ii) diferencinės skenavimo kalorimetrijos metodą (DSC), kuris leido išanalizuoti degalų mėginių išsiskiriančios energijos pokyčius. Eksperimentiniais tyrimais nustatytas degalų terminis stabilumas, cheminių junginių destrukcija ir intensyvumas, virimo taškų temperatūros, užsiliepsnojimo temperatūros, degumas, šilumos energijų šrautai ir t. t. Bandydams naudoti baziniai degalai – mineralinis dyzelinas (D100) ir organinės kilmės degalai išgauti iš mikrodumblių *P.moriformis* rūšies: aliejus (PMA100) ir biodyzelinas (PMME100). Tyrimuose taip pat naudoti degalų mišiniai bazinės rūšis maišant santykiu pagal tūrį 30/70 ir 70/30: a) dyzelino ir aliejaus, b) dyzelino ir biodyzelino, c) aliejaus ir biodyzelino.

Tyrimuose naudotų degalų cheminė sudėtis turėjo įtakos bandinių terminiam irimo procesui azoto ir deguonies aplinkose. Mineralinį dyzeliną sudaro angliavandenilių junginiai, kurių virimo temperatūra svyruoja 180–360 °C ribose. Degalų virimo proceso pradžia neretai yra sunkiai prognozuojama ir nustatoma dėl nevienodų angliavandenilių junginių grandinių ilgių bei skirtingų virimo temperatūrų reikšmių. Prieš atliekant terminę degalų analizę Vytauto Didžiojo universitete buvo nustatyta riebalų rūgščių procentinė sudėtis PMA100 (A priedas A.2 pav.) ir PMME100 (A priedas A.3. pav.) LST EN ISO5508. Įprastai augaliniai aliejai susideda iš trijų pagrindinių komponentų: linolo, palmitino ir oleino rūgščių, kurių viena būna dominuojanti. Mikrodumblių PMA100 sudėtyje yra daugiausiai nesočiųjų riebalų rūgščių, o oleino rūgštis sudaro 90,81 % visos aliejaus masės (A priedas A.2. pav.). Oleino rūgštis pasižymi gana sudėtinga chemine formule – $C_{18}H_{34}O_2$, kurios sudėtyje yra deguonies molekulių. KTU laboratorijoje atlikta PMA100 ir biodyzelino cheminė elementinė analizė leido nustatyti deguonies koncentraciją tirtuose degaluose: 10,48 % O_2 – PMA100 ir 10,36 % O_2 – PMME100.

2.4.1. Degalų virimo taškų temperatūrų analizė

Virimo taško metu nustatytas degalų bandinio agregatinės būsenos virsmas iš skystos į dujinę fazę per visą medžiagos tūrį. Bandymai atlikti didinant temperatūrą nuo 20 iki 900 °C, 10 °C/min greičiu. Degalų virimo taškų temperatūra nus-

tatyta remiantis Santander *et al.* (2012) TGA metodu inertinių dujų aplinkoje, terminės destrukcijos principu. Per TG termogramas buvo nubrėžtos dvi liestinės, o jų sankirtos taškas atitiko degalų bandinio BP temperatūrą. Pirmoji liestinė žymi degalų masės praradimo pradžią, o antroji – bandinio masės kitimą – destrukciją. Nustatyti virimo taškai pažymėti 2.3 a paveiksle : BP_1 (D100), BP_2 (PMME100) ir BP_3 (PMA100), o skaitinės reikšmės pateiktos 2.2 lentelėje. TG termogramose (2.3 pav. a) užfiksuoti rezultatai parodė degalų bandinio masės praradimą vykstantį trimis etapais: i) bandinio masės kitimo pradžia; ii) lakiųjų medžiagų garavimas; iii) bandinio destrukciniai procesai (molekulių skilimas). Iš 2.3 a paveiksle Nr.1 pažymėtos termogramos D100, matyti, kad terminiai bandinio masės praradimo procesai prasidėjo pasiekus sąlyginai žemą, apie 50 °C temperatūrą. Visiška D100 bandinio destrukcija įvyko esant 280 °C, maždaug per 23 minutes. Eksperimento metu fiksuotas pakankamai tolygus bandinio masės praradimas, t. y. 50 % termiškai degradavo per 17 minučių arba 170 °C temperatūros diapazone nuo 50 iki 225 °C. Likusi D100 masės dalis pilnai suiro per kiek daugiau kaip 5 minutes 225–280 °C temperatūrų diapazone. Dviejų liestinių sankirtos principu išvesta D100 virimo taško temperatūra esant 154,0 °C.

2.2 lentelė. Tyrimo metu nustatyti bazinių degalų virimo temperatūrų taškai

Table 2.2. Boiling points of the basic fuels were determined during the experiment

Degalai	TGA metodu nustatytas virimo taškas, °C	Paklaida, %	DSC metodu nustatytas virimo taškas, °C	Paklaida, %
D100	154,0	±4,6	257,0	±3,8
PMME100	265,4	±3,3	279,3	±3,4
PMA100	397,4	±2,5	399,1	±2,4

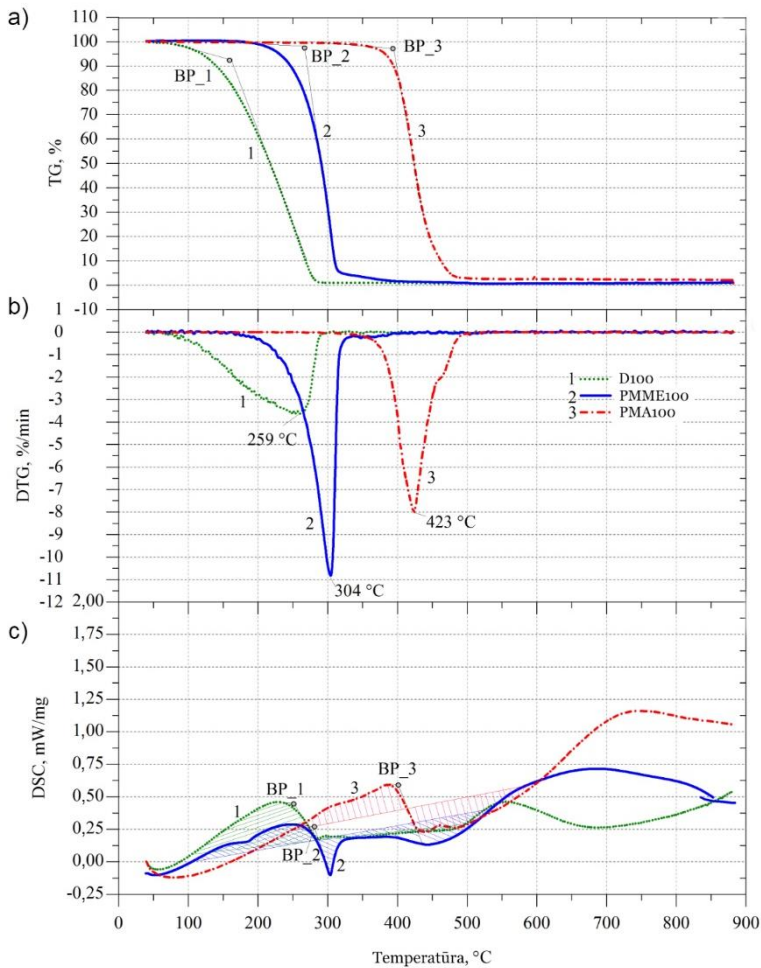
Biodyzelino sudėtyje esantys metil–oleatas ir metil–linoleatas, sąlygojo bandinio destrukciją esant aukštesnei temperatūrai negu dyzelino atveju. PMME100 bandinio terminis irimas prasidėjo pasiekus 210 °C temperatūrą, prie kurios dyzelino bandinys jau buvo praradęs daugiau kaip 40 % savo masės. Pilnas PMME100 suirimas įvyko per sekančias 16 minučių esant 370 °C temperatūrai. Laikoma, kad biodyzelinas yra termiškai stabilus jeigu jo masės destrukcija prasideda pasiekus daugiau kaip 150 °C temperatūrą (Mostafa *et al.* 2013). Tyrime naudotas biodyzelinas iš PMA100 yra termiškai stabilus, nes masės praradimas prasidėjo viršijus terminio stabilumo ribą, priešingai negu D100. Nustatyta 72,3 % aukštesnė PMME100 bandinio virimo taško temperatūra BP_2 = 265,4 °C negu D100.

PMA100 pasižymėjo geriausiais terminio stabilumo rezultatais, o terminės destrukcijos pradžia užfiksuota esant 340 °C temperatūrai. PMA100 bandinio masės praradimas vyko lėtai, ir po 4 minučių, pasiekė 380 °C temperatūrą, kur užfiksuotas 4 % bandinio masės praradimas (2.3 pav. a). Viršijus 400 °C ribą, prasidėjo intensyvi PMA100 bandinio terminė destrukcija, kuri baigėsi beveik po

8 minučių, kai buvo pasiekta 480 °C temperatūra. Likusi bandinio masės dalis (4%) galutinai suiro po daugiau negu 30 minučių, esant didesnei kaip 800 °C temperatūrai. PMA100 sudėtyje vyrauja oleino rūgštis, kuri sudaro 90,8 % visos PMA100 masės ir nedidelė dalis linolo rūgštis 3,4 % (virimo taško temperatūra 230 °C), mokslinėje literatūroje skelbiama, kad oleino rūgštis virimo temperatūra yra 360 °C, tuo tarpu dviejų taikant liestinių metodu nustatyta PMA100 virimo taško temperatūra buvo $BP_3 = 397,4$ °C (2.2 pav. a). PMA100 pasižymi mažu lakumu ir H_L (33,8 MJ/kg), dideliu tankiu 915,8 kg/m³ ir 5,3 mm²/s siekiančia klampa. Šios fizikinės–cheminės savybės ir turėjo įtakos degalų masės praradimo intensyvumui ir virimo taškų reikšmėms. Iš DTG termogramų matyti temperatūrų ekstremumai, fiksuoti intensyviausiu bandinių masės praradimo metu (2.3 pav. b). PMA100 terminis masės praradimas intensyviai vyko viršijus 380 °C temperatūrą, iki kol buvo pasiektas 423 °C ekstremumas bei visiška bandinio destrukcija ties 480 °C (2.3 pav. b) riba. PMA100 šylant suintensyvėjo masės praradimo greitis, kurį lėmė mažėjanti klampa ir prasidėjęs intensyvus riebiųjų rūgščių garavimas, matomas DTG Nr.3 termogramoje. Dyzelino masės praradimas dėl garavimo prasidėjo aplinkos temperatūrai pasiekus 50 °C bei vyko pakankamai vangiai, kol, pasiekus aukščiausią 259 °C temperatūrą procesas maksimaliai suintensyvėjo esant 280 °C ir visiškai suiro. Eksperimento metu esant 304 °C temperatūros fiksuotas didžiausias biodyzelino bandinio masės praradimo intensyvumas 11 % per minutę. Nustatyta, kad biodyzelino terminė destrukcija vyko beveik 4 kartus intensyviau už D100 ir 1,5 karto už PMA100. Tam turėjo įtakos biodyzelino gamyboje naudojamas metanolis, kuris intensyviai reagavo pasiekęs kritinę 270°C temperatūrą.

Virimo taškai buvo nustatyti taikant diferencinės skenavimo kalorimetrijos metodą. DSC leido pamatyti bandinyje vykstančius fazinius virsmus ir degalų agregatinės būsenos pasikeitimus per šilumos energijos pokyčius. Šilumos srauto pokyčių kreivės matuotos įvertinus šilumos energijos kiekio išsiskyrimą (mW) iš degalų masės (mg). Kaitinant dyzelino mėginį, didžiausias išskiriamos šiluminės energijos kiekis 0,47 mW/mg išsiskyrė esant 225 °C temperatūrai (2.3 pav. c), kuri žymėjo 50 % masės praradimą. Aplinkos temperatūrai išaugus dar 32 °C buvo pasiektas virimo taškas dyzelinui $BP_{DSC_1} = 257$ °C. DSC grafikuose pažymėti ekstremumų taškai rodo bandinio agregatinės būsenos pasikeitimo tašką – fizinį skystos būsenos virsmą į dujinę fazę. Virimo taškų nustatymui buvo brėžiamos liestinės, einančios per didžiausią šilumos energijos išsiskyrimo tašką ir šilumos energijos mažėjimo pradžios tašką, jų rezultatai pateikti 2.2 lentelėje. DSC metodu nustatytas didžiausias šilumos išsiskyrimas (30 mW/mg) PMME100, kuris savo skaitine išraiška buvo apie 40 % mažesnis negu D100 ir PMA100 (2.3 pav. c). DTG termogramoje Nr.2 (2.3 pav. b) užfiksuota intensyviausia masės praradimo zona lėmė, kad DSC grafike (2.3 pav. c) šiluminės energijos reikšmė

buvo neigiama (-10 mW/mg). Užstrichuotoje zonoje pažymėtas nedidelis apie 14 mW/mg energijos išsiskyrimas (2.3 pav. c).



2.3 pav. Termogravimetrinė analizė bazinėms degalų rūšims vykstant pirolizės procesui: a) masės praradimas; b) masės praradimo intensyvumas; c) šilumos kitimas

Fig. 2.3. Thermogravimetric analysis of basic fuels during the pyrolysis process: a) mass loss; b) mass loss intensity; c) heat alteration

PMME100 virimo taško temperatūra nustatyta ties $279,3 \text{ }^\circ\text{C}$ atžyma, kuri sutapo su šiluminės energijos kritimu nuo $0,25 \text{ mW/mg}$ iki -10 mW/mg , pavaizduotu DSC dalyje. Iš visų tyrimams naudotų degalų rūšių aukščiausia virimo taško

temperatūra 399,1 °C fiksuota mikrodumblių PMA100 (2.3 pav. c). Taip pat, išsiskyres šiluminės energijos kiekis (60 mW/mg; 2.3 pav. c) buvo 28 % didesnis už D100 ir 140 % už PMME100.

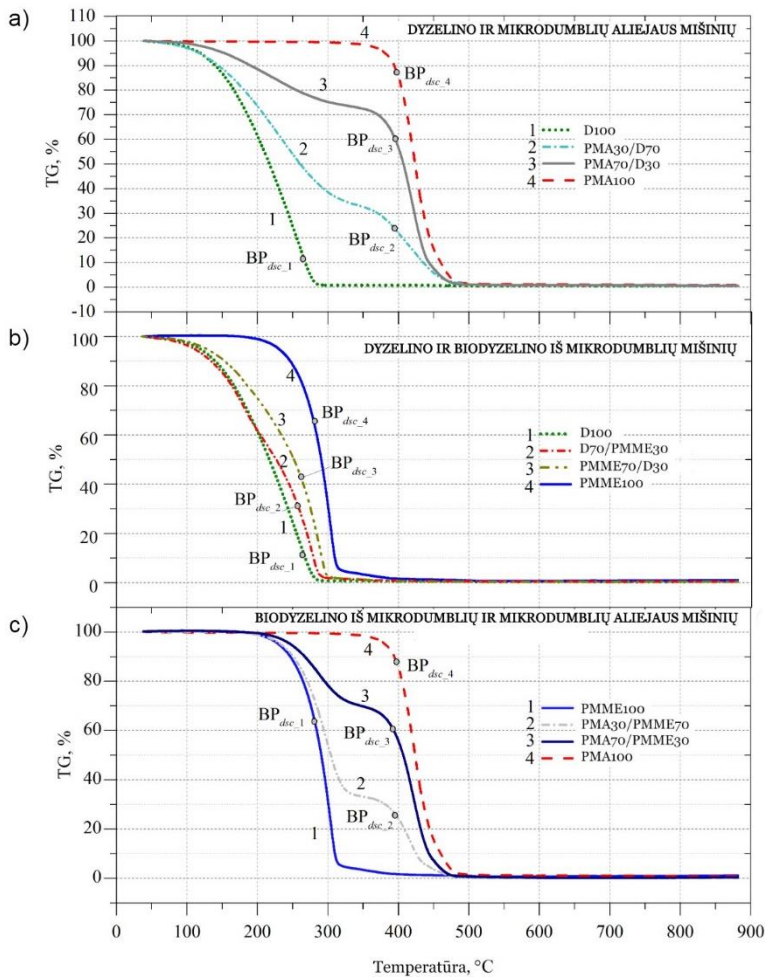
TGA ir DSC metodai taikyti degalų mišinių terminių procesų analizei ir virimo taškų temperatūrų nustatymui. Iš pirolizės procesą aprašančių TG termogramų matyti, kad didinant aliejaus procentinę koncentraciją mišinyje su mineraliniu dyzelinu, atitinkamai mažėjo ir masės praradimo greitis. Kaitinant mėginius 50 °C temperatūros azoto dujų aplinkoje ir gryno dyzelino, ir D70/PMA30 masės praradimas prasidėjo labai panašiu metu (2.4 pav. a). Bandinio PMA30/D70 intensyvi terminė destrukcija vyko apie 15 minučių nuo 130 iki 280 °C ribose, kuomet fiksuotas 60 % pirminės masės praradimas. Šiame temperatūrų intervale fiksuota visiška D100 bandinio terminė destrukcija, kuomet masės praradimas buvo lygus 100 %. Visiškai bandinio PMA30/D70 masės destrukcijai prirėkė apie 20 minučių, kol buvo pasiekta 480 °C aplinkos temperatūra. Iš 2.4 a paveikslo matyti, kad bandinių PMA30/D70 ir PMA100 terminės destrukcijos laikai sutapo. Šiam mišiniui virimo taško temperatūra nustatyta TGA metodu (iš masės praradimo termogramų, $BP_{TGA} = 393,3$ °C) ir DSC (iš šilumos energijos išsiskyrimo į aplinką termogramų, $BP_{DSC_2} = 397,0$ °C) metodais 2.3 lentelė.

2.3 lentelė. Tyrimo metu nustatyti degalų mišinių virimo temperatūrų taškai
Table 2.3. Boiling points of the fuel blends determined during the experiment

Degalų mišiniai	TGA metodu nustatytas virimo taškas, °C	Eksperimento paklaida, %	DSC metodu nustatytas virimo taškas, °C	Eksperimento paklaida, %
PMA30/D70	393,3	±2,9	397,0	±3,3
PMA70/D30	392,1	±2,2	397,1	±2,4
PMME30/D70	197,1	±3,5	257,3	±2,0
PMME70/D30	231,4	±3,6	261,4	±3,3
PMA30/PMME70	396,4	±2,5	401,2	±2,4
PMA70/PMME30	396,3	±2,7	401,1	±2,0

Mišinio PMA70/D30 terminis masės praradimas prasidėjo aplinkos temperatūrai pasiekus 100 °C, tai yra beveik du kartus vėliau negu PMA30/D70. Praėjus 36 minutėms nuo terminės reakcijos pradžios fiksuotas 30 % bandinio masės sumažėjimas. Tai leidžia daryti išvadą, kad masės praradimo procesas nebuvo intensyvus lyginant su PMA30/D70 (2.4 pav. a). Pasiekus 380 °C aplinkos temperatūrą, prasidėjo intensyvi bandinio PMA70/D30 terminė destrukcija, trukusi apie 10 minučių, kuomet bandinys galutinai suiro esant 480 °C. Nežiūrint į didesnę aliejaus kiekį mišinyje, PMA70/D30 virimo taško temperatūra $BP_{DSC_3} = 397,1$ °C beveik nepakito lyginant su PMA30/D70 ir praktiškai nesiskyrė nuo PMA100. Aliejaus koncentracija degalų mišinyje turėjo lemiamą įtaką bandinio

masės praradimo intensyvumui, kuomet nuo 30 % iki 70 % padidėjęs biokomponento kiekis lėmė vėlesnę, esant 380 °C prasidėjusią terminę bandinio destrukciją.



2.4 pav. Degalų mišinių masės praradimo priklausomybė nuo temperatūros vykstant pirolizei: a) dyzelino ir aliejaus; b) dyzelino ir biodyzelino; c) aliejaus ir biodyzelino

Fig. 2.4. Mass loss dependence on the temperature during the process of pyrolysis for the fuel blends: a) diesel and algae oil; b) diesel and biodiesel; c) algae oil and biodiesel

Mišinio PMME30/D70 terminis irimas fiksuotas 50–280 °C temperatūrų diapazone, o jo reakcijos dinamikos pobūdis pirmas 18 minučių buvo beveik identiškas D100 degalams (2.4 pav. b). Pasiėkus 200 °C temperatūrą nustatytas 40 % bandinio masės sumažėjimas. Likę 60 % bandinio masės visiškai suiro per sekančias 8 eksperimento minutes. Naudojant dviejų liestinių metodą iš DSC termogramų nustatyta PMME30/D70 virimo taško temperatūra $BP_{DSC_2} = 257,3$ °C. Padidinus biodyzelino santykį degalų mišinyje iki 70 %, PMME70/D30 terminė destrukcija vyko 50–300 °C temperatūrų intervale. Bandinio masės praradimo procesas truko apytikriai 2 minutėmis ilgiau negu PMME30/D70 ir D100 atvejais, o masės destrukcijos pabaiga fiksuota esant 7 % aukštesnei temperatūrai (2.4 pav. b). Iš TG termogramų grafinio atvaizdavimo matyti, kad dyzelino su biodyzelinu mišiniai nėra termiškai stabilūs, nes jų terminis masės destrukcijos procesas prasidėjo esant santykinai žemai temperatūrai, neviršijančių 150 °C (Mostafa *et al.* 2013). Dėl homogeniškesnių biodyzelino ir D100 mišinių struktūrų, gryno dyzelino masės praradimo proceso tendencijos buvo labiau panašios į degių mišinių PMME30/D70 ir PMME70/D30, negu į PMA30/D70 ir PMA70/D30. Iš TG termogramų grafinio atvaizdavimo matyti (2.4 pav. c), kad PMA30/PMME70 ir PMA70/PMME30 terminės destrukcijos procesus sąlyginai galima suskirstyti į 3 etapus: i) intensyvus PMME irimas esant 210–330 °C temperatūrai, kuomet netenkama atitinkamai apie 65 % ir 28,5 % bandinių masių, kurias sudaro biodyzelino dedamoji; ii) aliejaus stabilios agregatinės būsenos zona (330–380 °C), kuomet PMME visiškai suyra; iii) intensyvus aliejaus masės mažėjimas iki visiško suirimo pasiekus 470 °C temperatūrą. Naudojant dviejų liestinių metodą, nustatytos beveik identiškos virimo taškų temperatūros abiem mišiniams: PMA30/PMME70 – $BP_{DSC_2} = 401,2$ °C ir PMA70/PMME30 – $BP_{DSC_3} = 401,1$ °C.

2.4.2. Degalų užsiliepsnojimo temperatūrų analizės rezultatai

Laboratoriniai bandymai atlikti esant 20 °C patalpos temperatūrai bei naudojant įrenginį *NETZSCH STA 449 F3 Jupiter* su *SiC*, didinta degalų bandinių temperatūra nuo kambario sąlygų iki 900 °C, 10 °C/min greičiu. Eksperimentinio proceso dinamika pateikta grafinėse termogramose (2.5 ir 2.6 pav.), o charakteringos reikšmės – 2.4 ir 2.5 lentelėse. Eksperimentinių degalų užsiliepsnojimo temperatūros nustatytos naudojant du skirtingus metodus: (i) demarkacijos taškų vidurkių (T_{IA}) nustatymo metodą, aprašytą Versan *et al.* (2016), ir (ii) dviejų liestinių (T_{ITL}) metodą (2.4 ir 2.5 lentelės).

Iš 2.5 a paveikslo matyti, kad, vykstant cheminiam oksidacijos procesui, dyzelio masės praradimas vyko 60–270 °C temperatūros diapazone apie 26 minutes, kurio metu angliavandenilių junginių garavimo procesą palaipsniui pakeitė

degimas. Nugaravus apytikriai 6 % pirminės bandinio masės ir garų koncentracijai pasiekus ribinę reikšmę, stebėtas savaiminis dyzelino užsiliepsnojimas (2.5 pav. a). Iš DTG termogramų (2.5 pav. b) nustatyta intensyviausia dyzelino bandinio masės praradimo riba (3,2 %/min) esant 253,5 °C temperatūrai. Pasiekti temperatūrų skirtumą tarp savaiminio užsiliepsnojimo temperatūros $T_{iTL_1} = 155,3$ °C ir minėtos ribos (253,5 °C) standartizuoto eksperimento metu užtruko 10 minučių. Minėtame ekstremume fiksuota 20 % likutinė dyzelino bandinio masės dalis, kuri galutinai sudegė per kitas 3 minutes.

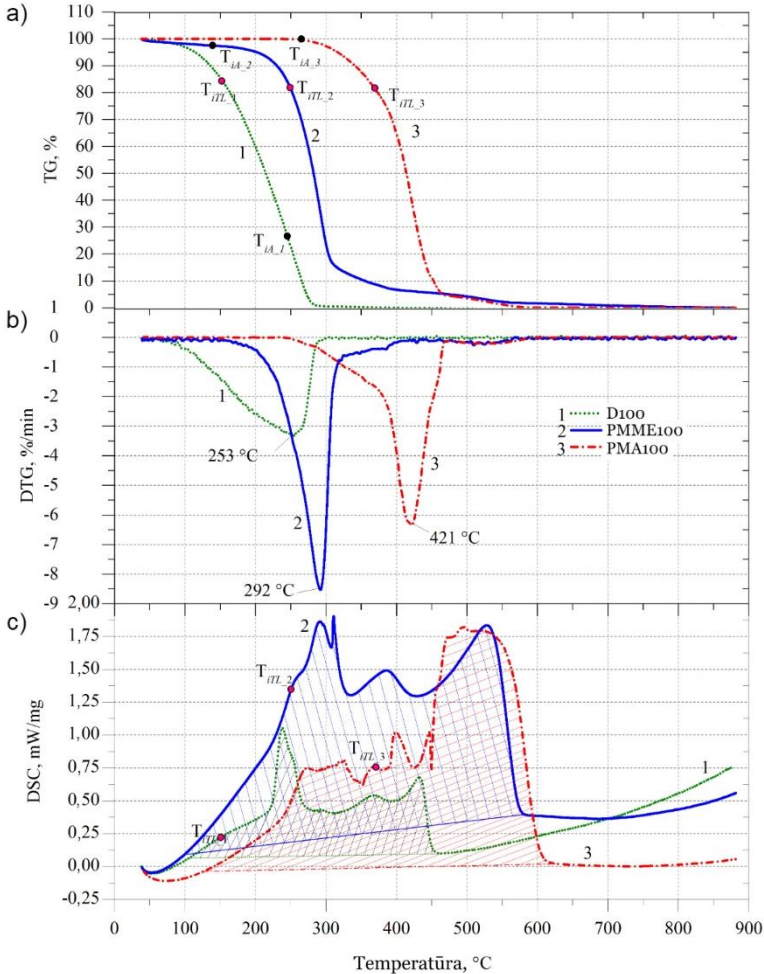
2.4 lentelė. Tyrimo metu nustatytos bazinių degalų užsiliepsnojimo temperatūros
Table 2.4. Ignition temperature of the basic fuels determined during the experiment

Degalų rūšis	Užsiliepsnojimo temperatūra nustatyta T_{iA} metodu, °C	Paklaida, %	Užsiliepsnojimo temperatūra nustatyta T_{iTL} metodu, °C	Paklaida, %
D100	159,0	±4,3	155,3	±4,4
PMME100	135,0	±2,4	242,2	±2,2
PMA100	259,4	±2,1	370,1	±2,6

Tolimesnių bandymų metu, biodyzelino mėginys parodė didesnę stabilumą vykstančiai terminiai oksidacijai negu D100 kuomet intensyvus garavimas prasidėjo pasiekus 110 °C temperatūrą. Šis procesas truko apie 13 minučių, o jo ekstremumo reikšmė, kurią pasiekus sudegė 50 % visos PMME100 masės, fiksuota esant 292,3 °C temperatūrai (8,5 %/min). Biodyzelino savaiminio užsiliepsnojimo metu nustatytas 3,5 %/min masės praradimo intensyvumas (dyzelino 1,4 %/min, PMA100 – 1,8 %/min) (2.5 pav. b). Esant 310 °C temperatūrai fiksuotas apytiksliai 80 % bandinio masės netekimas. Likę 20 % visiškai termiškai suiro per kitas 28 minutes, aplinkos temperatūrai pasiekus 580 °C. Taikant dviejų liestinių („Two Tangent Lines“) metodą degimo proceso analizei, nustatytos degalų užsiliepsnojimo temperatūros.

Pasirinkus pirmą piką iš DTG kreivės (didžiausias masės kritimo greitis), per šį tašką brėžiama vertikali linija iki TG kreivės susikirtimo, o per gautąjį susikirtimo tašką ant TG kreivės brėžiama liestinė iki kol ji susikerta su kita horizontalia liestine (TG kreivės pradžios taškas). Naudojant šį metodą nustatyto sankirtos taško reikšmė biodyzelinui ($T_{iTL_2} = 242,3$ °C) yra 56 % didesnė už dyzelio ir 35 % mažesnė už PMA100 analogišką charakteristiką (2.5 pav. c). Iš 2.5 a paveiksle pateiktų termogramų matyti, kad iš visų trijų bazinių degalų rūšių PMA100 pasižymėjo didžiausiu stabilumu terminiai oksidacijai nes šio bandinio garavimo pradžia buvo fiksuota vėliausiai – esant 260 °C temperatūrai. Palyginimui, ši temperatūros atžyma beveik 1,6 karto viršijo dyzelino T_{iTL} reikšmę.

Esant minėtai PMA100 garavimo pradžios temperatūrai, analogiškomis sąlygomis jau buvo sudegę 30 % biodyzelino ir 91 % dyzelino bandinių masės. Lyginant su mineraliniu dyzelinu, 2,3 karto didesnė PMA100 kinematinė klampa apsprendė daug vėlesnę PMA100 bandinio užsiliepsnojimo temperatūrą (370,1 °C). PMA100 terminio oksidacinio stabilumo fazė tęsiasi apie 35 minutes nuo eksperimento pradžios, o garavimo pradžia fiksuota 24-ąją bandymo minutę (2.5 pav. a).



2.5 pav. Termogravimetrinė analizė bazinėms degalų rūšims vykstant degimo procesui: a) masės praradimas; b) masės praradimo intensyvumas; c) šilumos kitimas

Fig. 2.5. Thermogravimetric analysis of basic fuels during combustion process: a) mass loss; b) mass loss intensity; c) heat alteration

Biologinės kilmės degalai PMA100 ir PMME100 užsiliepsnojo vėliau negu D100 dėl sudėtingos ir ilgos angliavandenilių grandinių molekulinės struktūros bei ženkliai didesnio klampio (2.5 pav. c). Reikia pažymėti, kad 2.5 paveiksle c pavaizduotos reakcijos vyko neidealiomis sąlygomis, t. y. esant nenusistovėjusiai termodinaminei pusiausvyrai ($T \neq \text{const.}$). Proceso dinamika buvo stebima didėjant temperatūrai, todėl didesnio lakumo dyzelino reakcija pradėjo vykti anksčiau ir esant žemesnei temperatūrai, lyginant su PMA100 mėginiu. Dėl dyzelino didelio lakumo, jis garuoja esant kambario temperatūrai, tad iki prasidedant eksperimentui, jo masė sumažėdavo, dėl ko buvo stebimas sąlyginai mažesnis energijos išsiskyrimo kiekis. Pats DSC metodas parodo eksperimento metu vykstančias endotermines ir egzotermines reakcijas. Biologinės kilmės PMA100 ir esteris, savo sudėtyse turintys specifinėmis savybėmis pasižyminčių rūgščių, kurios kylant temperatūrai išskyrė nemažą kiekį energijos (vykstant egzoterminiai reakcijai), skirtingai negu dyzelinas, kurio energija buvo naudojama garinimui (endoterminė reakcija), parodė didesnes energijos kiekio, tenkančio masės vienetui reikšmes negu D100 (2.5 pav. c). Didžiausias 6,3 %/min. PMA100 bandinio masės destrukcijos greitis fiksuotas ties 421,2 °C temperatūros žyma (2.5 pav. b), iki kurios jau buvo sudegę 70 % tiglyje esančio PMA100. Likę 30 % bandinio masės pilnai sudegė per 18 min. Degimo proceso metu pasiektos didžiausios temperatūrų reikšmės išsidėstė priešinga eiliškumo tvarka negu šių degalų garavimo pradžios laikai: PMA100 > PMME100 > D100 ir D100 > PMME100 > PMA100, atitinkamai.

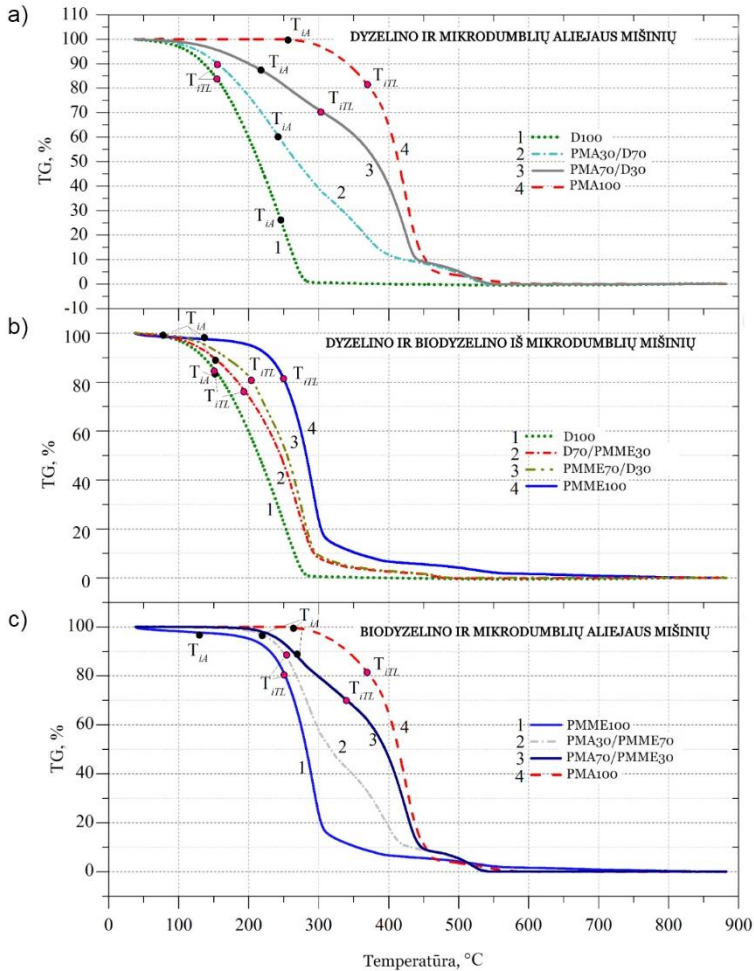
Sumaišius dyzeliną ir aliejų santykiais 30/70 ir 70/30, mišinių garavimas prasidėjo esant apytikriai 60 °C aplinkos temperatūrai, t. y. panašiu metu kaip ir D100 (2.6 pav. a). Degalų mišinio PMA30/D70 savaiminio užsiliepsnojimo pradžia fiksuota esant $T_{iTL_2} = 149,2$ °C (2.5 lentelė) ir nugaravus apie 10 % pradinės bandinio masės. Per 24 eksperimento minutes, aplinkos temperatūrai pasiekus 260 C, bandinio masė sumažėjo perpus. Abu mišiniai visiškai sudegė esant 560 C aplinkos temperatūrai.

2.5 lentelė. Tyrimo metu nustatytos degalų mišinių užsiliepsnojimo temperatūros

Table 2.5. The ignition temperatures of the fuel blends were determined during the experiment

Degalų rūšis	Užsiliepsnojimo temperatūra nustatyta T_{iA} metodu, °C	Paklaida, %	Užsiliepsnojimo temperatūra nustatyta T_{iTL} metodu, °C	Paklaida, %
PMA30/D70	250,1	±1,9	149,2	±1,5
PMA70/D30	220,1	±1,3	303,0	±2,1
PMME30/D70	83,3	±2,1	175,0	±3,5
PMME70/D30	117,3	±1,3	219,3	±4,9
PMA30/PMME70	214,2	±1,2	251,3	±1,3
PMA70/PMME30	273,2	±0,6	344,2	±0,8

Mišinių užsiliepsnojimo greitį lemia dyzelino, kuris yra daug lakesnis už PMA100, procentinė dalis degaluose: kuo D100 koncentracija didesnė, tuo mišinys anksčiau užsiliepsnoja ir intensyviau vyksta jo masės praradimas. Remiantis eksperimento duomenimis, gautais naudojant dviejų liestinių (T_{iTL}) metodą, PMA70/D30 mišiniui fiksuota 103 % aukštesnė užsiliepsnojimo temperatūra ($T_{iTL_3} = 303,0 \text{ } ^\circ\text{C}$) lyginant su PMA30/D70 ($T_{iTL_2} = 149,2 \text{ } ^\circ\text{C}$) ir 15 minučių ilgesnis garavimo laikas (2.6 pav. a).



2.6 pav. Degalų mišinių garavimo ir degimo procesų dinamika: a) dyzelino ir aliejaus; b) dyzelino ir biodyzelino; c) aliejaus ir biodyzelino

Fig. 2.6. Evaporation and combustion dynamics of fuel blends: a) diesel and algae oil; b) diesel and biodiesel; c) algae oil and biodiesel

Dyzelino ir biodyzelino mišiniai nepasižymėjo terminiu–oksidaciniu stabilumu, jų garavimas prasidėjo esant 60 °C temperatūrai ir PMME30/D70, ir PMME70/D30 atvejais, bei truko atitinkamai 11 ir 18 minučių. Abiem degalų rūšims būdingos užsiliepsnojimo temperatūros pateiktos 2.5 lentelėje bei grafiškai pavaizduotos 2.6 b paveiksle PMA100, PMME100 ir D100 mišinių masės praradimo tendencijos kylant temperatūrai buvo labai tarpusavyje panašios, o bandiniai visiškai sudegė esant 480 °C temperatūrai. Kaip ir PMA100 atveju, biodyzelino mišinių užsiliepsnojimo temperatūra ir masės praradimo intensyvumas tiesiogiai priklausė nuo dyzelino koncentracijos.

Sumaišius PMA100 su biodyzelinu santykiu 30/70 % pagal tūrį ir esant standartinėms bandymo sąlygoms, mišinio garavimo pradžia fiksuota esant 210 °C temperatūrai, o savaiminis užsiliepsnojimas esant $T_{ITL_2} = 251,3$ °C (2.6 pav. c). Garavimo procesas truko apie 4 minutes. Iki užsiliepsnojimo momento bandinys buvo netekęs 11 % savo pradinės masės.

Padidinus aliejaus koncentraciją mišinyje iki 70 %, PMA70/PMME30 garavimo intensyvumas ir masės praradimo greitis sumažėjo, lyginant su PMA30/PMME70. Abu aliejaus ir biodyzelino mišiniai sudegė esant panašioms temperatūroms: PMA30/PMME70, kai 520 °C, o PMA70/PMME30 esant 530 °C temperatūrai. Remiantis TGA ir DSC metodikomis paremtų tyrimų rezultatais nustatyta, kad biodegalų užsiliepsnojimo temperatūrų nustatymui tinkamesnis yra dviejų liestinių metodas (T_{ITL}), kuris tiksliau nusako minėto parametro kitimą nuo degalų fizikinių–cheminių charakteristikų negu demarkacijos taškų metodas (T_{IA}).

2.4.3. Cetaninio indekso apskaičiavimas

Cetaninio indekso reikšmės darbe buvo apskaičiuotos analitiškai, taikant tris skirtingus metodus. Metodų tikslumui įvertinti pasirinkti degalų kokybę reglamentuojantys norminiai dokumentai ir *Clarivate Analytics* duomenų bazėje patalpinti aukšto lygio mokslinių tyrimų rezultatų aprašai. Dyzelio apskaičiuotasis Cetaninis indeksas lygintas su *UAB Avematrox* degalų kokybės pažymėjime pateiktais duomenimis (A priedas A.1 pav.) ir *Neste OYJ Oil Refining* degalų kokybės sertifikato duomenimis (A priedas A.1 pav.).

PMA100 publikuotų Cetaninio indekso reikšmių ar duomenų mokslinėje literatūroje rasti nepavyko. Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad mikrodumblių aliejaus CI reikšmės pasiskirsto labai plačiame diapazone ~28–68 (Islam *et al.* 2013). Tačiau pasirinkti vidutinę CI reikšmę nebūtų korektiška, kadangi pasaulyje yra suskaičiuojama daugiau kaip dešimtys tūkstančių mikrodumblių rūšių, kurios pagal savo savybes gali skirtis kelis kartus. Atsižvelgiant į tai galima remtis dalinai ar visiškai ištirtomis mikrodumblių rūšimis, kurios savo savybėmis yra artimos *P.moriformis* mikrodumblių rūšiai. Viena tokių – *Tetraselmis suecica*, kurios sausos biomasės sudėtyje buvo nustatytas panašus aliejaus kiekis ~17,3 % (Go *et*

al. 2012) kaip ir darbe tiriamos mikrodumblių rūšies ~18,0 % (Franklin *et al.* 2014). Remiantis Tsaousis *et al.* (2014) matyti, kad *Tetraselmis suecica* aliejaus Cetaninio indekso reikšmė yra 55,6. Tuo tarpu kontrolinė *P. moriformis* biodyzelino CI > 61,0 reikšmė paimta iš Franklin *et al.* (2014).

Skaičiavimų rezultatai naudojant CCI₁ metodą parodė sekančias tirtų degalų Cetaninio indekso reikšmių tendencijas (2.6 lentelė): D100 < PMME100 < PMA100.

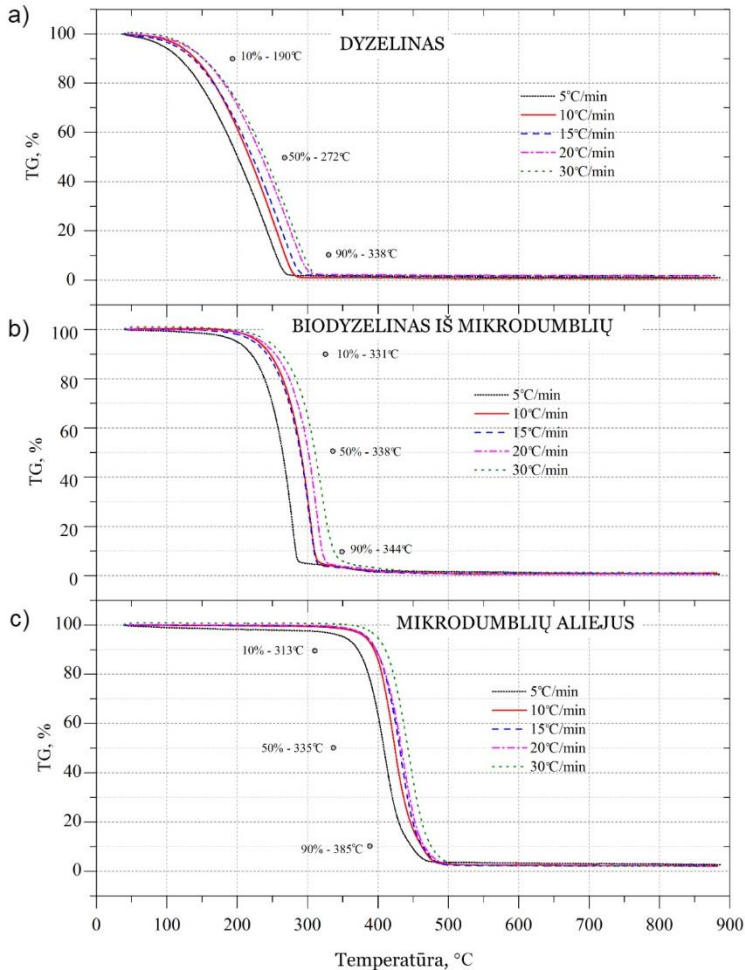
2.6. lentelė. Cetaninio indekso apskaičiavimo rezultatai

Table 2.6. Cetane index calculation results

Degalų rūšis	Tankis	Cetaniniai indeksai		
	ρ^{15} , g/cm ³	CCI ₁	CCI ₂	CCI ₃
D100	0,8495	46,1	32,6	45,0
PMME100	0,8795	58,2	40,0	61,0
PMA100	0,9158	81,1	58,2	66,0
PMA30/D70	0,8684	56,6	38,8	51,3
PMA70/D30	0,8948	70,6	50,5	59,7
PMME30/D70	0,8583	49,7	35,9	49,8
PMME70/D30	0,8703	54,6	37,8	56,2
PMA30/PMME70	0,8901	65,1	42,4	62,5
PMA70/PMME30	0,9046	74,2	52,7	64,5

Apskaičiuota dyzelino CI46,1 reikšmė beveik idealiai sutapo su kontroline reikšme (CI46,0), paimta iš *UAB Avematrox* degalų kokybės pažymėjimo. Šis metodas parodė patikimus rezultatus skaičiuojant *PMME100* Cetaninį indeksą 58,2, kuris savo skaitine reikšme buvo 2,8 % mažesnis už publikuotą Franklin *et al.* (2014) moksliniame darbe. Biologinės kilmės PMA100 degalų apskaičiuotasis CI gautas 26 % didesnis už analogišką dyzelinui nustatytą parametą. Šį skirtumą galima paaiškinti ženkliai didesnėmis biodyzelino distiliacijos temperatūrų T_{10} ir T_{50} reikšmėmis (2.7 pav. b) ir (C priedas C.1 lentelė.). Žemo tikslumo rezultatai gauti skaičiuojant PMA100 Cetaninį indeksą, parodę 46 % nesutapimą su Tsaousis *et al.* (2014) aprobuotais duomenimis, tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad autorius Tsaousis *et al.* (2014) nagrinėta mikrodumblių rūšis nėra šiame darbe analizuojama rūšis, todėl apskaičiuotų CI rezultatų sutapimas yra mažai tikėtinas. Analizuojant vieną dažniausiai biodyzelino gamybai naudojamų kultūrų – rapsų aliejų, CI reikšmių skirtumas lyginant gryną aliejų ir biodyzeliną išgautą iš šio aliejaus siekia ne daugiau kaip 22 %. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad CCI₁ metodu gauta CI reikšmė 81,1 yra per didelė, o skirtumas tarp D100 ir PMA100 CI reikšmių siekia 26 % ir nepatenka į anksčiau minėtą intervalą. Toks skirtumas

patvirtina, kad CCI_1 metodas nėra tinkamas mikrodumblių aliejaus CI apskaičiavimui, kadangi gauta CI reikšmė yra ženkliai didesnė negu literatūroje pateiktos CI mikrodumblių aliejaus reikšmės bei gautas skirtumas tarp biodyzelino CI ir nustatyto aliejaus CI yra per didelis.



2.7 pav. Masės praradimo dinamika distiliavimo taškų temperatūrai nustatyti: a) dyzelinui; b) biodyzelinui; c) aliejui
Fig. 2.7. Mass loss dynamics for distillation point temperatures determination: a) diesel; b) biodiesel; c) oil

Eksperimentui naudoti PMME30/D70 ir PMME70/D30 mišiniai parodė aukštą koreliaciją su juos sudarančių bazinių degalų rūšių CI skaitinėmis reikšmėmis (2.6 lentelė). Kaip ir gryno PMA100 atveju, PMA70/D30 ir PMA70/PMME30 mišiniai, kuriuose didesniąją tūrio dalį sudarė PMA100, parodė pernelyg aukštas CI reikšmes.

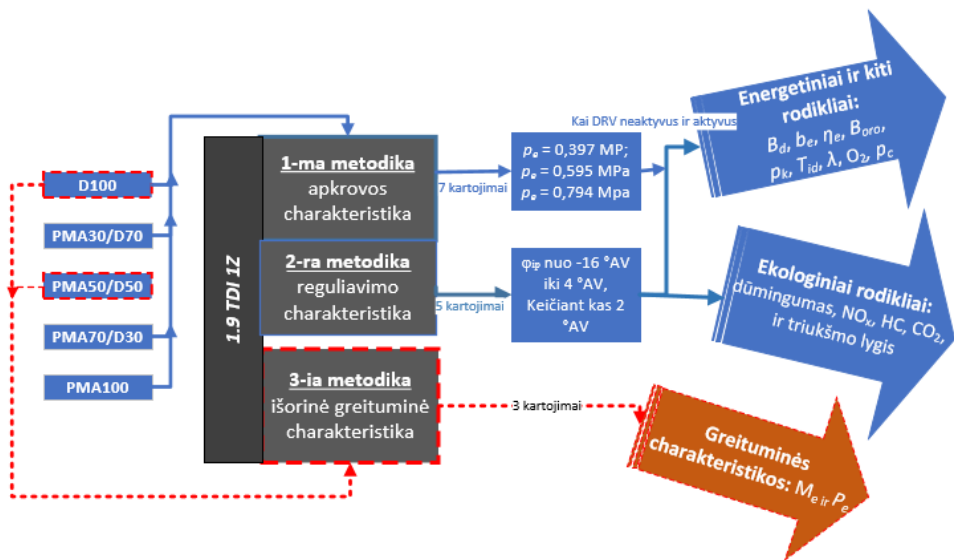
Į keturių kintamųjų lygtį vietoje degalų distiliacijos temperatūrų statant eksperimentines, TGA metodu nustatytas charakteringas T_{10} , T_{50} ir T_{90} reikšmes taikant CCl_2 metodą (C priedas C.1 lentelė.), buvo pakartotinai apskaičiuoti devynių degalų rūšių Cetaniniai indeksai, kurie pateikti 2.6 lentelėje. Iš 2.7 paveikslo. matyti, kad skirtumai tarp distiliacijos temperatūrų nustatytų iš nomogramų ir gautų eksperimentiškai ištyrus TGA termogramas sudarė: nuo $-20,7$ iki $-26,8$ % dyzelinui, nuo $-9,9$ iki $-25,1$ % biodyzelinui ir nuo $-12,3$ iki $-19,6$ % PMA100. Tai tiesiogiai turėjo įtakos apskaičiuotoms CI reikšmėms, kurios sumažėjo atitinkamai $-29,3$ % (D100), $-31,3$ % (PMME100) ir $-28,2$ % (PMA100). Lyginant su kontrolinėmis bazinių degalų CI reikšmėmis gautas aukštas CCl_2 metodu apskaičiuoto parametro atitikimas PMA100 ($+4,5$ %), tuo tarpu dyzelinui ir biodyzelinui nustatytas $-29,1$ % ir $-34,4$ % nuokrypis nuo mokslinėje literatūroje skelbtų rezultatų (Tsaousis *et al.* 2014, Go *et al.* 2012, Franklin *et al.* 2014). Remiantis šia tendencija galima teigti, kad dvikomponenčiai degalų mišiniai, savo sudėtyje turintys 70 % aliejaus dedamąją, iš visų tyrimui naudotų mišinių parodė mažiausią CI vertės paklaidą. 2.6 lentelėje pateiktos visoms trims bazinėms degalų rūšims ir jų mišiniams apskaičiuotos Cetaninio indekso (2.8 lygtis) reikšmės, nustatytos taikant Koseoglu *et al.* (2016) metodiką (2.4.2 poskyris; CCl_3 metodas). Rezultatai parodė gerą sutapimą su kontrolinėmis reikšmėmis, kurie išsidėstė šia tvarka: $CI_{45,0}$ (D100) < $CI_{61,0}$ (PMME100) < $CI_{66,0}$ (PMA100). CCl_3 metodas užtikrino 100 % skaičiuojamojo parametro sutapimą mikrodumblių biodyzelinui ir nežymią $-2,2$ % paklaidą dyzelinui. Didžiausia paklaida gauta skaičiuojant Cetaninį indeksą PMA100, kurio nustatyta reikšmė viršijo kontrolinę 10,4 CI vienetais. Nežiūrint gana ženklios paklaidos, gautos skaičiuojant PMA100 Cetaninį indeksą, mineralinio dyzelino ir PMME100 mišinių, o taip pat dvi komponentių degalų, kuriuose PMA100 sudarė 30 % bendro tūrio dalies, skaičiavimo rezultatai parodė geriausią atitikimą kontrolinėms reikšmėms. CCl_3 metodas parodė patikimus rezultatus šešioms iš devynių tyrimams naudotų degalų rūšių.

Vertinant trijų naudotų metodų tikslumą, du iš jų (CCl_1 ir CCl_3) parodė labai aukštą rezultatų sutapimą su dviejų bazinių degalų rūšių (D100 ir PMME100) kontrolinėms reikšmėms, ir vienas (CCl_2) – vienai. Mažiausią atitikimų skaičių parodęs metodas buvo atmetas. Pasirinkus, kad variklinių tyrimų metu bus naudojami tik D100 ir PMA100 bei jų tarpusavio mišiniai, CCl_1 ir CCl_3 metodams susumuotos gaunamos paklaidos skaičiuojant CI minėtiems degalams. Trečiasis metodas leido tiksliai apskaičiuoti D100 bei PMME100 CI reikšmes ir parodė gerą

sutapimą remiantis CI reikšmėmis paimtomis iš kokybės pažymėjimo ir kitų autorių atliktų tyrimų. Lyginant CCI_3 metodu apskaičiuotas PMME100 ir PMA100 reikšmės skirtumas tarp rezultatų siekė mažiau kaip 8 %, kas leidžia daryti prielaidą, kad apskaičiuota CI reikšmė PMA100 yra pagrįsta.

2.5. Vidaus degimo variklio eksploatacinių charakteristikų tyrimo metodologija

VDV tyrimai atlikti taikant tris metodikas: 1 – standiniai dyzelinio variklio bandymai jam dirbant pastoviu 2000 min^{-1} sūkių dažniu, trimis skirtingomis apkrovomis (maža, vidutine ir didele) bei naudojant keturias degalų rūšis (D100, PMA100, PMA30/D70, PMA70/D30); 2 – standiniai dyzelinio variklio bandymai jam dirbant pastoviu 2000 min^{-1} sūkių dažniu ir keičiant degalų įpurškimo pradžia nuo 16°AV iki VRT iki 4°AV už VRT, naudojant D100, PMA100, PMA30/D70, PMA70/D30; 3 – sukimo momento (M_e) ir galios (P_e) nustatymas automobilyje sumontuotame 1Z tipo varikliui, jam dirbant D100 ir PMA50/D50 degalais (2.8 pav.).



2.8 pav. Eksperimento planavimo diagrama
Fig. 2.8. Experiment planning diagram

Pagal 1–ą metodiką, tiriant variklio apkrovos charakteristikas trimis režimais (0,397 MPa, 0,595 MPa ir 0,794 MPa) varikliui veikiant su įjungtu ir išjungtu deginių recirkuliacijos vožtuvu, nustatyta penkiolika variklio eksploatacinių rodiklių, iš jų trys energetiniai rodikliai (valandinės ir lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos, bei efektyvusis naudingumo koeficientas); penki ekologiniai rodikliai (dūmingumas, NO_x , CH, CO_2 ir triukšmo lygis) ir septyni kiti rodikliai (O_2 , oro masės srautas, turbokompresoriuje sukuriama slėgis, cilindro slėgis, išmetamųjų dujų temperatūra ir oro pertekliaus koeficientas). Kiekvienas parametras buvo nustatomas iš 7 pakartotinių bandymų varikliui veikiant visoms degalų rūšims. Pagal 2–ą metodiką, tiriant variklio reguliavimo charakteristiką variklį apkrovus 0,397 MPa, kai keičiamas degalų įpurškimo paskubos kampas (nuo -16°AV iki $+4^\circ \text{AV}$) kas 2 laipsniai, varikliui veikiant su išjungtu DRV. Kaip ir pirmosios metodikos atveju nustatyta penkiolika variklio eksploatacinių rodiklių, iš jų trys energetiniai, penki ekologiniai ir septyni kiti rodikliai. Kiekvienas bandymas esant konkrečiai degalų įpurškimo kampo padėčiai buvo kartojamas 5 kartus. Pagal 3–ą metodiką tirta variklio išorinė greitinė charakteristika palaispniui didinant variklio veleno sūkių dažnį iki 4400 apsisukimų per minutę. Nustatyti dinaminiai variklio rodikliai (M_e ir P_e), bandymų skaičius apribotas iki 3.

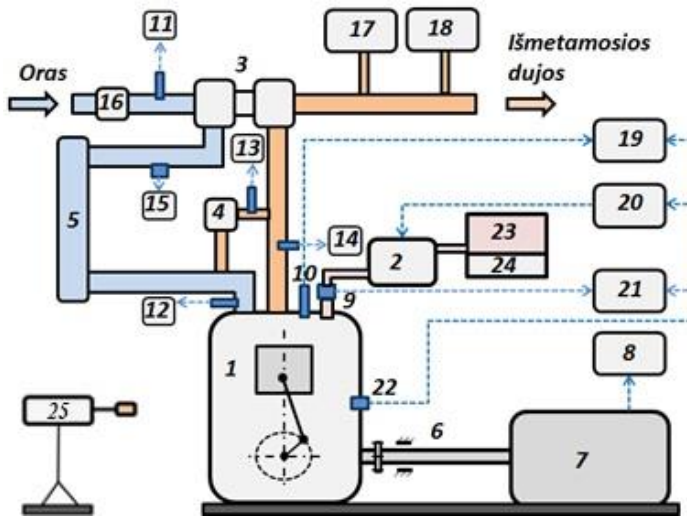
2.5.1. Eksperimentinės įrangos aprašymas ir matavimo tikslumas

VDV standiniai bandymai atlikti VGTU Automobilių inžinerijos katedros laboratorijoje. Dyzelinio variklio 1Z standinio variklio bandymų schema pateikta 2.9 paveiksle, o techniniai duomenys 2.7 lentelėje.

2.7 lentelė. Tyrimuose naudoto variklio 1Z techniniai duomenys

Table 2.7. Technical data of 1Z test engine

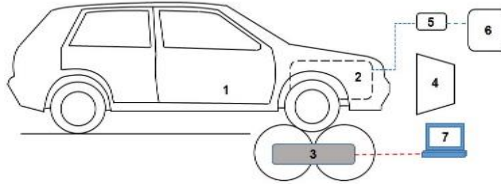
Variklis	1,9 TDI 1Z
Darbinis tūris V_H , cm^3	1896
Cilindrų skaičius	4
Cilindro diametras D , mm	79,5
Stūmoklio eiga S , mm	95,5
Suslėgimo laipsnis, ε	19,5
Didžiausia išvystoma galia P_{max} , kW	66 (esant 4000 min^{-1})
Didžiausias sukimo momentas M_{max} , Nm	180 (esant 2500 min^{-1})



2.9 pav. Stendinio variklio bandymų schema: 1 – variklis 1,9 TDI 1Z, 2 – aukšto slėgio degalų siurblys, 3 – turbokompresorius, 4 – DRV, 5 – oro aušintuvas, 6 – jungiamasis velenas, 7 – variklio apkrovos įrenginys, 8 – variklio sukčių 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 – DRV temperatūros jutiklis, 14 – išmetamų deginių temperatūros jutiklis, 15 – įsiurbiamo oro slėgio jutiklis, 16 – oro masės srauto matuoklė, 17 – išmetamųjų dujų analizatorius, 18 – dūmingumo analizatorius, 19 – cilindro slėgio reikšmių įrašymo įranga, 20 – degalų įpurškimo kampo reguliavimo įranga, 21 – degalų įpurškimo momento įrašymo įranga, 22 – alkūninio veleno padėties jutiklis, 23 – degalų talpa, 24 – degalų sąnaudų matavimo įranga (svarstyklės ir laikmatis), 25 – triukšmo matavimo prietaisas.

Fig. 2.9. The scheme of the bench-testing engine: 1 – The engine 1,9 TDI 1Z, 2 – high pressure fuel pump, 3 – turbocharger, 4 – DRV, 5 – air cooler, 6 – connecting shaft, 7 – engine load plate, 8 – engine speed and load recording equipment, 9 – fuel injection timing equipment, 10 – cylinder pressure sensor, 11 – intake air temperature sensor, 12 – intake air temperature sensor behind the turbocharger, 13 – EGR temperature sensor, 14 – exhaust gases temperature sensor, 15 – intake air pressure sensor, 16 – air flow meter, 17 – exhaust gases analyzer, 18 – smoke analyzer, 19 – cylinder pressure recording equipment, 20 – fuel injection angle adjustment equipment, 21 – fuel injection moment recording equipment, 22 – crank angle position sensor, 23 – fuel reservoir, 24 – fuel consumption measuring device (scales and timer), 25 – noise meter.

Vadovaujantis dyzelinio variklio charakteristikų nustatymo 3-ia metodika (2.10 pav.), bandymai atlikti Vilniaus technologijų ir dizaino kolegijoje, tyrimams panaudojant analogišką variklį kaip ir stendinių bandymų metu (2.7 lentelė).



2.10 pav. Automobilio bandymas galios (traukos) stendu CARTEC LPS 2510: 1 – tiriamas automobilis, 2 – VDV 1,9 TDI 1Z, 3 – varomosios ašies galios (traukos) stendas, 4 – aušintuvas, 5 – degalų filtras, 6 – degalų bakas, 7 – kompiuteris

Fig. 2.10. Vehicle test on dyno bench: 1 – tested vehicle, 2 – ICE 1,9 TDI 1Z, 3 – single axle dynamometer, 4 – cooler, 5 – fuel filter, 6 – fuel tank, 7 – computer

Eksperimente panaudotos įrangos detalus aprašymas pateiktas 2.8 lentelėje.

2.8 lentelė. Bandymams naudotos įrangos techniniai duomenys ir tikslumas

Table 2.8 Technical data and accuracy of test equipment

Prietaisas	Parametras	Matavimo duomenys	Vienetai	Tikslumas	Vienetai
1	2	3	4	5	6
Variklio apkrovos stendas KI-5543	Sūkių reguliavimo ribos	1600–3000	min ⁻¹	–	min ⁻¹
	Didžiausia apkrova	440	Nm	± 1,23	Nm
Deginių analizatorius AVL DiCom 4000	Variklio sūkliai	250–9990	min ⁻¹	10	min ⁻¹
	CO ₂	0–20	% (tūrio)	0,1	%
	HC	0–20000	ppm (tūrio)	1	ppm
	NO _x	0–5000	ppm (tūrio)	1	ppm
	O ₂	0–25	% (tūrio)	0,01	%
	λ	0–9,999	–	0,001	–
Dūmingumas	0–99,99	m ⁻¹	0,01	m ⁻¹	
Oro srauto matuoklė BOSCH HFM 5	Oro srauto matavimo ribos	8–370	kg/h	≤ 3	%
K tipo termopora (EN 60584)	Temperatūros matavimo ribos	nuo 0 iki +1250	°C	±0,5	%

2.8 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6
Triukšmomatis Cirrus CR:261S A (ISO 5130:2007)	Mikrafonas	Kondensatorinis nominalus jautris 50	mV/Pa, esant 1000 Hz	1+ tikslumo klasės prepoliarizuotas laisvo lauko ½ colio.	mV/Pa
		Talpa 18	pF		pF
	Matavimo ribos	60 (A) iki 130 (A), 60 (C) iki 130 (C)	dB	1 tikslumo klasė	dB
Slėgio cilindre matuoklis AVL GH13P	Matavimo ribos	0–250	bar	±0,3	bar
	Jautrumas	16	pC/bar	±0,09	pC/bar
	Temperatūros matavimo ribos	nuo –40 iki +400	°C	≤ 2	%
Slėgio cilindre fiksavimo įranga AVL DiTEST DPM 800	Įeinančio signalo ribos	6000	pC	±1	pC
	Išeinantis signalas	1	mV/pC		mV/pC
	Matavimo ribos	0–200	bar		bar
Degalų įpurškimo momento matavimo įranga AVL DiSystem 845	–	–	°AV	±1,0	°AV
Oro slėgio matuoklis Delta OHM HD 2304.0	Jutiklis TP704–2BAI	–	MPa	±0,0002	MPa
Elektroninės svarstyklės SK–5000	Matavimo ribos	Nuo 0 iki 5 kg	g	±0,5	g
Elektroninis laikmatis VWR 61161–326	–	–	%	0,001	%
Galios (traukos) stendas CARTEC LPS 2510	Didžiausias apkraunamas masė	3,5	t	±2	%
	Didžiausia išmatuojama apkrova	400	kW	–	kW
Ventiliatorius 19J/3K7–P2	Galingumas	3,7	kW	–	kW
	Sugeneruojams oro srautas	15300	m³/h	–	m³/h

Naudojant įvairius degalų mišinius oro pertekliaus koeficientai apskaičiuoti įvertinant įsiurbiamo oro masę, įpurškiamų degalų masę ir degalų specifines savybes.

2.5.2. Vidaus degimo variklio bandymų atlikimo metodika

Stendinių bandymų atlikimo eiliškumas pagal 1-ąją ir 2-ąją metodikas:

1. VDV paleidžiamas dirbti tuščiąja eiga, esant 1600 min^{-1} , kol variklio aušinimo alyva pasieks darbinę $90 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrą.
2. KI-5543 apkrovos stendu variklis veikė su išjungtu DRV esant vienam iš trijų pasirinktų apkrovos režimų (60 Nm , 90 Nm ir 120 Nm) bei nustatomas pastovus $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ alkūninio veleno sūkių dažnis.
3. Nustatomos VDV eksploatacinės (B_d , b_e , η_e , B_{oro} , p_k , T_{id} , p_c) ir emisinės (dūmingumas, NO_x , CH , CO_2 , O_2 ir triukšmo lygis) charakteristikos. Degalų sąnaudos apskaičiuojamos įvertinus laiką per kurį sudegė 100 g (mažos apkrovos režimu), 150 g (vidutinės apkrovos režimu) ir 200 g (didelės apkrovos režimu) degalų.
4. VDV charakteristikų nustatymo procedūros kartojamos 7 kartus.
5. Atlikus matavimus, VDV dirba tuščiąja eiga apie 5–7 minutes ir gesinamas. Naudotos degalų rūšies likučiai pašalinami iš degalų sistemos, o degalų filtras (Filtron PP838) keičiamas nauju.
6. Variklis parengiamas darbui kita degalų rūšimi ir paleidžiamas pa-dirbti apie 20 minučių tuščia eiga, kol alyva pasieks darbinę $90 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrą ir išdegs prieš tai naudotų degalų likučiai.
7. Bandymų eiga kartojama nuo 2 iki 6 kartų, kol nustatomos variklio charakteristikos su visomis degalų rūšimis.
8. Atlikus matavimus, VDV dirba tuščiąja eiga apie 5–7 minutes ir gesinamas. Naudotos degalų rūšies likučiai pašalinami iš kuro sistemos, o degalų filtras (Filtron PP838) keičiamas nauju. Variklis parengiamas tyrimams darbui su įjungtu DRV.
9. Bandymai atliekami pagal aukščiau pateiktus 1–7 metodikos žingsnius.
10. Variklio apkrovos ir reguliavimo charakteristikos buvo atliekamos viena po kitos kiekvienai degalų rūšiai. Naudotos degalų rūšies likučiai pašalinami iš degalų sistemos, o degalų filtras (Filtron PP838) kei-

čiamas nauju. Variklis parengiamas darbui su išjungtu DRV, esant žemai apkrovai ir skirtingų degalų įpurškimo momentų (nuo minus 16°AV iki plus 4°AV , jį keičiant kas 2°AV).

11. Variklio reguliavimo charakteristika atlikta VDV veikiant tik maža apkrova.
12. Variklio bandymai atliekami esant mažos variklio apkrovos, kartojant aukščiau aprašytos metodikos 2–6 punktus.

Automobilio bandymų atlikimo eiliškumas pagal 3-ją metodiką:

1. Automobilis užvažiuoja ant stendo CARTEC LPS 2510 ir yra įtvirtinamas įtempiamais diržais su užraktu. Automobilio priekyje pastatomas ventiliatorius 19J/3K7–P2, apsaugantis automobilinį variklį nuo perkaitimo, apkrovus jį didžiausia apkrova. Bandymų metu variklis maitinamas tiriamais degalais, tiekiamais tiesiogiai iš laboratorinės talpos.
2. Variklis paleidžiamas ir dirba tuščiąja eiga kol variklio aušinimo alyva pasieks darbinę 90°C temperatūrą.
3. Didžiausia variklio galia ir sukimo momentas pasiekiami esant įjungtai IV pavarai, palaipsniui didinant variklio veleno sukų dažnį iki $n = 4400 \text{ min}^{-1}$.
4. Naudojant kompiuterinę įrangą fiksuojami variklio galios ir sukimo momento duomenys išorinei greituminei charakteristikai sudaryti.
5. Bandymai pakartojami po 3 kartus.
6. Prieš sustabdant variklį, automobilis dirba tuščiąja eiga apie 5–7 min ir yra gėsinamas.
7. Iš degalų sistemos pašalinami buvę degalų likučiai, keičiamas smulkaus valymo degalų filtras (Filtron PP838).
8. Automobilio variklis paleidžiamas dirbti su kitomis degalų rūšimis tuščiąja eiga apie 20 minučių kol variklio aušinimo alyva pasieks darbinę 90°C temperatūrą ir bus išdeginti prieš tai tirtų degalų likučiai.
9. Pakeitus degalus atliekami veiksmai anksčiau aprašyti 2–6 žingsniuose.

2.5.3. Variklio eksploatacinių charakteristikų skaičiavimas

Vidaus degimo variklio efektyvioji galia P_e apskaičiuota, kW (Mollenhauer *et al.* 2010):

$$P_e = \frac{M_e \times n}{9549}, \quad (2.10)$$

čia M_e – efektyvusis sukimo momentas, Nm; n – variklio veleno sukimosi dažnis, min^{-1} .

Variklio vidutinsis efektyvusis slėgis p_e apskaičiuojamas, MPa:

$$p_e = \frac{P_e \times 30 \times \tau}{V_H \times n}, \quad (2.11)$$

čia τ – variklio taktų skaičius, V_H – variklio darbinis tūris, m^3 .

Valandinės degalų sąnaudos B_d apskaičiuojamos, kg/h (Mollenhauer *et al.* 2010):

$$B_d = \frac{m_d \times 3600}{t \times 1000}, \quad (2.12)$$

čia m_d – degalų masė, g; t – laikas per kurį sudegė degalų masės vienetas, s.

Lyginamosios efektyviosios sąnaudos b_e , apskaičiuojamos g/kWh (Mollenhauer *et al.* 2010):

$$b_e = \frac{1000 \times B_d}{P_e}, \quad (2.13)$$

Variklio efektyvusis naudingumo koeficientas η_e , apskaičiuojamas (Mollenhauer *et al.* 2010):

$$\eta_e = \frac{3600}{H_L \times b_e}, \quad (2.14)$$

čia H_L – degalų žemutinis šilumingumas, MJ/kg.

Oro pertekliaus koeficientas λ apskaičiuojamas (Mollenhauer *et al.* 2010):

$$\lambda = \frac{B_{oro}}{B_d \times l_o}, \quad (2.15)$$

čia B_{oro} – oro masės srautas, kg/h, l_o – reikalingas oro kiekis 1 kg degalų sudeginti, kg (Challen *et al.* 1999, Mollenhauer *et al.* 2010):

$$l_o = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right), \quad (2.16)$$

čia C – anglies, H – vandenilio, O – deguonies kiekiai. Tiksliam oro pertekliaus koeficiento įvertinimui buvo apskaičiuotas reikalingas oro kiekis 1 kg degalų sudeginti: 14,52 kg (D100), 13,95 kg (PMA30/D70), 13,20 kg (PMA70/D30), 13,58 kg (PMA50/50) ir 12,64 kg (PMA100).

2.6. Skaitinis degimo proceso modelio taikymas varikliui 1Z veikiant mikrodumblių aliejumi ir jo mišiniais

AVL BOOST programinis paketas leido atlikti skaitinę degimo proceso cilindre analizę. Cilindre vykstantys šilumos išsiskyrimo procesai apskaičiuoti įvertinus: slėgio cilindre dydį, nustatytą slėgio davikliu (2.9 pav.) bei į degimo kamerą įpurškiamų degalų fizikines–chemines charakteristikas: žemutinį šilumingumą, tankį, degalų ir oro santykį degimo procesui prasidėti (2.9 lentelė). Biologinės kilmės mikrodumblių aliejus pasižymi 81,3 kg/m³ didesniu tankiu (9,7 %) ir 9 MJ/kg arba 26,6 % mažesniu žemutiniu šilumingumu už mineralinį dyzeliną.

2.9 lentelė. Degalų fizikinės–cheminės charakteristikos

Table 2.9. Physical-chemical characteristics of fuel

Degalų rūšys	Žemutinis šilumingumas, MJ/kg	Tankis, kg/m ³	Stechiometrinis oro ir degalų santykis
D100	42,8	834,5	14,52
PMA30/D70	40,1	858,9	13,95
PMA70/D30	36,5	891,4	13,20
PMA100	33,8	915,8	12,64

Į AVL BOOST programą įvesti šie rodikliai: degalų ir oro sąnaudos, tiriamų degalų šilumingumas, slėgio cilindre reikšmės bei kiti variklio rodikliai. Remiantis eksperimentiniais stendinių bandymų rezultatais nustatyti slėgio cilindre duomenys buvo įvesti į AVL BOOST programą. Skaitinė degimo analizė cilindre, naudojant AVL BOOST programą leido nustatyti: slėgį cilindre p_c , slėgio cilindre kitimo greitį p_{cv} , temperatūrą cilindre T_c , temperatūros cilindre kitimo greitį T_{cv} , sudegusią degalų masės dalį $SDMD$ ir šilumos išsiskyrimo greitį cilindre Q_{cv} bei šių parametru priklausomybę nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo. Iš suformuotų grafikų (rezultatų) galima pakankamai tiksliai nustatyti indukcijos periodo trukmę, kinetinę degimo fazę, kontroliuojamą (difuzinę) degimo fazę ir baigiajamą degimo fazę bei jų trukmę.

2.7. Paklaidų analizė

Kiekvienas matavimas pasižymi tam tikru netikslumu. Matuojamo dydžio X gautas rezultatas x_i ir tikrosios matuojamo dydžio vertės x_t skirtumas vadinamas absoliučiąja paklaida Δx_i . Šią paklaidą lemia prietaisų netobulumas ir kiti veiksniai (Butrimaitė *et al.* 2003).

$$\Delta x_i = x_i - x_t. \quad (2.14)$$

Matavimo nuokrypiai, kai rodomas matuojamas dydis yra šiek tiek didesnis ar mažesnis nuo tikros vertės vadinamas sisteminga paklaida. Ją galima sumažinti tikrinant matavimo prietaisus bei matavimams taikant skirtingus metodus. Žinoma sisteminga paklaida yra žymima – pataisa. Taip pat atsiranda ir atsitiktinės paklaidos, kurios susidaro eksperimentų trikdžių metu. Jeigu matavimo metu gaunamos didesnės atsitiktinės paklaidos už sistemingas paklaidas, tai parametras matuojamas kelis kartus ir matyti skirtingi rezultatai. Pakartotinas matavimas kelis kartus iš eilės sumažina atsitiktinės paklaidos atsiradimo galimybes. Siekiant sumažinti atsitiktinės paklaidos reikšmę eksperimente tirti rodikliai buvo matuojami daug kartų juos vėliau suvidurkinant:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.15)$$

Atskirų matavimų paklaidos nustatomos:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (2.16)$$

Atskirų matavimų paklaidų kvadratai ir jų suma nustatoma:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2. \quad (2.17)$$

Kiekvienam matavimui nustatomas standartinis vidurkio nuokrypis:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (2.18)$$

Grubios klaidos, kurios aiškiai iškreipia rezultatą ir susidaro dėl eksperimentą vykdančio žmogaus neatidumo, neprofesionalumo ar staigaus matavimo sąlygų pasikeitimo ir t. t.. Gavus eksperimento rezultatus, kurie visiškai skiriasi nuo kitų, eksperimentas ir jo matavimai atliekami pakartotinai, minėtus atmetant kaip grubią klaidą, tačiau būtina patikrinti statistiniais metodais:

$$X_g = \frac{x_{max} - \bar{x}}{s} \leq x_i, \quad (2.19)$$

čia x_{max} – didžiausia matavimo aibės reikšmė.

Nustatomas matuojamo parametro neapibrėžties atsitiktinės paklaidos sandas:

$$\Delta x_{n,P} = t_{n,P} \times s, \quad (2.20)$$

čia $t_{n,P}$ – Stjudento koeficientas, n – matavimų skaičius, P – pasiklovimo tikimybė (pagal ES reikalavimus $P = 95\%$).

Matavimo prietaisai nusakomos tikslumo klase nuo 0,5 % iki 4 %. Jeigu ant matavimo prietaiso tikslumo klasės nėra, tai priimama, kad ji yra didesnė kaip 4 %. Matavimo prietaisų paklaidos dažniausiai įvertinamos kaip atsitiktinės nurodant jos didžiausią vertę Δx_{rib} (Butrimaitė *et al.* 2003):

$$\Delta x_{rib} = \frac{\delta_r x_{rib}}{100}, \quad (2.21)$$

čia δ_r – prietaiso santykinė redukuotoji paklaida (tikslumo klasė); x_{rib} – prietaiso skalės matavimo riba.

Prietaiso sistemingoji neapibrėžtis apskaičiuojama:

$$\Delta x_{p,P} = \frac{t_{\infty,P}}{3} \times \Delta x_{rib}, \quad (2.22)$$

čia $t_{\infty,P}$ – koeficientas, kurio reikšmė paimama iš Stjudento koeficientų lentelės (kadangi priimta, kad $P = 95\%$, tai $t_{\infty,P} = 2,0$).

Tiesioginių matavimų suminė neapibrėžtis nustatoma:

$$\Delta x_{s,P} = \sqrt{(\Delta x_{n,P})^2 + (\Delta x_{a,P})^2 + (\Delta x_{p,P})^2}, \quad (2.23)$$

čia $x_{a,P}$ – atskaitymo neapibrėžtis pasiklivimo tikimybei, kuri apskaičiuota įvedus apvalinimo intervalą h (kadangi priimta, kad $P = 95\%$, tai $\Delta x_{a,P} = h/2$).

Galutinis matavimo rezultatas:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_{s,P}. \quad (2.24)$$

Apskaičiuojama santykinė paklaida:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x_{s,P}}{\bar{x}} \times 100\%. \quad (2.25)$$

Netiesioginis matavimas atliekamas pagal determinuotą ryšį tarp matuojamo rodiklio ir kitų išmatuotų fizikinių dydžių, kuris gaunamas jį apskaičiuojant. Ieškomas dydis z yra pateikiamas kaip tiesiogiai matuojamų dydžių funkcija:

$$z = f(a, b, \dots). \quad (2.26)$$

Dydžio z paklaidos absoliučioji vertė:

$$|\Delta z| = |z - \bar{z}|. \quad (2.27)$$

Kai tiesiogiai matuojamų dydžių paklaidos yra žinomos paklaida nustatoma:

$$|\Delta z| = |f(\bar{a} + \Delta a, \bar{b} + \Delta b, \dots)| \leq \left| \frac{\partial f(\bar{a}, \bar{b}, \dots)}{\partial a} \right| |\Delta a| + \left| \frac{\partial f(\bar{a}, \bar{b}, \dots)}{\partial b} \right| |\Delta b| + \dots, \quad (2.28)$$

Jeigu matuojama daugiau dydžių, tai z tiksliau nustatoma pagal formulę:

$$\Delta z_{s,P} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta a_{s,P}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta b_{s,P}\right)^2 + \dots} \quad (2.29)$$

Matavimo rezultatai užrašomi su pasiklovimo tikimybe P :

$$z(a, b, c) = \bar{z}(\bar{a}, \bar{b}, \dots) \pm \Delta z_{s,P}. \quad (2.30)$$

Netiesioginių matavimų santykinė paklaida:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta z_{s,P}}{\bar{z}}. \quad (2.31)$$

Netiesioginių matavimų ribinės paklaidos parametrams P_e , p_e , B_d , b_e , η_e , λ nėra išmatuojamos, o apskaičiuojamos pagal 2.10–2.15 formules. Gautos šios paklaidos: P_e ($\pm 0,21$ kW ir 1,11 %); p_e ($\pm 0,0002$ MPa ir 0,03 %); B_d ($\pm 0,06$ kg/h ir 1,20 %); b_e ($\pm 4,45$ g/kWh ir 1,64 %); η_e ($\pm 0,006$ ir 1,62 %) ir λ ($\pm 0,14$ ir 7,02 %).

2.8. Antrojo skyriaus išvados

1. Tyrimams paruoštas mikrodumplių aliejus, biodyzelinas ir mineralinis dyzelinas bei parengti jų mišiniai 30/70 ir 70/30 dalimis pagal tūrį.
2. Atlikta detali mikrodumplių aliejaus ir jo mišinių su dyzelinu ir biodyzelinu terminė analizė naudojant TGA ir DSC metodus. DSC metodu nustatyta degalų virimo temperatūra buvo tikslesnė negu TGA metodu. Didžiausia virimo temperatūra 399,1 °C nustatyta PMA100 mėginiui. Visiška D100 bandinio destrukcija įvyko esant 280 °C, PMME100 pasiekus 370 °C temperatūrą ir 480 °C su PMA100. Rezultatai parodė, kad PMA100 pasižymėjo geriausiomis terminio stabilumo savybėmis.
3. Nustatyta, kad biodegalų užsiliepsnojimo temperatūrų nustatymui tinkamesnis yra dviejų liestinių (T_{iTL}) negu demarkacijos taškų metodas (T_{iA}). Didžiausia savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra pasižymėjo mikrodumplių aliejus 370,1 °C, o mažiausia 155,3 °C dyzelinas.
4. Biodegalų mišinių virimo ir užsiliepsnojimo temperatūros negali būti išskaičiuotos pagal proporciją žinant bazinių degalų rūšių reikšmes. To priežastis – skirtingos degalų fizikinės–cheminės savybės bei nevienodas tarpusavio susimaišymo efektyvumas. Galima teigti, kad mikrodumplių aliejaus įmaišymas į dyzeliną ir biodyzeliną santykiais 30 % ir 70 % ženkliai padidina tokių degiųjų mišinių terminį stabilumą.

5. Analitiškai apskaičiuotos Cetaninio indekso reikšmės, taikant tris skirtingus metodus ir pasirenkant CCI_3 metodą kaip tiksliausią. Rezultatai parodė gerą sutapimą su kontrolinėmis dyzelino ir biodyzelino CI reikšmėmis. CCI_3 metodas užtikrino 100 % skaičiuojamojo parametro sutapimą mikrodumblių biodyzelinui ir nežymią $-2,2$ % paklaidą dyzelinui. Skirtumas tarp mikrodumblių biodyzelino ir aliejaus Cetaninio indekso reikšmių siekė 8 %.
6. Tyrimams pasirinktas tokios pat modifikacijos standinis ir automobilyje sumontuotas 1,9 TDI slėginio uždegimo variklis. Taikant tris metodikas šios konstrukcijos variklis leidžia nustatyti energetinius, aplinkosauginius rodiklius bei išorinę greituminę charakteristiką.
7. Pasinaudojant skaitiniu degimo proceso modeliu analizuojamos šilumos išsiskyrimo funkcijos, kurių dėka galima nustatyti indukcijos periodą, degalų užsiliepsnojimo pradžią bei nagrinėti degimo trukmę ir jo intensyvumą.
8. Taikant tiesioginių ir netiesioginių matavimų paklaidas, apskaičiuotos absoliučiosios ir santykinės paklaidos: P_e ($\pm 0,21$ kW ir 1,11 %); p_e ($\pm 0,0002$ MPa ir 0,03 %); B_d ($\pm 0,06$ kg/h ir 1,20 %); b_e ($\pm 4,45$ g/kWh ir 1,64 %); η_e ($\pm 0,006$ ir 1,62 %) ir λ ($\pm 0,14$ ir 7,02 %).

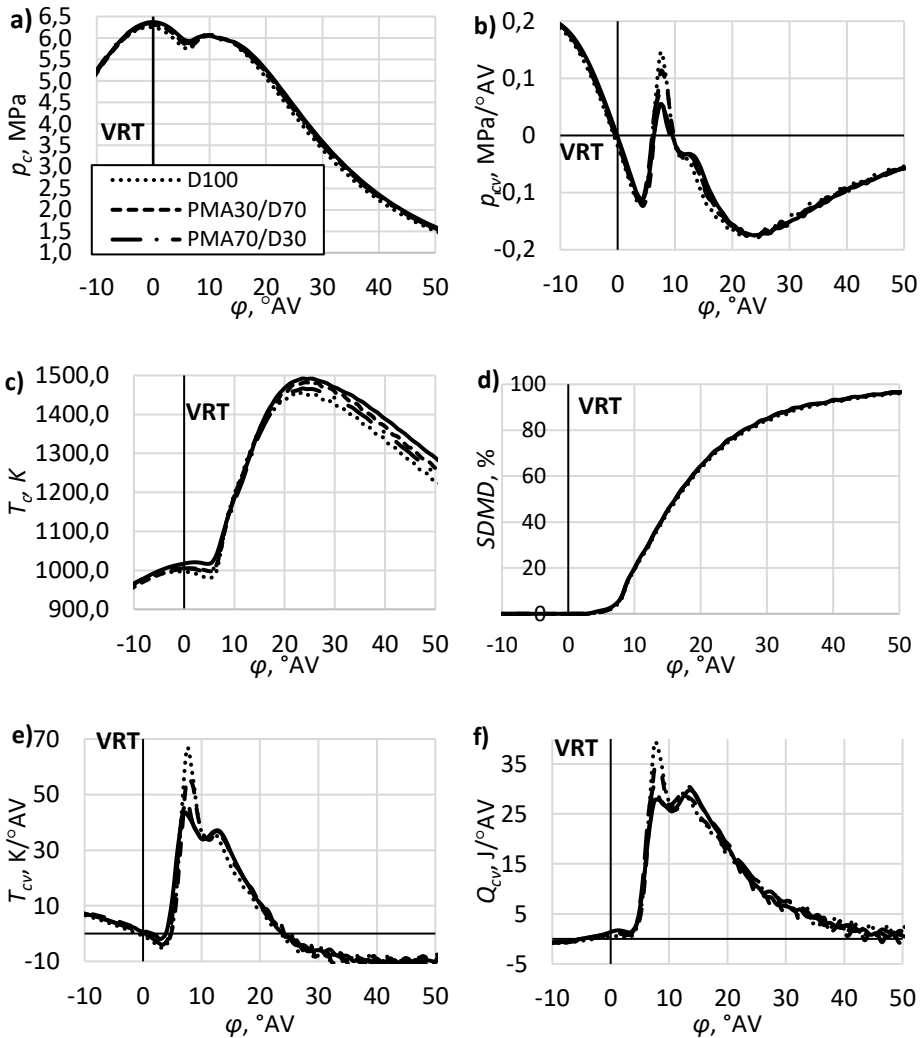
3

Teorinių ir eksperimentinių variklio bandymų rezultatai

Skyriaus tematika paskelbta viena publikacija (Raslavičius *et al.* 2019).

3.1. Skaitinė degimo proceso analizė varikliui veikiant mikrodumblių aliejumi ir jo mišiniais

Taikant AVL BOOST skaitinę matematinę analizę nustatytas indukcijos periodas ir degalų savaiminis užsiliepsnojimas. Degalų įpurškimo pradžia nustatyta maždaug $2,0\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT. Iš šilumos išsiskyrimo greičio kreivių (3.1 pav. f) matyti taškas, kuriame šiluma cilindre pradėjo didėti pasiekus $3,3\text{--}3,6\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT. Toks šilumos didėjimas susijęs su indukcijos periodo pabaiga ir kinetinės degimo fazės pradžia. VDV veikiant tirtais degalais ir mišiniais fiksuota labai panaši indukcijos periodo trukmė. Didžiausias skirtumas $0,3\text{ }^{\circ}\text{AV}$ nustatytas lyginant D100 ir PMA100. Savaiminis dyzelino užsiliepsnojimas įvyko anksčiausiai esant $3,3\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT. Degalų mišinių indukcijos periodas tęsėsi $0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{AV}$ ilgiau negu D100, o PMA100 užsiliepsnojo esant $3,6\text{ }^{\circ}\text{AV}$ (3.1 pav. f).



3.1. pav. Variklio cilindre nustatyta parametų priklausomybė nuo φ , kai $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,397 \text{ MPa}$, $\varphi_{ip} = 2 \text{ }^\circ\text{AV}$ iki VRT: a) slėgio cilindre; b) slėgio cilindre kitimo greičio; c) temperatūros cilindre; d) sudegusios degalų masės dalies; e) temperatūros cilindre kitimo greičio; f) šilumos išsiskyrimo cilindre greičio

Fig. 3.1. The dependence of the parameters as a function of φ when $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,397 \text{ MPa}$, $\varphi_{ip} = 2 \text{ CAD}$ before TDC is determined in the engine cylinder: a) pressure in the cylinder; b) pressure rise rate in-cylinder; c) temperature in the cylinder; d) mass fraction burnt; e) temperature rise rate in-cylinder; f) heat release rate in-cylinder

PMA100 dėl santykinai didelės klampos ($5,287 \text{ mm}^2/\text{s}$, esant 40°C) lėčiau išpurškiami pro standartinę degalų purkštuko adatą, bet dėl aukšto PMA100 Cetaninio indekso CI66,0 indukcijos periodas beveik nesiskyrė lyginant su D100. Išanalizavus šilumos išsiskyrimo greičio cilindre grafiką matyti, kad PMA100 atveju cilindre išsiskyre neženkliai didesnė temperatūra 31 K (3.1 pav. c) negu naudojant D100. Varikliui veikiant PMA100 fiksuotas $0,2 \text{ MPa}$ didesnis slėgis (3.1 pav. a) negu D100, kurį galėjo nulemti PMA100 didesnės degalų ir deguonies sąnaudos. Indukcijos periodo metu p_c , T_c , Q_{cv} skaitinės reikšmės išsidėstė šia tvarka: PMA100 > PMA70/D30 > PMA30/D70 > D100. Iš 3.1 e paveikslu akivaizdžiai matyti, kad indukcijos periodo metu temperatūros cilindre kitimo greitis tapo neigiamu dėl į degimo kamerą įpurkštų degalų lašelių, kurie sunaudojo dalį cilindre esančios šilumos jų išgaravimui, todėl temperatūra degimo kameroje beveik nepakito (3.1 pav. c).

Kinetinė degimo fazė prasideda iškart po savaiminio degalų užsiliepsnojimo $\varphi = 3\text{--}4^\circ\text{AV}$ už VRT ir tęsiasi apie $7\text{--}8^\circ\text{AV}$. Šios degimo fazės metus fiksuotas staigus Q_{cv} augimas, o didžiausias šilumos išsiskyrimas pasiektas alkūniniam velenui pasisukus $7,7$ laipsnių kampu. Varikliui veikiant dyzelinu $Q_{cv} = 39,0 \text{ J}^\circ\text{AV}$, naudojant PMA30/D70 ($Q_{cv} = 34,0 \text{ J}^\circ\text{AV}$), PMA70/D30 ($Q_{cv} = 30,8 \text{ J}^\circ\text{AV}$) ir PMA100 atveju Q_{cv} ekstremumas ($27,7 \text{ J}^\circ\text{AV}$) sumažėjo 29% lyginant su D100 (3.1 pav. f). Nustatyta, kad iš PMA100 išsiskiria $26,6\%$ mažesnis energijos kiekis negu iš dyzelino (2.9 lentelė) ir atitinkamai sumažėjo šilumos išsiskyrimo reikšmės. Alkūniniam velenui pasisukus $7,7^\circ\text{AV}$ kampu, fiksuota praktiškai identiška slėgio ir temperatūros kitimo greičio cilindre pasiskirstymo tendencija kaip ir Q_{cv} atveju D100 > PMA30/D70 > PMA70/D30 > PMA100. Varikliui veikiant dyzelinu p_{cv} ekstremumas buvo $62,1\%$ didesnis už variklio veikiančio PMA100 (3.1 pav. b), o T_{cv} didesnė $53,7\%$ už PMA100 (3.1 pav. e). Intensyvesnį slėgio ir temperatūros kitimo greitį cilindre lėmė lakesnis ir mažesnės savitosios šiluminės talpos (1800 J/kgK) dyzelinas lyginant su PMA100 $c_i = 2046 \text{ J/kgK}$. Varikliui veikiant dyzelinu cilindre greičiau susiformuoja paruoštas degalų mišinys, kuris degimo metu prisideda prie slėgio ir temperatūros šuolių bei didžiausių reikšmių susidarymo (3.1 pav. b ir 3.1 pav. e). Stūmokliui pasiekus VRT, slėgis cilindre pasiekė didžiausias reikšmes varikliui dirbant visomis keturiomis degalų rūšimis D100 – $6,25 \text{ MPa}$, PMA30/D70 – $6,31 \text{ MPa}$, PMA70/D30 – $6,34 \text{ MPa}$ ir PMA100 – $6,37 \text{ MPa}$ (3.1 pav. a). Indukcijos periodo metu slėgis cilindre sumažėjo apie 3% , o alkūniniam velenui pasisukus $6,5^\circ\text{AV}$ kampu fiksuota žemiausia slėgio cilindre reikšmė degimo fazės metu D100 – $5,75 \text{ MPa}$, PMA30/D70 – $5,81 \text{ MPa}$, PMA70/D30 – $5,89 \text{ MPa}$ ir PMA100 – $5,93 \text{ MPa}$. Alkūniniam velenui pasisukus daugiau kaip $6,5^\circ\text{AV}$, p_c pradėjo didėti kol buvo pasiektas didžiausias kinetinės degimo fazės metu susidaręs slėgis D100 – $6,07 \text{ MPa}$, PMA30/D70 – $6,07 \text{ MPa}$, PMA70/D30 – $6,03 \text{ MPa}$ ir PMA100 – $6,05 \text{ MPa}$, kai $\varphi = 9,5\text{--}10,5^\circ\text{AV}$ (3.1 pav. a). Iš pateiktų rezultatų matyti, kad kinetinės degimo fazės pabaigoje

slėgio cilindre reikšmės praktiškai susilygino dėl D100 būdingo didesnio lakumo ir mažesnės savitosios šiluminės talpos, kurie lėmė staigų p_{cv} ir T_{cv} reikšmių augimą (3.1 pav. b ir e). Esant $10,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT temperatūra cilindre ženkliai išaugo $19,6\text{--}21,9\%$ (D100 – $1214,7\text{ K}$ ir PMA100 – $1203,0\text{ K}$) lyginant su degalų įpurškimo pradžios T_c reikšme (3.1 pav. c). Velenui esant $10,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$ vidutiniškai sudegė ketvirtadalis visos degalų frakcijos, fiksuotas $3,7\%$ didesnis SDMD naudojant PMA100 vietoje D100 (3.1 pav. d).

Prasidėjus difuzinei degimo fazei SDMD ir toliau didėjo, o skirtumas tarp variklio dirbančio D100 ir PMA100 mažai pakito. Varikliui veikiant PMA100 difuzinės degimo fazės pabaigoje, kai $\varphi = 25,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT, SDMD išaugo iki $78,0\%$, o D100 sudegė apie $77,0\%$ degalų masės dalies. Į degimo kamerą įpurškimas PMA100 suskyla į didelius lašelius, kurie oksiduojančioje aplinkoje savaime užsiliepsnoja. Išgauti homogenišką mišinį nėra lengva dėl jų lemiančių daug veiksnių: degalų rūšis, degimo kameros konstrukcija, degalų purkštukai, siurblio tipas ir t. t. Besibaigiant kinetinei degimo fazei slėgio ir temperatūros cilindre kitimo greitis ženkliai sumažėjo D100 atveju, bet praktiškai nepakito naudojant PMA100 (3.1 pav. b ir e). Difuzinės degimo fazės pabaigoje p_{cv} ir T_{cv} reikšmės prilygo indukcijos periodo metu gautiems rezultatams. Temperatūros cilindre ekstremumo reikšmės nustatytos alkūniniam velenui pasisukus $23,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$. Varikliui veikiant PMA100 fiksuota $T_c = 1492\text{ K}$ ir 35 K žemesnė temperatūra su D100 (3.1 pav. c). Temperatūra cilindre pradėjo mažėti besibaigiant difuzinei degimo fazei ir tęsėsi iki pereinant į baigiamąją degimo fazę, kai alkūninis velenas pasisuko didesniu kaip 25 laipsnių kampu. Varikliui dirbant PMA100 šilumos išsiskyrimas (3.1 pav. f) difuzinės degimo fazės metu buvo intensyvesnis negu kinetinės degimo fazės metu. Didžiausia $Q_{cv} = 29,8\text{ J}/^{\circ}\text{AV}$ reikšmė fiksuota VDV veikiant PMA100 esant $13,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$, o D100 tame pačiame taške $Q_{cv} = 27,8\text{ J}/^{\circ}\text{AV}$. Difuzinei degimo fazei tęsiantis šilumos išsiskyrimo reikšmės kaip ir temperatūra cilindre mažėjo. Besibaigiant kinetinei degimo fazei slėgis cilindre pradėjo tolygiai mažėti, o lyginant slėgį cilindre difuzinės degimo fazės pradžioje ir besibaigiant ($10,5\text{--}25,0\text{ }^{\circ}\text{AV}$) jis sumažėjo $1,95\text{ MPa}$ ($\sim 32\%$) D100 atveju ir $1,71\text{ MPa}$ ($\sim 28\%$) PMA100 atveju (3.1 pav. a). Varikliui veikiant PMA100 slėgis cilindre buvo didesnis visose degimo fazėse ir indukcijos periodo metu, dėl išaugusio įsiurbiamo oro kiekio (3.5 pav.). Cilindras užpildytas didesniu degalų ir oro kiekiu lėmė slėgio didėjimą, bet taip pat reikėtų paminėti, kad per išmetimo kolektorių buvo pašalintas didesnis išmetamų deginių kiekis, kurie padidina turbokompresoriaus sukimosi greitį ir suslėgto įsiurbiamo oro kiekį.

Analizuojant šilumos išsiskyrimo grafiką (3.1 pav. f) galima matyti baigiamąją degimo fazę esant $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{AV}$, kur susiformavo netolygus (turbulentinis) šilumos išsiskyrimas. Varikliui veikiant PMA100, D100 ir jų tarpusavy mišiniais Q_{cv} reikšmės praktiškai nepakito ir pasižymėjo panašiais rezultatais. Pastebėta, kad į

cilindrą įpurškus PMA100 buvo fiksuotas tolygesnis šilumos pasiskirstymas. Baigiamosios degimo fazės metu p_c reikšmės ir toliau mažėjo, o esant 50,5 °AV fiksuotas 1,57 MPa slėgis VDV dirbant PMA100 ir 1,48 MPa su D100 (3.1 pav. a). Reikėtų pažymėti, kad p_c , T_c ir Q_{cv} reikšmės varikliui veikiant skirtingomis degalų rūšimis baigiamojoje degimo fazėje yra labai panašaus pobūdžio. Reikėtų pažymėti, kad atlikus skaitinę degimo proceso cilindre analizę AVL BOOST programa PMA100 ir jo mišinių su D100 nebuvo įvertinta cheminė elementinė sudėtis, dėl komplikuočių galimybių. Todėl buvo atlikta kitų tyrėjų rezultatų analizė ir remiantis autorių Lebedevas *et al.* (2020) skaitiniu vienzoniniu matematiniu modeliu, kur buvo įvertinta degalų elementinė sudėtis. Nustatyta, kad naudojant AVL BOOST programą darbe gauta apie 3–4 % paklaida. Atsižvelgiant į kitų tyrėjų atliktus tyrimus galima daryti prielaidą, kad varikliui veikiant PMA100 šilumos išsiskyrimo cilindre reikšmės (3.1 pav. f) turėtų būti apie 3–4 % didesnės nei pavaizduotos darbe.

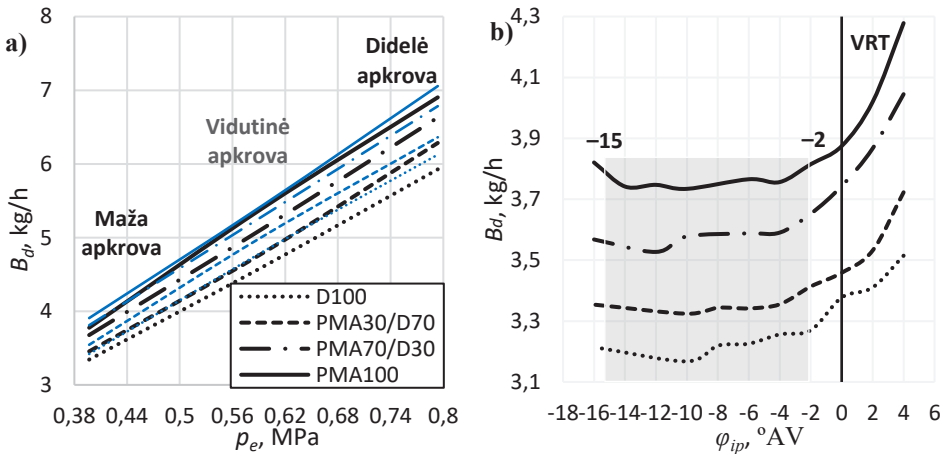
3.2. Variklio veikiančio *P.moriformis* aliejumi ir jo mišiniais energetinių rodiklių tyrimas

3.2.1. Valandinės ir lyginamosios efektyviosios degalų sąnaudos

VDV veikiant plačiame apkrovų diapazone su tirtais degalais fiksuotas tiesinis B_d reikšmių augimas didėjant vidutiniam efektyviajam slėgiui (3.2 pav. a). Mažiausios valandinės degalų sąnaudos 3,34 kg/h nustatytos VDV veikiant D100 ir 13,2 % didesnės (3,78 kg/h) su PMA100 esant $p_e = 0,397$ MPa. Trejais skirtingais apkrovų režimais išbandytam varikliui biologinės kilmės degalai nulėmė didesnes B_d ir b_e reikšmes lyginant su D100, kurios aiškinamos 26,6 % didesne PMA100 už D100 žemutinio šilumingumo reikšme (33,8 MJ/kg ir 42,8 MJ/kg). Variklio apkrovą padidinus iki 0,595 MPa, B_d vidutiniškai išaugo 38,0–43,1 % lyginant su VDV veikimu žema apkrova ir priklausomai nuo degalų rūšies B_d rezultatų kreivės išsidėstė tokia tvarka (padidėjimas % lyginant su D100): PMA100 (13,1 %) > PMA70/D30 (10,2 %) > PMA30/D70 (4,4 %) > D100. Padidinus p_e iki 0,794 MPa, dėl gerokai išaugusio slėgio ir temperatūros cilindre degimo procesas suintensyvėjo. VDV veikė vidutiniškai 27,5–28,6 % didesnėmis B_d reikšmėmis negu esant vidutinei VDV apkrovai. Tiriamų apkrovų diapazone, kai p_e kito nuo 0,397 MPa iki 0,794 MPa naudojant PMA100 B_d vidutiniškai išaugo 0,44–0,97 kg/h lyginant su D100 B_d reikšmėmis (3.2 pav. a). VDV veikiant skirtingais degalais aukštos apkrovos režime nustatyta identiška tendencija kaip ir varikliui veikiant maža ar vidutine apkrovomis, tačiau PMA100 B_d reikšmė lyginant su D100 išaugo 16,4 %, atitinkamai išaugo PMA70/D30 (11,8 %) ir PMA30/D70

(5,9 %). Šia tendenciją patvirtina kitų tyrėjų atlikti tyrimai VDV naudojant aliejų ir jo mišinius (Kalam *et al.* 2003, Pramanik *et al.* 2003, Murugesan *et al.* 2009, Nettles–Anderson *et al.* 2014, Altin *et al.* 2001, Wang *et al.* 2003).

Atlikus degimo proceso cilindre analizę (3.1 pav.) nustatyta, kad kinetinės degimo fazės metu ($\varphi = 5\text{--}10,5$ °AV už VRT), slėgis ir temperatūra cilindre augo intensyviau kuomet į degimo kamerą buvo įpurškiamas D100 ir lėčiau įpurškiant PMA100 (3.1 b ir 3.1 pav. e). Esant $7,0\text{--}7,5$ °AV už VRT nustatyta dyzelino šilumos išsiskyrimo greičio ekstremumo reikšmė, kuri ~ 41 % buvo didesnė už PMA100 (3.1 pav. f). Besibaigiant šiai degimo fazei, apytikriai ties $10,5$ °AV, Q_{cv} reikšmės PMA100 ir D100 pasiekė beveik identišką skaitinę reikšmę. Difuzinės degimo fazės metu stebėtas 4–5 % spartesnis šilumos išsiskyrimas vykstant PMA100 termininei oksidacijos reakcijai o, pasiekus 20 °AV už VRT, panašūs Q_{cv} rezultatai gauti varikliui dirbant su visomis degalų rūšimis. Iš 3.1 a ir 3.1 c paveikslų matyti, kad PMA100 indukcijos periodo, kinetinės ir difuzinės degimo fazių metu slėgis ir temperatūra cilindre buvo neženkliai didesni negu degant dyzelinui. Šį rezultatą galima lėmė didesnis turbokompresoriuje sukuriamas slėgis (3.6 pav.).



3.2 pav. Valandinių degalų sąnaudų B_d kitimo priklausomybė nuo:

a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , kai neaktyvus DRV (juodos kreivės) ir aktyvus DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.2. Variation of hourly fuel consumption (B_d) against a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Aktyvavus DRV, kurio pagrindė paskirtis – NO_x kiekio mažinimas išmetamosiose dujose, B_d reikšmės $0,397\text{--}0,794$ MPa VDV apkrovų diapazone visoms

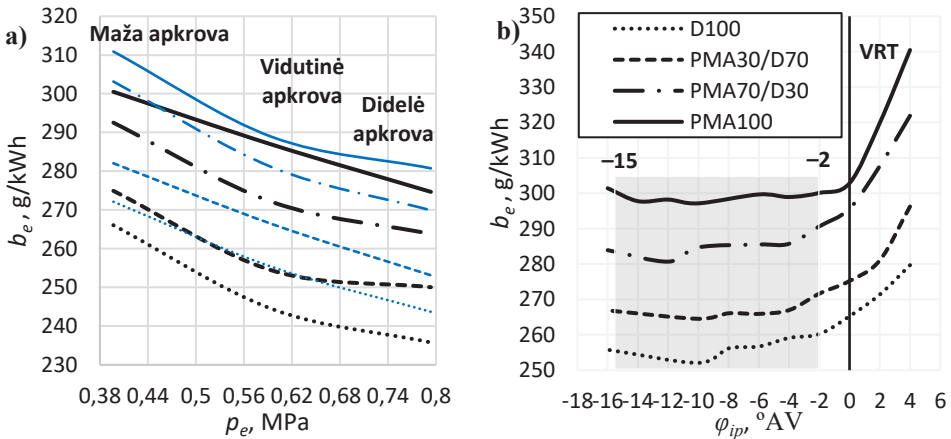
degalų rūšims išsaugo 3 %. Lyginant PMA100 ir D100 degalų valandines sąnaudas kuomet VDV dirba su neaktyviu ir aktyviu DRV pastebėtos šios B_d reikšmių didėjimo tendencijos: +2,4 % ir +3,4 % esant 0,397 MPa, +0,56 % ir +4,34 % esant 0,595 MPa bei +3,4 % ir +2,3 % esant 0,794 MPa. PMA100 sudėtyje yra 10,5 % deguonies, prisidedančio prie efektyvesnio degimo proceso cilindre, kuris dar stipriau matomas esant aktyviam DRV, kai padidėja cilindre padidėja deginių koncentracija ir sumažėja deguonies. Biologinės kilmės degalai dalinai kompensuoja sumažėjusį oksidatoriaus kiekį degimo kameroje. Varikliui veikiant tirtame apkrovų diapazone su aktyviu DRV, nustatyta, kad PMA100 valandinės degalų sąnaudos vidutiniškai išsaugo 13,8 % lyginant su D100 t. y. 1,9 % mažiau negu VDV veikiant su neaktyviu DRV, kas patvirtino efektyvesnio degimo sąlygas cilindre sumažėjus deguonies kiekiui.

Variklio degalų sąnaudų pokyčiai buvo eksperimentiškai ištirti ankstinant ir vėlinant degalų įpurškimo kampą VRT atžvilgiu. 3.2 b paveiksle pažymėtas sklandaus degalų įpurškimo kampų diapazonas tarp -15 ir -2 °AV iki VRT, tinkantis 1Z konstrukcijos variklio darbui su PMA100 ir jo mišiniais. Nustatyta, kad ankstinant degalų įpurškimą lėmė didesnę degimo proceso efektyvumą ir leido sumažinti B_d iki 2,2 %. Priešinga tendencija gauta vėlinant φ_{ip} , kuomet šilumos išsiskyrimas prasidėjo vėliau, o susiformavęs slėgis cilindre ne taip efektyviai paverčiamas į darbą. Alkūniniam velenui pasisukus 4 laipsniais už VRT fiksuotas 11,0 % didesnės B_d VDV veikiant PMA100 ir 3,5 % didesnės B_d VDV veikiant D100 (3.2 pav. b).

Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų su aktyviu ir neaktyviu DRV priklausomybė nuo variklio efektyviosios galios p_e pavaizduota 3.3 a paveiksle. Didėjant variklio apkrovai nuo mažos iki didžiausios b_e palaipsniui mažėjo. Esant 0,794 MPa VDV apkrovai fiksuotos mažiausios b_e su D100 (235,8 g/kWh) ir 15,2 % didesnės 274,7 g/kWh VDV veikiant PMA100. Į variklį tiekiant 30 % ir 70 % koncentracijos degalų mišinius su mikrodumblių aliejumi b_e reikšmės išsaugo 6,0–11,9 % lyginant su D100. Varikliui dirbant su aktyviu DRV, mineralinio dyzelino ir PMA100 b_e reikšmės, lyginat jas su prieš tai nustatytomis, vidutiniškai išsaugo iki 4,7 % ir iki 3,5 % (3.3 pav. a, mėlynos linijos). Analogiškai kaip ir eksperimentų rezultatams, gautiems varikliui veikiant su neaktyviu DRV, mažiausios degalų sąnaudos nustatytos esant $p_e = 0,794$ MPa, kuomet 1 kW mechaninės energijos per valandą pagaminti prireikė 243,7 g D100 arba 280,8 g PMA100.

Kaip matyti iš 3.3 b paveikslo b_e kitimo tendencijos ankstinant arba vėlinant degalų įpurškimo kampą savo grafine išraiška gautos analogiškos 3.2 b paveiksle atvaizduotiems B_d rezultatams. Pažymėtame efektyvaus degalų įpurškimo kampo ankstinimo intervale b_e rodė vidutiniškai 1,9–5,5 % (D100) ir 0,7–1,3 % (PMA100) mažesnes b_e reikšmes negu, kai $\varphi_{ip} = 0$ °AV. b_e reikšmės kito nuo 251,8 g/kWh iki 260,0 g/kWh VDV veikiant D100 ir nuo 297,2 g/kWh iki 299,9 g/kWh su PMA100. Variklį eksploatuojant PMA100 maža apkrova b_e

išaugo 13,5–17,3 % lyginant su D100. Šie rezultatai gerai sutampa su kitų autorių atliktais tyrimais (Vaitilingom *et al.* 2006, Agarwal *et al.* 2009, Daho *et al.* 2009, Agarwal *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006, Altin *et al.* 2001, Charlet *et al.* 1994, Pramanik *et al.* 2003, Vaitilingom *et al.* 2006, Vanhemelryck *et al.* 1997) ir kitų tyrėjų rezultatais pateiktais 1.10 ir 1.11 lentelėse.



3.3 pav. Lyginamųjų efektyviųjų degalų sąnaudų b_e kitimo priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , kai neaktyvus DRV (juodos kreivės) ir aktyvus DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.3. Variation of brake specific fuel consumption (b_e) against a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was off (black curves) and EGR was on (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

3.2.2. Variklio efektyvusis naudingumo koeficientas

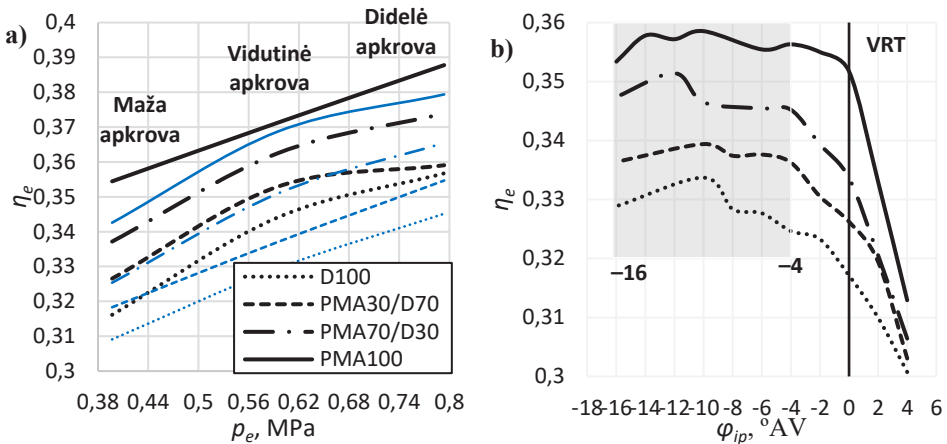
Šis koeficientas priklauso nuo degalų degimo proceso metu išsiskyrusios šiluminės energijos efektyvaus panaudojimo. Varikliui veikiant 0,397–0,794 MPa apkrovų diapazone mineraliniu dyzelinu fiksuotas η_e reikšmių didėjimas 0,316–0,357 didinant apkrovą (3.4 pav. a). Nustatyta, kad išaugus p_e , cilindre susidarė geresnės oro sukuriavimo bei maišymosi su degalais sąlygos, todėl variklio η_e padidėjo iki 13 % esant 0,794 MPa VDV apkrovai. Deguonies savo sudėtyje turintis PMA100 lėmė homogeniško degalų mišinio susidarymą degimo kameroje, leido suformuoti geresnes degimo sąlygas cilindre negu varikliui veikiant D100 ir sugeneruoti didesnio efektyvumo degimo procesą kinetinės ir difuzinės degimo fazės metu. Nustatyta, kad VDV veikiant PMA100 η_e išaugo 12 % esant mažai variklio apkrovai, 7,9 % esant 0,595 MPa ir 8,7 % esant 0,794 MPa lyginant su D100. VDV veikiant PMA30/D70 ir PMA70/D30 lyginant su D100 η_e padidėjo 3,5–6,6 %

(maža apkrova), 2,6–5,5 % (vidutine apkrova) ir 0,6–4,8 % (didele apkrova). Autoriai Agarwal *et al.* (2007), Rakopoulos *et al.* (2006) patvirtino šią tendenciją atlikę tyrimus su mineraliniu dyzelinu ir augaliniais aliejais. Taip pat šią prielaidą galima patvirtinti panaudojus AVL BOOST programą, atlikant degimo proceso analizę cilindre (3.1 pav). Iš 3.1 a paveikslo matyti, kad kinetinės degimo fazės metu VDV veikiant PMA100 p_c buvo 2,2 % didesnis už D100 (3.1 pav. a) bei kito tolygiau (3.1 pav. b). Degimo procesui pereinant iš kinetinės degimo fazės į anksčiau difuzinę degimo fazę, kai φ daugiau negu 10,5 °AV už VRT, fiksuotas praktiškai identiškas slėgis cilindre 6,05 MPa (3.1 pav. a). Tęsiantis difuziniam degimui nustatyta, kad PMA100 degimo metu susidarė 2–3 % didesnis slėgis cilindre ir 3–4 % išaugo temperatūra lyginant su D100 (3.1 pav. c). Besibaigiant difuziniam degimui variklio darbas su PMA100 prisidėjo prie išaugusių p_c ir T_c reikšmių lyginant su D100. Kambario ar žemesnėje temperatūroje PMA100 būdinga 10 kartų didesnė kinematinė klampa už dyzelino, dėl šios fizikinės savybės degalų siurblys ir kiti variklio komponentai patiria ženkliai didesnę apkrovą. Aliejaus judėjimas degalų žarnos tampa sąlyginai lėtas ir sudėtingas, dėl ko sueikvojamas pakankamai didelis energijos kiekis aliejaus klampai įveikti, kas nulemia išpurškiamų degalų kokybę. Varikliui veikiant PMA100 indukcijos periodas užsitęsė kiek ilgiau nei su D100, tačiau skirtumas buvo minimalus. PMA100 didelę dinaminę klampą kompensavo itin aukštu Cetaniniu indeksu CI66,0 (46,7 % didesnis už D100), kuris buvo nustatytas 2.4.3 skyriuje. Degalų mišiniai PMA30/D70 ir PMA70/D30 pasižymėjo mažesne kinematinė klampa už PMA100 bei didesniu CI už D100. PMA100 užsiliepsnojus ir prasidėjus degimo procesui fiksuotas 0,2 MPa išaugęs slėgis (3.1 pav. a) ir 20 K aukštesnė temperatūra (3.1 pav. c) degimo kameroje negu varikliui veikiant dyzelinu. Išanalizavus sudegusią degalų masės dalį (3.1 pav. d) matyti, kad PMA100 degimas vyko efektyviau už D100, o 50 % PMA100 masės sudegė 0,5 °AV anksčiau negu toks pats kiekis dyzelino. Varikliui veikiant degalų mišiniais PMA30/D70 ir PMA70/D30 tirtame variklio apkrovų diapazone gauti išaugę η_e rezultatai (0,6 % ir 3,5 %; 4,8 % ir 6,7 %) lyginant su D100.

VDV su aktyviu DRV lėmė oksidatorių kiekio sumažėjimą degimo kameroje ir turėjo neigiamos įtakos η_e rodikliui, kuris vidutiniškai sumažėjo 3,2 % naudojant D100 ir 2,0 % su PMA100 (3.4 pav. a mėlyna spalva). Varikliui veikiant su aktyviu DRV dalis išmetamųjų dujų buvo grąžintos į degimo kamerą ir sumažėjo deguonies koncentracija. Įvertinus visą variklio 1Z apkrovų diapazoną DRV aktyvavimas lėmė, kad VDV veikiant PMA100 vidutiniškai 10,9 % padidėjo η_e negu VDV veikiant D100. Degalų mišinys savo sudėtyje turintis mažesnę aliejaus ir deguonies kiekį PMA30/D70 lėmė prastesnius η_e rezultatus, tačiau vidutiniškai 4,9 % η_e buvo didesnis negu VDV veikiant D100.

Slėginio uždegimo varikliui veikiant maža apkrova, didžiausias η_e pasiektas naudojant PMA100, kai degalų įpurškimas į degimo kamerą buvo paankstintas –

10 °AV iki VRT. Variklio darbo efektyvumas išreikštas per η_e , kurio reikšmė lygi 0,359 ir sudarė 7,2 % didesnę η_e lyginant su D100 VDV veikiant tokiomis pat sąlygomis. Varikliui dirbant degalų mišiniais fiksuotas +3,3 % (PMA70/D30) ir +1,2 % (PMA30/D70) η_e didėjimas lyginant su D100. Paankstinus φ_{ip} iš eksperimentinių rezultatų buvo nustatytas sklandaus φ_{ip} intervalas nuo -16 °AV iki -4 °AV iki VRT. Didžiausios η_e reikšmės pasiektos nuo -14 °AV iki -10 °AV iki VRT intervalo ribose. Esant sklandaus φ_{ip} intervalui η_e reikšmės išsidėstė šia tvarka: PMA100 > PMA70/D30 > PMA30/D70 > D100, o intervalo ribos sutapo su efektyviomis mažų degalų sąnaudų reikšmių ribomis (3.2 pav. b ir 3.3 pav. b). Šiuos rezultatus patvirtino Knothe *et al.* (2003) atlikti eksperimentai, kai paankstinus deglaų įpurškimą VDV veikiant augaliniu aliejumi buvo gauti η_e geresni rezultatai negu VDV veikiant D100.



3.4 pav. Variklio efektyvaus naudingumo koeficiento η_e kitimo priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , kai neaktyvus DRV (juodos kreivės) ir aktyvus DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.4. Variation of net efficiency (η_e) dependence on a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Nustatyta, kad naudojant aliejingus degalus padidėjo slėgis ir temperatūra cilindre indukcijos periodo metu (3.1 pav. a ir c) bei pasižymėjo stabilesne kinetine degimo faze negu D100. Tolygus degimo procesas fiksuotas VDV veikiant PMA100 ir PMA70/D30, kuris tęsiasi ir difuzinės degimo fazės metu (3.1 pav. b, 3.1 pav. e ir 3.1 pav. f). Aliejaus procentinė dalis degaluose lėmė iki 8 % išaugusias p_c ir T_c reikšmes lyginant su D100 difuzinės degimo fazės metu. Varikliui

veikiant PMA100 gautos didžiausios η_e reikšmės bei fiksuotas tolygus jų pasiskirstymas visame sklandaus degalų įpurškimo diapazone ir už jo ribų iki AV pasiekė viršutinį rimties tašką. Degalų įpurškimo vėlinimas lėmė staigų η_e reikšmių sumažėjimą prie kurio prisidėjo ženkliai išaugusios b_e reikšmės (3.3 pav. b). Pavėlinus φ_{ip} sutrumpėjo degiojo mišinio formavimosi laikas, dėl kurio išaugo energijos poreikis ir įpurškiamų degalų kiekis. Vėlinant degalų įpurškimą iki +4 °AV už VRT, fiksuotas iki 10 % sumažėjusios η_e reikšmės visoms degalų rūšims, o didžiausia 12,8 % nustatyta varikliui veikiant PMA100. Didelė PMA100 klampa lėmė užsitęsusių indukcijos periodą, dėl kurio ženkliai išaugo degalų sąnaudos bei sumažėjo η_e . PMA100 pasižymi aukštu Cetaniniu indeksu, todėl pavėlinus degalų įpurškimą iki +4 °AV už VRT, nustatytas 3,8 % didesnis η_e už variklio veikiančio D100.

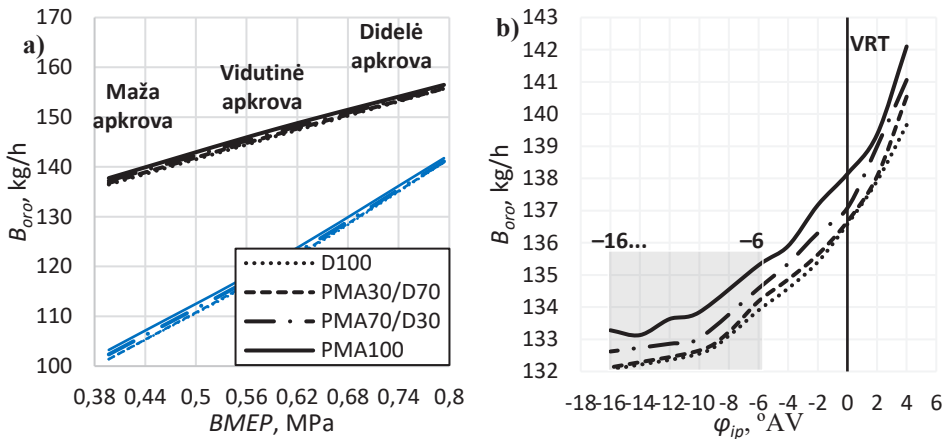
3.3. Kitos variklio parametrų charakteristikos, jam veikiant mikrodumblių aliejumi ir jo mišiniais

3.3.1. Oro masės srautas

Naudojant apkrovos stendą (2.9 pav.) atliktas slėginio uždegimo variklio 1Z stabdymas, dėl kurio VDV generavo atitinkamo dydžio kinetinę energiją pasipriešinimo jėgai kompensuoti. Didinant variklio stabdymo jėgą nuo 60 Nm iki 120 Nm išaugo alkūninio veleno sukuriama sukamojo judesio energijos poreikis lėmęs degaus mišinio sąnaudų augimą. B_d padidėjo 77,5 % (D100) ir 82,5 % (PMA100) (3.2 pav. a), o B_{oro} išaugo atitinkamai 14,1 % VDV veikiant D100 ir 13,6 % su PMA100 (3.5 pav. a). Variklį apkrovus ir didinant pasipriešinimo jėgą, tiesiškai išaugo degalų ir oro masės srauto poreikis degalų mišinio formavimui. Slėginiam uždegimo varikliui veikiant esant 0,397 MPa vidutiniam efektyviajam slėgiui B_{oro} reikšmės mažai skyrėsi 136,5–137,8 kg/h naudojant skirtingas degalų rūšis. Naudojant PMA100 B_{oro} išaugo ne daugiau kaip 1 % negu VDV veikiant kitomis degalų rūšimis (3.5 pav. a).

VDV veikiant PMA100 į degimo kamerą buvo įsiurbta 1–2 kg/h daugiau oro ir įpurkšta apie 0,5 kg/h daugiau degalų negu VDV veikiant D100, kas lėmė 2 % išaugusį slėgį cilindre (3.1 pav. a). Iš 3.1 c paveikslo matyti, kad temperatūra cilindre didėjo ~2,5 % kinetinės degimo fazės pradžioje, o didžiausi T_c taškai pasiekti 1451 K su D100 ir 1491 K naudojant PMA100 difuzinio degimo metu esant ~25 °AV. Baigiamosios degimo fazės metu, kai φ didesnis negu 35 °AV VDV veikiant PMA100 fiksuota 6 % didesnė T_c lyginant su D100, kuri lėmė visiško degimo sąlygos dėl tinkamo deguonies ir degalų santykio degalų mišinyje. Šį teiginį patvirtino daugiau sudegusios PMA100 masės dalies negu dyzelino (3.1 pav. d). Padidinus variklio apkrovą $p_e = 0,595$ MPa oro masės srautas išaugo

9,8 % (146,2 kg/h – D100 ir 147,6 kg/h – PMA100). VDV veikiant didžiausia eksperimente nustatyta apkrova fiksuotos didžiausios B_{oro} reikšmės: 156,5 kg/h VDV dirbant PMA100 ir apie 1 kg/h mažesnės su D100. Rezultatai parodė, kad didinant variklio apkrovą B_{oro} reikšmės išaugo 19 %, o skirtumas tarp D100 ir PMA100 sumažėjo nuo 1,3 kg/h, kai $p_e = 0,397$ MPa iki 0,8 kg/h varikliui veikiant didžiausia apkrova. Reikia pažymėti, kad deguonies savo sudėtyje turinčių degalų sąnaudos buvo vidutiniškai 16,4 % didesnės už D100, o B_{oro} reikšmės padidėjo kiek mažiau kaip 1 %.



3.5 pav. Valandinių oro sąnaudų B_{oro} priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , kai neaktyvus DRV (juodos kreivės) ir aktyvus DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.5. Variation of hourly air flow (B_{oro}) dependence on a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Aktyvavus deginių recirkuliacijos vožtuvą dalis išmetamųjų dujų grąžintos atgal į degimo kamerą, sumažino iš aplinkos įsiurbiamo oro masės kiekį. VDV veikiant 0,397 MPa apkrova su aktyviu DRV nustatyta, kad B_{oro} sumažėjo 25,7 % (D100) ir 25,0 % dirbant PMA100 (3.5 pav. a mėlynos kreivės). Ši oro masės srauto skirtumą kompensavo išmetamosios dujos, dėl kurių degimo kameroje liko mažiau vietos šviežiai įsiurbiamo oro porcijai. Deguonies trūkumas cilindre neišvengiamai atsilies 2,0–3,2 % sumažėjusiam variklio efektyviajam naudingumo koeficientui, dėl ko vidutiniškai 3 % išaugo degalų sąnaudos (3.2 pav. a). Įkaitusios išmetamosios dujos prisidėjo prie išaugusios temperatūros cilindre ir sumažėjusio oro tankio. Varikliui veikiant vidutine apkrova su aktyviu DRV į degimo kamerą buvo įsiurbtas 17,8 % (D100) ir 18,3 % (PMA100) mažesnis oro masės srauto

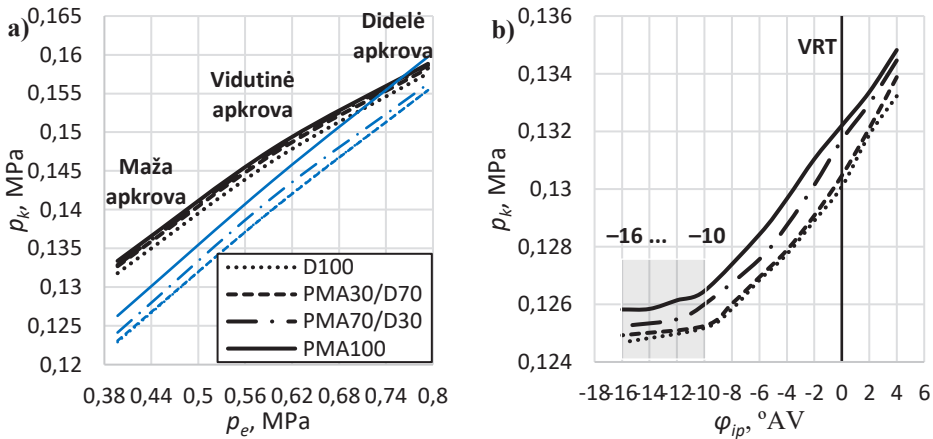
kiekis. Pakėlus variklio galią iki 0,794 MPa, fiksuotas 9,5 % B_{oro} skirtumas esant aktyviam ir neaktyviam DRV. Variklio apkrovai didėjant išaugo išmetamųjų dujų kiekis, dėl kurių turbokompresoriaus sukimosi greitis suintensyvėjo ir padidėjo slėgis. Tyrime naudoti degalų mišiniai pasižymėjo tarpiniais tiesiškai didėjančiais B_{oro} rezultatais, kurių dydis tiesiogiai priklausė nuo variklio apkrovos.

Paankstinus degalų įpurškimą B_d (3.2 pav. b) ir B_{oro} (3.5 pav. b) sumažėjo, tai galima paaiškinti efektyvesniu anksčiau pasibaigusiu degimo procesu. Tai lėmė sumažėjusį išmetamų deginių srautą ir turbokompresoriaus slėgį. Esant $-16\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT fiksuotas 3,3–3,5 % (D100–PMA100) B_{oro} sumažėjimas, kurį lėmė atitinkamai sumažėjęs įpurškiamų degalų kiekis. Remiantis tyrimo rezultatais nustatytas sklandaus degalų įpurškimo kampo diapazonas tarp $-16\text{ }^{\circ}\text{AV}$ ir $-6\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT, kuris pateko į variklio efektyvaus naudingumo darbo ribas (3.4 pav. b). Pavėlinus degalų įpurškimo kampą iki $+4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT, B_{oro} išaugo 2,9–4,0 %.

3.3.2. Turbokompresoriaus sukuriamas slėgis

Turbokompresoriuje susidaręs slėgis (3.6 pav.) priklauso nuo suslėgiamo B_{oro} (3.5 pav.), išmetamų deginių kiekio, turbinos veikimo koeficiento ir kitų mažesnę įtaką darančių elementų. Išmetamųjų dujų srautas gali būti reguliuojamas praleidimo vožtuvu, taip ribojant pripūtimo slėgį. Padidėjus variklio apkrovai degalų ir oro sąnaudos išaugo, todėl atitinkamai fiksuotas didesnis deginių srautas ir turbokompresoriuje sukuriamas slėgis. VDV veikiant skirtingais degalais mažos apkrovos režime p_k kito minimaliai, fiksuota 0,132 MPa p_k reikšmė varikliui veikiant D100 ir 0,133 MPa su PMA100 (3.6 pav. a). Padidinus variklio slėgį iki 0,595 MPa B_d padidėjo 38,0 % veikiant D100 ir 43,1 % su PMA100 (3.2 pav. a). Dėl į degalų kamerą įpurškiamo didesnio degalų kiekio negu VDV veikiant mažos apkrovos režimu ir vidutiniškai 9,8 % išaugusio B_{oro} (3.5 pav. a), p_k vidutiniškai išaugo apie 10,6 % (3.6 pav. a). VDV didinant p_e nuo 0,397 MPa iki 0,794 MPa lėmė beveik 20 % išaugusį p_k , o didžiausias turbokompresoriuje sukuriamas slėgis 0,159 MPa fiksuotas varikliui veikiant PMA100. Cilindre vykstant degimo reakcijai mažos apkrovos režimu nustatyta, kad stūmokliui pasiekus VRT slėgis cilyndre išaugo iki 6,24 MPa į degimo kamerą įpurškus dyzeliną, 6,31 MPa (PMA70/D30), 6,33 MPa (PMA30/D70) ir 6,37 MPa varikliui veikiant PMA100 (3.1 pav. a). Indukcijos periodo metu AV pasisukus 5 laipsnių kampu p_e sumažėjo iki 6,0 MPa varikliui veikiant PMA100 ir iki 5,8 MPa D100 (3.1 pav. a). Degalų mišiniui savaime užsiliepsnojus prasidėjo kinetinė degimo fazė $5\text{--}10,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$, kurios metu slėgis cilyndre padidėjo daugiausiai iki 5 %. Šios degimo fazės metu varikliui veikiant dyzelinu esant $7,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$ fiksuota 0,15 MPa p_e didėjimas ir tris kartus mažesnis p_e augimas VDV veikiant PMA100 (3.1 pav. b). VDV veikiant D100 mišinio savaiminis užsiliepsnojimas įvyko anksčiau negu PMA100 ir atitinkamai išaugo p_e reikšmės. Šiame kinetinės degimo fazės taške, kai $\varphi = 7,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$

fiksuotas momentinis temperatūros šuolis ~ 66 K varikliui veikiant D100 ir ~ 42 K su PMA100 (3.1 pav. e). VDV veikiant PMA100 didžiausias temperatūros ciline šuolis 43 K nustatytas kiek anksčiau esant 7°AV už VRT. Aukščiausia temperatūra ciline 1492 K nustatyta varikliui veikiant PMA100 difuzinės degimo fazės metu, kai $\varphi = 25,5^\circ\text{AV}$ už VRT. Į degimo kamerą įpurškus kitas degalų rūšis T_c pasiskirstė šia tvarka: PMA100 > PMA70/D30 > PMA30/D70 > D100, o didžiausias temperatūrų skirtumas siekė apie 41 K. Alkūniniame velenui pasisukus didesniu negu 30 laipsnių kampu prasidėjo baigiamoji degimo fazė, kurios metu temperatūra ciline sumažėjo, o skirtumas tarp D100 ir PMA100 T_c reikšmių išliko didesnis negu 30 K (3.1 pav. c).



3.6 pav. Turbokompresoriuje sukuriama slėgio p_k priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , kai neaktyvus DRV (juodos kreivės) ir aktyvus DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.6. Variation of turbocharger's pressure (p_k) against a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Slėginio uždegimo varikliui veikiant su aktyviu DRV trijų apkrovų režimais, fiksuotas slėgio sumažėjimas turbokompresoriuje (3.6 pav. a mėlyna spalva). Tokį p_k mažėjimą lėmė į turbokompresorių patenkantis sumažėjęs išmetamųjų dujų srautas, dėl sumažėjo B_{oro} . Karštesnės išmetamosios dujos pasižymi mažesniu tankiu ir perduoda mažesni energijos kiekį į turbokompresorių. VDV veikiant D100, kai $p_e = 0,397 \text{ MPa}$ fiksuotas 6,8 % p_k sumažėjimas, o VDV veikiant PMA100 p_k sumažėjo 5,3 %. Cilindre fiksuotas mažesnis oro kiekis ir išaugusios degalų sąnaudos lėmė prastesnę degalų mišinio degimo kokybę, temperatūros ciline ir deginių kiekio mažėjimą ir sulėtėjusį turbinos sukimosi greitį. Padidinus VDV

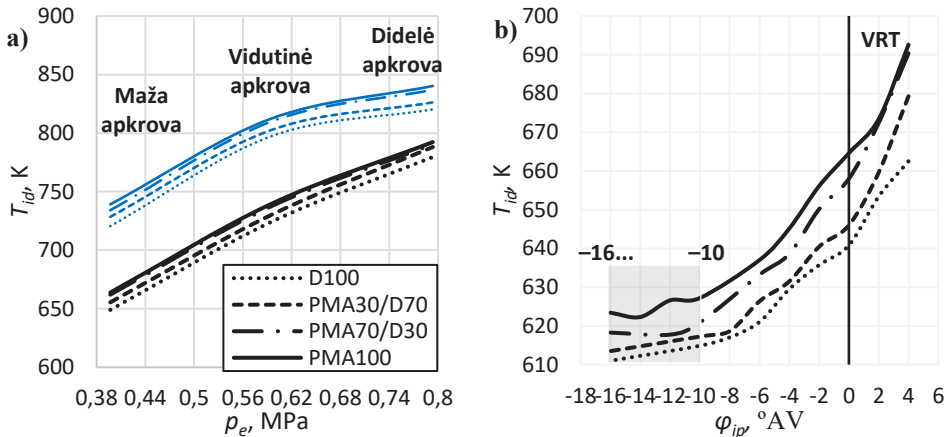
apkrovą iki vidutinės slėgis turbokompresoriuje sumažėjo 4,1 % veikiant D100 ir 2,7 % su PMA100 negu VDV veikiant neaktyviu DRV. Mažiausia DRV įtaka turbokompresoriuje sukuriama slėgiui nustatyta VDV veikiant didelės apkrovos režimu, kur 1,9 % p_k sumažėjo VDV veikiant D100 ir 0,6 % padidėjo į cilindrą įpurškus PMA100. Didinant variklio apkrovą sumažėjo deginių recirkuliacija. Variklis veikdamas biologinės kilmės PMA100 sunaudojo didesnę degalų kiekį negu D100, o dėl PMA100 sudėtyje esančio deguonies degimo procesas buvo efektyvesnis bei prisidėjo prie išaugusio išmetamųjų dujų kiekio, kurios padidino turbokompresoriaus sukimosi greitį ir sukuriama jame slėgi. Iš 3.6 paveikslo matyti, kad varikliui veikiant didelės apkrovos režimu su aktyviu ir neaktyviu DRV nepastebėtas didelis skirtumas turbokompresoriaus sukuriama slėgiui, kuriam turėjo įtakos ženkliai išaugęs oro srauto kiekis. Priešinga tendencija fiksuota varikliui veikiant mažos apkrovos režimu, kur išmetamųjų deginių kiekis pakeitė nemažą dalį deguonies.

3.6 b paveiksle pilka spalva pažymėtas plotas nuo $-16\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki $-10\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT žymintis sklandaus degalų įpurškimo kampa. Šiame intervale nustatytas nusistovėjęs ir tolygus p_k x ašies atžvilgiu (3.6 pav. b). Pastebėta, kad paankstintas φ_{ip} intervalas sutapo su B_d (3.2 pav. b) ir B_{oro} (3.5 pav. b) efektyviomis φ_{ip} reikšmėmis, kur fiksuotas η_e padidėjimas (3.4 pav. b). Varikliui veikiant PMA30/D70 nustatyta, kad p_k reikšmės beveik sutapo su VDV dirbančio dyzelinu p_k reikšmėmis visame φ_{ip} intervale nuo -16 iki $4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT. Tolygus apie 0,8 % slėgio turbokompresoriuje augimas lyginant su D100 fiksuotas VDV dirbant PMA70/D30. Į degimo kamerą įpurškiamas PMA100 lėmė apie 1,5 % didesnę p_k lyginant su D100 ir paankstintuose, ir pavėlintuose φ_{ip} taškuose. Iš 3.6 b paveiksle atvaizduotų p_k kreivių galima teigti, kad paankstinus degalų įpurškimą p_k krito dėl sumažėjusio išmetamųjų deginių srauto kiekio, kuris priklauso nuo B_d ir B_{oro} .

3.3.3. Išmetamųjų deginių temperatūra

Prasidėjus degimo procesui cilindre išsiskiria didelis kiekis šiluminės energijos, remiantis T_{id} rezultatais galima įvertinti VDV vykstantį degimo procesą ir analizuoti deginių emisijų formavimosi priežastis. Išmetamųjų dujų temperatūra matuota išmetimo kolektoriuje naudojant K tipo termoporą (2.7 pav.). Pastebėta, kad didėjant variklio apkrovai išaugo T_{id} reikšmės dėl didėjančios degalų porcijos įpurškimo (3.2 pav. a) į degimo kamerą. 3.7 a paveiksle atvaizduota beveik tiesinė T_{id} ir p_e reikšmių tarpusavyje priklausomybė leidžia įvertinti degimo procesus cilindre. p_e padidinus dvigubai iki 0,794 MPa T_{id} vidutiniškai išaugo 20 % iki 779,6 K naudojant D100, 788,1 K (PMA30/D70), 790,4 K (PMA70/D30) ir didžiausia 792,3 K nustatyta VDV veikiant PMA100 (3.7 pav. a juoda spalva). Galima teigti, kad didėjant variklio apkrovai, degimo kameroje išaugusi šiluminė energija yra efektyviau verčiama į mechaninį darbą. Taip pat santykinai mažesnė

energijos dalis tenka mechaniniams nuostoliams, ką dalinai patvirtina tiesiškai didėjantis η_e (3.4 pav. a). Į degimo kamerą įpurškus PMA100 nustatytas didesnis η_e negu su D100 ir atitinkamai išaugo T_{id} apie 2,3 % esant mažai variklio apkrovai, 2,1 %, kai $p_e = 0,595$ MPa ir apie 1,6 %, kai $p_e = 0,794$ MPa. VDV veikiant PMA100 nustatytos didesnės B_d (3.2 pav. a juoda spalva) ir B_{oro} (3.5 pav. a juoda spalva) negu su D100, todėl atitinkamai fiksuota aukštesnė T_{id} .



3.7 pav. Išmetamų deginių temperatūros T_{id} priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyviam DRV (juodos kreivės) ir aktyviam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo ϕ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.7. Variation of exhaust gas temperature (T_{id}) dependence on a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (ϕ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Remiantis AVL BOOST matematinio degimo proceso analize sudarytomis šilumos cilindre išsiskyrimo greičio kreivėmis (3.1 pav. f) matyti, kad kinetinė degimo fazė ir su D100 ir su PMA100 prasidėjo beveik identišku laiku, kai $\phi = 3,3\text{--}3,4$ °AV už VRT. Didelė PMA100 kinematinė klampa prisidėjo prie ilgesnio indukcijos periodo, kadangi susidarė neigiamas hidrodinaminis srautas turėjęs įtakos PMA100 išpurškimui per standartinius degalų purkštukus. Neigiamą PMA100 būdingą didelę kinematinės klamos įtaką kompensavo aukštas Cetaninis indeksas CI66,0 leidęs paspartinti degimo pradžią. Degimo proceso metu į degimo kamerą yra vidutiniškai įpurškiamas 15,7 % didesnis PMA100 kiekis negu D100 (3.2 pav. a juoda spalva), todėl aliejaus įpurškimas įvyko per ilgesnį alkūninio veleno pasisukimą ir išaugo degimo trukmė bei temperatūra cilindre 1492,0 K (3.1 pav. b). VDV veikiant dyzelinu, nustatyta kiek žemesnė

1456,8 K didžiausia temperatūra. Prasdėjus baigiamajai degimo fazei, kai φ buvo didesnis už 25 °AV už VRT fiksuota mažėjanti degimo temperatūra cilindre. Išmatavus išmetamųjų deginių temperatūrą esant 0,397 MPa slėgiui fiksuota $T_{id} = 649,0$ K (D100), $T_{id} = 663,8$ K (PMA30/D70), $T_{id} = 655,5$ K (PMA70/D30) ir $T_{id} = 662,0$ K (PMA100) (3.7 pav. a juoda spalva). Iš rezultatų matyti, kad T_{id} ir temperatūra cilindre gali skirtis daugiau kaip du kartus. Galima teigti, kad cilindre susidaręs aukštas iki 6,5 MPa slėgis lėmė ženkliai išaugusią T_c ir slėgio bei temperatūros sumažėjimą deginiams patekus į išmetimo kolektorius.

Į degimo kamerą sugražintos įkaitusios išmetamosios dujos lėmė išaugusią T_{id} apie 11,0 % VDV veikiant D100 ir 11,3 % su PMA100, kai $p_e = 0,397$ MPa; 10,1 % (D100) ir 9,8 % (PMA100), kai $p_e = 0,595$ MPa; 5,2 % (D100) ir 6,1 % (PMA100), kai $p_e = 0,794$ MPa (3.7 pav. a mėlyna spalva). Didėjanti variklio apkrovai nustatyta, kad T_{id} išaugo todėl padidėjo turbokompresoriaus turbinos sukimosi greitis ir proporcingai išaugo p_k (3.6 pav. a mėlyna spalva). Į degimo kamerą pateko daugiau oro (3.5 pav. a mėlyna spalva) ir sumažėjo DRV įtaka T_{id} reikšmių augimui didinant variklio apkrovą (3.7 pav. a). VDV veikiant mažos apkrovos režime su aktyviu DRV fiksuotos T_{id} reikšmės: 720,6 K (D100), 739,2 K (PMA30/D70), 728,5 K (PMA70/D30), 734,1 K (PMA100) (3.7 pav. a mėlynos kreivės). Didinant VDV apkrovą T_{id} išaugo, o ekstremumo reikšmės pasiektos esant 0,794 MPa slėgiui: 820,3 K (D100), 826,3 K (PMA30/D70), 837,0 K (PMA70/D30), 840,3 K (PMA100) (3.7 pav. a mėlynos kreivės). Paankstinus φ_{ip} pastebėta T_{id} mažėjimo tendencija (3.7 pav. b), analogiškai kaip ir B_d (3.2 pav. b), B_{oro} (3.5 pav. b), ir p_k (3.6 pav. b) atvejais. Tai galima sieti su efektyviai panaudota šilumine energija, kurią patvirtina išaugęs variklio efektyvusis naudingumo koeficientas (3.4 pav. b).

Paankstinus degalų įpurškimą į degimo kamerą fiksuota anksčiau įvykusi degimo pradžia, kuri buvo trumpesnė, o T_{id} atitinkamai sumažėjo 38 K VDV veikiant dyzelinu ir 40 K VDV veikiant PMA100 (3.7 pav. b). φ_{ip} intervale tarp -16 °AV ir -10 °AV iki VRT nustatytas nusistovėjęs žemų T_{id} reikšmių diapazonas, patenkantis į sklandų η_e reikšmių intervalą (3.4 pav. b). Mažiausios išmetamųjų dujų reikšmės fiksuotos 611–623 K ribose, φ_{ip} paankstinus -16 °AV iki VRT. Degalų įpurškimo ankstinimas 3.7 b paveiksle pažymėtame efektyviajame diapazone nuo -16 °AV iki -10 °AV iki VRT, leido sumažinti temperatūrą 4,7–6,3 %. Pavėlinus degalų įpurškimą nuo +1 iki +4 °AV už VRT, nustatytas staigus T_{id} reikšmių augimas, o esant +4 °AV už VRT fiksuotos T_{id} didžiausios reikšmės 663–693 K (PMA100>D100). Dėl išaugusių degalų (3.2 pav. b) ir oro (3.5 pav. b) sąnaudų pavėlinus degalų įpurškimą degimo trukmė prailgėjo ir atitinkamai padidėjo T_{id} . Matyti, kad vėlinant φ_{ip} šiluminės energijos kiekis ženkliai išaugo, tačiau nebuvo efektyviai panaudotas dėl vėlyvos degimo pradžios ir užsitęsusio degimo proceso. Šią hipotezę galima patvirtinti lyginant ankstyvąjį φ_{ip} esant -16 °AV iki VRT ir vėlyvąjį φ_{ip} esant +4 °AV už VRT, kur

fiksuotas ženklus T_{id} reikšmių pokytis: 52 K VDV veikiant D100 ir 70 K su PMA100 (3.7 pav. b).

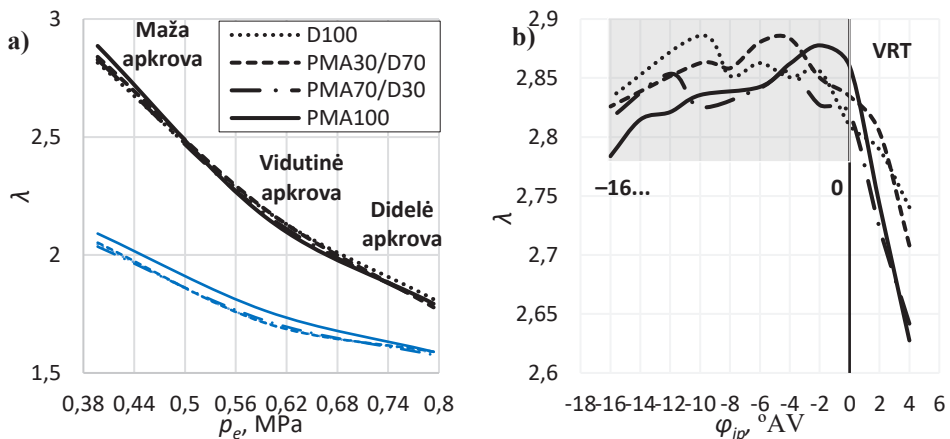
3.3.4. Oro pertekliaus koeficientas

Slėginio uždegimo variklyje visiškai degalų mišinio sudegimui svarbu užtikrinti aukštą oro pertekliaus koeficientą ir intensyvų degalų maišymąsi su oru. λ apskaičiuotas įvertinus degimo proceso metu reaguojančių oro ir degalų masių santykius bei nustatant oro masės kiekį reikalingą visiškai 1 kg degalų sudegimui D100 yra lygus 14,52 kg; PMA30/D70 – 13,95 kg; PMA70/D30 – 13,20 kg ir PMA100 – 12,64 kg. PMA100 visiškai sudegimui yra reikalingas mažesnis deguonies kiekis negu D100, dėl PMA100 cheminėje sudėtyje esančio 10,48 % deguonies. Visiškai degalų sudegimas cilindre yra pageidaujamas ir svarbus kriterijus siekiant padidinti variklio našumą ir pasiekti aukštus eksploatacinius parametrus ir sumažinti emisijas.

Didžiausios λ reikšmės 2,82–2,89 nustatytos VDV veikiant mažos apkrovos režimu, kuomet D100 < PMA100 (3.8 pav. a juoda spalva). Varikliui veikiant PMA100 gautas 2,5 % didesnis λ už D100 dėl išaugusio B_{oro} (3.3 pav. a juoda spalva). VDV veikiant, kai $p_e = 0,595$ MPa λ rezultatų kreivės susikeitė (3.8 a pav.), o didžiausias skirtumas lyginant D100 ir PMA100 λ reikšmes siekė apie 1,4 %. λ reikšmės išsidėstė šia tvarka: 2,19 VDV veikiant D100; 2,19 su PMA30/D70; 2,17 – PMA70/D30 ir 2,16 VDV veikiant PMA100. VDV veikiant didele apkrova į cilindrą buvo paduodamas 13,8 % didesnis oro masės srautas (3.5 pav. a) negu esant žemai variklio apkrovai. Rezultatai parodė, kad, kai $p_e = 0,794$ MPa λ vidutiniškai sumažėjo 59 % lyginant su VDV darbu, kai $p_e = 0,397$ MPa. Remiantis 3.8 a paveikslu atvaizduotomis λ kreivėmis galima teigti, kad eksperimento metu VDV dirbo liesu mišiniu, o didinant variklio apkrovą oro kiekis degalų mišinyje mažėjo. Slėginio uždegimo variklis yra sukurtas dirbti palaikant oro perteklių cilindre, nes tokiu būdu yra užkertamas kelias riebaus mišinio zonų formavimuisi ir suodžių susidarymui. λ parodo santykinį oro ir degalų pasiskirstymą degimo kameroje, tačiau lokalios λ zonos nėra fiksuojamos. Degimas lokaliuose oro pertekliaus zonose vyksta labai chaotiškai, kur fiksuoti labai dideli λ reikšmių svyravimai (Mollenhauer *et al.* 2010).

Dalis į degimo kamerą sugražinamų degimo reakcijos produktų lemia išaugusį inertinių dujų kiekį (ore nereaguojančios dujos, kurios sudaro maždaug 1/120 oro tūrio), dėl kurio sumažėja degimo greitis (Bosch *GmbH* 2009). Tai nulemia mažesnę aktyvių oksidatorių formavimąsi degimo kameros viduje, nuo kurių priklauso egzoterminės reakcijos greitis, mažėja oro pertekliaus koeficiento reikšmė. Varikliui veikiant su aktyviu DRV mažos apkrovos režime nustatytas 28 % mažesnis oro pertekliaus koeficientas negu su neaktyviu DRV visomis degalų rūšimis. Padidinus variklio apkrovą iki vidutinės fiksuota 22,0 % mažesnė

λ reikšmė veikiant dyzelinu ir 18,5 % VDV dirbant PMA100. VDV apkrovus 0,794 MPa ir aktyvavus DRV nustatytas λ reikšmių sumažėjimas: 12,2 % su D100 ir 11,2 % į degimo kamerą įpurškiant PMA100 (3.8 pav. a mėlyna spalva). Pastebėta, kad λ pokyčio tendencija labai panaši į B_{oro} (3.5 pav. a mėlyna spalva) ir B_d (3.2 pav. a mėlyna spalva). Iš 3.8 a paveikslu matyti, kad aktyvuotas DRV stipriau paveikė λ reikšmes VDV veikiant D100 negu biologinės prigimties PMA100. Didinant variklio apkrovą DRV darė mažesnę įtaką variklio darbui ir λ reikšmėms, nes į cilindrą buvo nukreiptas santykinai didesnis oro negu išmetamųjų deginių kiekis. VDV dirbdamas PMA100 veikė liesesniu degalų mišiniu negu VDV veikdamas D100 esant mažai apkrovai. Aktyvavus DRV į degimo kamerą pateko mažesnis oro kiekis (3.5 pav. a) negu neaktyvavus DRV, o šį oro trūkumą kompensavo PMA100 savo sudėtyje turimu deguonies kiekiu (3.8 pav. a mėlyna spalva). Todėl akivaizdu, kad varikliui veikiant PMA100 oro pertekliaus koeficiento reikšmės buvo didesnės už D100 visame apkrovų intervale.



3.8 pav. Oro pertekliaus koeficiento λ kitimo priklausomybė nuo:

a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyviam DRV (juodos kreivės) ir aktyviam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo ϕ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.8. Variation of air excess ratio (λ) dependence on a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (ϕ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

VDV veikiant mažos apkrovos režimu didžiausios λ reikšmės nustatytos ϕ_{ip} paankstinus iki -16 °AV iki VRT (3.8 pav. b). Nustatytame intervale fiksuotos liesesnio degalų mišinio reikšmės, kai λ kito nuo 2,78 iki 2,89. VDV veikiant mineraliniu dyzelinu didžiausia $\lambda = 2,89$ nustatyta ϕ_{ip} paankstinus iki -10 °AV iki VRT. VDV veikiant PMA100 didžiausia λ reikšmė lygi 2,88 fiksuota -2 °AV iki

VRT. 3.8 b paveiksle pažymėtame sklandaus degalų įpurškimo intervale susiformavo liesesnis degalų mišinys negu vėlinant degalų įpurškimą. Šiems rezultatams įtakos turėjo sumažėjusios degalų sąnaudos (3.2 pav. b) dėl paankstinto degalų įpurškimo. Kai φ_{ip} įvyko už VRT fiksuotas staigus apie 8 % (esant 4 °AV) λ mažėjimas (3.8 pav. b) ir B_d didėjimas (3.2 pav. b). Galima daryti prielaidą, kad ženkliai išaugusios aliejingų degalų sąnaudos lėmė intensyvesnį λ mažėjimą lyginant su D100.

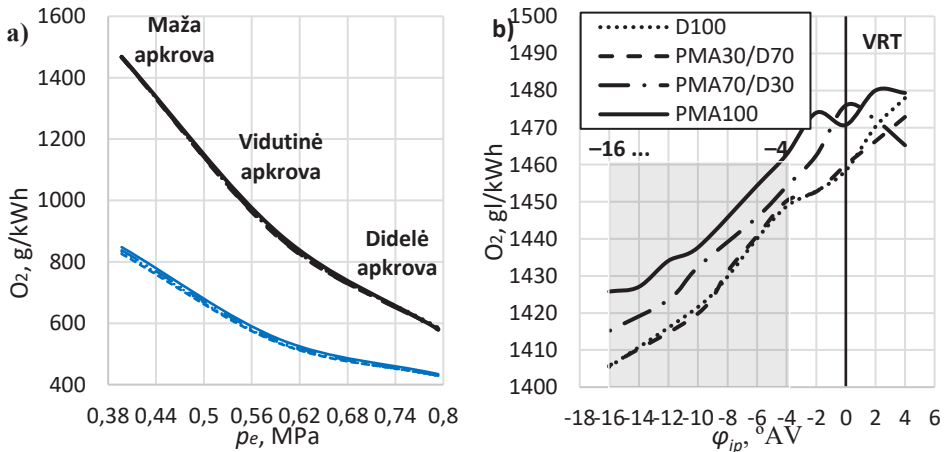
3.3.5. Deguonies kiekis išmetamosiose dujose

Mineralinio dyzelino degimo reakcija yra $4 C_{12}H_{23} + 71 O_2 \rightarrow 48 CO_2 + 46 H_2O$, tačiau dėl sudėtingo degimo proceso variklio cilindre, kartu su išmetamosiomis dujomis gali būti pašalinti nevisiško degimo produktai. Vienas tokių O_2 , kuris parodo nepanaudotą deguonies kiekį (Mollenhauer *et al.* 2010). VDV veikiant mažos apkrovos režimu fiksuotas didesnis deguonies kiekis išmetamosiose dujose (3.9 pav. a juoda spalva) negu esant vidutinei ar didelei variklio apkrovoms. Didžiausias O_2 kiekis išmetamosiose dujose 800,9–874,1 g/kWh yra siejamas su išaugusiu λ (3.8 pav. a juoda spalva) esant 0,397 MPa. Padidinus p_e iki 0,794 MPa λ sumažėjo 35,8 % D100 atveju ir 38,1 % PMA100 atveju. Degalų mišinyje sumažėjo O_2 ir susidarė palankios sąlygos riebaus degalų mišinio zonų formavimuisi, todėl sumažėjo nesureagavusios deguonies išmetamosiose dujose kiekis 30,8–31,5 % (3.9 pav. a juoda spalva). Degimo proceso metu didesnis O_2 kiekis sureagavo su anglies atomais ir išaugo anglies dvideginio koncentracija išmetamosiose dujose (3.14 pav. a juoda spalva). Galima teigti, kad O_2 koncentracija išmetamosiose dujose yra priešingai proporcinga CO_2 kiekiui, kurį patvirtino tyrimo metu gauti rezultatai, pateikti 3.14 a paveikslėlyje.

Ankstyvos degalų įpurškimo pradžios metu –14 °AV iki VRT pastebėta, kad O_2 išmetamosiose dujose mažai pakito, o rezultatų kreivės tapo beveik tiesinės ašies atžvilgiu (3.9 pav. b). Skirtingų degalų rūšių naudojimas turėjo maži įtakos O_2 koncentracijai išmetamosiose dujose. Tačiau VDV dirbant aliejingais degalais fiksuotas iki 1,5 % mažesnis O_2 kiekis deginiuose negu VDV veikiant D100. Vėlyvas φ_{ip} lėmė staigų O_2 sumažėjimą, kurį sąlygojo didesnės degalų sąnaudos ir išaugusi anglies dvideginio koncentracija (3.14 pav. b).

DRV aktyvavimas patvirtino vėlyvojo degalų įpurškimo tendenciją (3.9 pav. b), kadangi buvo užfiksuota dar mažesnė deguonies koncentracija išmetamosiose dujose (3.9 pav. a mėlyna spalva) negu prieš tai tirtu atveju. VDV veikiant mažos apkrovos režimu nustatytas 874,9–949,2 g/kWh O_2 kiekis deginiuose (PMA100 > D100), sumažėjęs iki 5,4 % (D100) ir 7,5 % (PMA100) esant vidutinei variklio apkrovai ir iki 10,9–12,7 % esant didelei variklio apkrovai negu VDV veikiant maža apkrova. Visų VDV apkrovų diapazone aliejingi degalai lėmė mažesnę deguonies koncentraciją išmetamosiose dujose negu VDV veikiant D100.

Deginių gražinimas į degimo kamerą sumažino deguonies kiekį ir atitinkamai NO_x emisijų kiekį (3.12 pav. a mėlyna spalva), tačiau išaugo CO_2 (3.14 pav. a mėlyna spalva), CH (3.13 pav. a mėlyna spalva) ir dūmingumas (3.11 pav. a mėlyna spalva), kurių didėjimui didelės įtakos turėjo deguonies trūkumas. VDV veikiant PMA100 ir aktyvuotu DRV išmetamuosiuose dūmuose fiksuotas 6,0–8,5 % didesnis O_2 kiekis negu VDV veikiant D100.



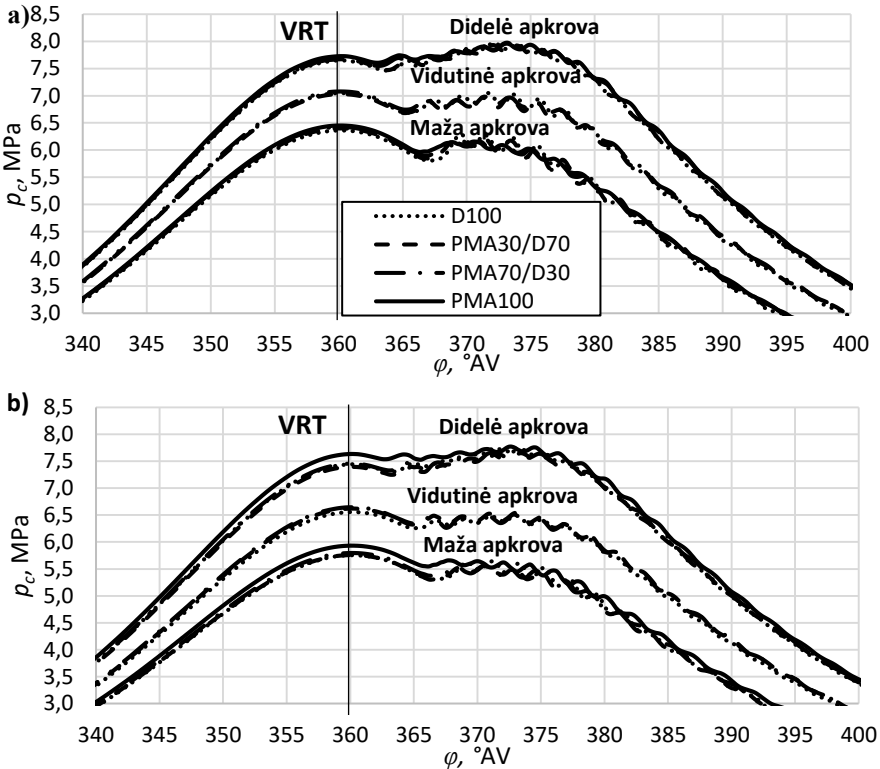
3.9 pav. Deguonies O_2 koncentracijos išmetamosiose dujose priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyvuotam DRV (juodos kreivės) ir aktyvuotam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.9. Variation of oxygen (O_2) concentration in the exhaust gases dependence on a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

3.3.6. Slėgio cilindre pokytis

Išmatavus slėgį cilindre galima geriau suprasti mikrodumblių aliejaus įtaka slėginio uždegimo variklio 1Z darbui. Mineralinis dyzelinas ir PMA100 yra skirtingos prigimties, kurių fizikinės ir cheminės savybės turėjo įtakos variklio darbui. Iš 3.10 a paveikslu matyti, kad p_c pasiskirstymas kito priklausomai nuo degalų rūšies – suslėgimo, degalų įpurškimo ir degimo fazių metu. Varikliui veikiant neaktyviu DRV degalai buvo įpurškiami alkūniniam velenui pasiekus 358 laipsnių kampą t. y. 2°AV iki VRT. Šiame taške suslėgimo takto pabaigoje p_c pasiekė didžiausią reikšmę (3.10 pav. a). VDV veikiant žema apkrova fiksuotos didžiausios p_c reikšmės 6,36 MPa (D100), 6,40 MPa (PMA30/D70), 6,42 MPa (PMA70/D30) ir 6,45 MPa (PMA100). Padidinus VDV apkrovą iki vidutinės p_c

išaugo 10,8 % (D100), 9,5 % (PMA30/D70), 10,3 % (PMA70/D30) ir 10,5 % (PMA100). VDV veikiant 0,794 MPa didžiausios p_c reikšmės pasiektos varikliui veikiant PMA100 $p_c = 7,73$ MPa. Suslėgimo takto metu VDV veikiant visomis trimis apkrovomis didesnis p_c nustatytas jam dirbant PMA100 negu D100: 1,42 % (kai $p_e = 0,397$ MPa), 1,13 % (kai $p_e = 0,595$ MPa) ir 1,05 % (kai $p_e = 0,794$ MPa) atitinkamai.



3.10 pav. Slėgio cilindre p_c priklausomybė nuo alkūninio veleno posūkio kampo, kai degalai įpurškiami ties VRT: a) varikliui veikiant su neaktyvuotu DRV, b) varikliui veikiant su aktyvuotu DRV, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.10. Variation of pressure p_c in cylinder against crankshaft angle, when the fuel injected at the TDC: a) when engine was running with deactivated EGR, b) when engine was running with activated EGR, $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Iš rezultatų matyti, kad didėjant variklio apkrovai biologinės kilmės PMA100 turėjo vis mažesnę įtaką p_c dydžiui. Tai galima paaiškinti 19 % išaugusiu oro masės srautu (3.5 pav. a juoda spalva) pereinant nuo mažos iki vidutinės variklio

apkrovos ir ženkliai išaugusiomis 81,6 % PMA100 degalų sąnaudomis. Pasibaigus suslėgimo taktui ir į degimo kamerą įpurškus degalus p_c sumažėjo ir prasidėjo indukcijos periodas, kuris truko apie 5–6 °AV. Žinoma, reikėtų atkreipti dėmesį į variklio apkrovą, kadangi didėjant apkrovai matyti, kad trumpėja indukcijos periodas. Vėliau seka degalų savaiminis užsiliepsnojimas ir prasideda kinetinė degimo fazė (3.10 pav. a). Kinetinės degimo fazės metu susidarė slėgių šuoliai 0,05–0,25 MPa ribose (3.10 pav. a). VDV veikiant D100 fiksuoti intensyvesni p_c svyravimai ypač mažos apkrovos režime. Kinetinę degimo fazę keitė difuzinė degimo fazė. Šios fazės darbo metu slėgis kito tolygiai ir truko apie 12–15 °AV, priklausomai nuo variklio apkrovos. VDV veikiant vidutine apkrova susidaręs p_c difuzinės fazės degimo metu beveik prilygo suslėgimo takto slėgiui, o esant didelei variklio apkrovai p_c didžiausia degimo metu susidariusi reikšmė siekė 8,0 MPa ir viršijo suslėgimo metu pasiektą p_c (3.10 pav. a). Pasibaigus difuziniam degimui prasidėjo baigiamoji degimo fazė, kurios metu slėgis cilindre intensyviai mažėjo (3.10 pav. a) ir atitinkamai sumažėjo T_c (3.1 pav. a). Procesas tapo atvirkštinis suslėgimo taktui, kur fiksuotas labai panašus slėgio cilindre pokytis, tik suslėgimo takto metu p_c didėjo, o baigiamosios degimo fazės metu p_c tendencingai mažėjo.

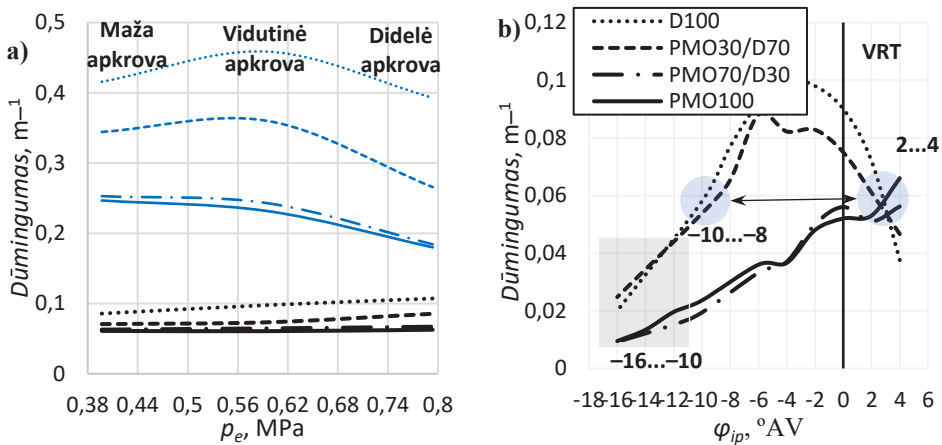
Aktyvavus DRV fiksuotas bendras p_c sumažėjimas VDV veikiant visais trimis apkrovų režimais (3.10 pav. b). Suslėgimo takto metu, esant mažai variklio apkrovai fiksuotas 8,1–10,1 % p_c mažėjimas lyginant su 3.10 a paveiksle pateiktais rezultatais. Iš 3.10 b paveikslo matyti, kad VDV veikiant PMA100 p_c reikšmės yra didesnės negu D100 ir pakankamai mažai skiriasi nuo p_c reikšmių varikliui veikiant su neaktyviu DRV. Mažiausias p_c pokytis VDV dirbant didelės apkrovos režimu naudojant PMA100, kur p_c suslėgimo takto metu buvo praktiškai vienodas, o difuzinės degimo fazės metu buvo mažesnis negu 0,25 MPa (3.10 pav. b). Varikliui veikiant PMA100 su aktyviu DRV fiksuotas 0,2–0,3 MPa didesnis p_c negu D100 suslėgimo takto metu, kinetinės degimo fazės metu ir difuzinės fazės degimo pradžioje. Vėliau p_c skirtumas lyginant PMA100 ir D100 p_c reikšmes ženkliai sumažėjo ir praktiškai nesiskyrė nuo 3.10 a grafike pateiktos tendencijos. VDV veikiant didelės apkrovos režimu dėl santykinai išaugusio B_{oro} , išmetamųjų dujų nukreipimas į degimo kamerą tapo mažiau reikšmingas ir mažai turėjo įtakos p_c reikšmėms (3.10 pav. b).

3.4. Ekologinių VDV rodiklių tyrimas varikliui veikiant mikrodumblių aliejumi ir jo mišiniais su dyzelinu

3.4.1. Dūmingumas

Išmetimo takto metu iš cilindro pašalinami deginiai, dažnai juodų dūmų pavidalu (suodžiais). Nepilnai sudegę degalai (juodi dūmai), susidaro dėl riebaus mišinio

zonų degimo kameroje. Tai viena didžiausių problemų susidaranti dyzelinio variklio degimo kameroje kaip nevisiško degimo produktai, kurie neigiamai veikia žmonių sveikatą bei aplinką. Eksperimento metu pastebėta, kad suodžių koncentracija didėja tolygiai su variklio apkrova (3.11 pav. a juoda spalva). Į D100 įmaišytas mikrodumblių aliejus, lėmė mažesnę dūmingumą, o didėjanti variklio apkrova neturėjo didelės įtakos dūmingumui ypač VDV veikiant PMA100. Varikliui dirbant D100, kai $p_e = 0,397$ MPa, gauta $0,09$ m⁻¹ dūmingumo koncentracija, padidinus p_e iki $0,595$ MPa dūmingumas išaugo iki $0,10$ m⁻¹, o didžiausia koncentracija $0,11$ m⁻¹ pasiekta esant $0,794$ MPa slėgiui. VDV veikiant didelės apkrovos režimu ženkliai sumažėjo λ (3.8 pav. a juoda spalva), todėl degimo kameroje susiformavo daugiau lokalių riebaus mišinio zonų, kuriose susidarė nevisiško degimo produktai.



3.11 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyviam DRV (juodos kreivės) ir aktyviam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo ϕ_{ip} , $n = 2000$ min⁻¹

Fig. 3.11. Variation of smoke absorption coefficient against a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (ϕ_{ip}), $n = 2000$ min⁻¹

Dūmingumo formavimuisi didelę įtaką turėjo ϕ_{ip} . Mažiausia suodžių koncentracija fiksuota varikliui veikiant paankstinus degalų įpurškimą nuo -16 °AV iki -10 °AV iki VRT. Šiose ϕ_{ip} ribose dūmingumas siekė $0,01$ – $0,06$ m⁻¹ koncentraciją, priklausomai nuo degalų rūšies (3.11 pav. b). Sumažėjęs dūmingumas pažymėtame sklandaus degalų įpurškimo intervale gali būti siejamas su išaugusiu λ (3.8 pav. b), mažesnėmis b_e (3.3 pav. b) ir išaugusiu η_e (3.4 pav. b). Šiame sklan-

daus φ_{ip} intervale VDV veikė į aplinką išmesdamas mažesnę dūmingumo koncentraciją negu φ_{ip} ties VRT. VDV veikiant D100, kai į degimo kamerą degalai įpurškiami nuo $-12\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT ir iki $+4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT visame šiame intervale, nustatytos atvirkštinės parabolės pavidalu išsidėstę dūmingumo reikšmės, o didžiausia dūmingumo reikšmė užfiksuota φ_{ip} esant $-4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT. Suodžių koncentracija šiame taške išaugo apie 11 %, o į degimo kamerą įpurškus PMA100 fiksuotas 20 % mažėjimas. VDV dirbant PMA30/D70 nustatyta panaši dūmingumo reikšmių pasiskirstymo tendencija kaip ir D100 atveju, bet fiksuotas 11,1–20,0 % sumažėjimas visame φ_{ip} diapazone lyginant su D100. VDV veikiant PMA70/D30 ir PMA100 gautas beveik tiesinis suodžių koncentracijos mažėjimas visame φ_{ip} diapazone, o lyginant su D100 vidutiniškai sumažėjo apie 60 %. 3.11 b paveiksle pažymėti du φ_{ip} intervalai nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki $-8\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT ir nuo $2\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki $4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT, kurie atvaizdavo staigų dūmingumo mažėjimą D100 ir PMA30/D70 atvejais. Varikliui veikiant PMA70/D30 ir PMA100 šie φ_{ip} intervalai neturėjo jokios įtakos. Pavėlinus degalų įpurškimą, kai φ_{ip} yra už VRT nustatyta, kad VDV veikiant D100 dūmingumas pradėjo mažėti, o naudojant PMA100 gauta priešinga tendencija. Pavėlintas φ_{ip} lėmė į degimo kamerą įpurškiamą B_d didėjimą (3.2 pav. b) ir sumažėjusį λ (3.8 pav. b) ypatingai PMA100 atveju, kuris lėmė riebaus mišinio zonų formavimąsi ir padidėjusį suodžių kiekį deginiuose.

Remiantis AVL BOOST skaitiniu degimo proceso analizės modeliu matyti, kad kinetinės degimo fazės metu, kai $\varphi = 3,5\text{--}10,5\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT, difuzinės degimo fazės metu, kai $\varphi = 10,5\text{--}25,0\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT ir baigiamojo degimo fazės metu, kai $\varphi = 25,0\text{--}65,0\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT VDV veikiant PMA100 buvo nustatytas didesnis slėgis (3.1 pav. a), temperatūra (3.1 pav. c) ir sudegusi degalų masės dalis (3.1 pav. d) cilindre negu D100. Tokia skaitinio modelio sudarymo analizė leidžia teigti, kad VDV darbas su PMA100 ženkliai prisidėjo prie dūmingumo mažinimo.

Išmetamųjų dujų grąžinimas į degimo kamerą turėjo neigiamos įtakos dūmingumui. VDV veikiant D100 dūmingumas išaugo iki 4,8 karto, o varikliui veikiant PMA100 iki 4 kartų (3.11 pav. a mėlyna spalva). Aktyvavus DRV didžiausi skirtumai fiksuoti esant mažai variklio apkrovai, dėl sumažėjusio λ (3.8 pav. a mėlyna spalva), nes dalis aplinkos oro buvo pakeista išmetamosiomis dujomis ir ženkliai sumažėjo deguonies. VDV veikiant didelės apkrovos režimu, dėl išaugusio p_k (3.6 pav. a mėlyna spalva) padidėjo šviežio oro koncentracija (3.5 pav. a mėlyna spalva) ir lėmė visiško degimo sąlygų susidarymą, todėl nustatytas mažesnis dūmingumas. VDV veikiant D100, kai $p_e = 0,397\text{ MPa}$ gauta $0,42\text{ m}^{-1}$ suodžių koncentracija, o padidinus variklio apkrovą iki $0,595\text{ MPa}$, dūmingumas išaugo iki $0,46\text{ m}^{-1}$ reikšmės, bet prie didelės variklio apkrovos dūmingumas minimaliai sumažėjo iki $0,39\text{ m}^{-1}$. Į degimo kamerą įpurškus PMA30/D70 nustatyta, kad dūmingumas sumažėjo 19–31 % lyginant su D100; PMA70/D30 atveju 40–54 %; ir PMA100 atveju 40–54 %. Iš rezultatų matyti, kad VDV veikiant PMA70/D30 ir

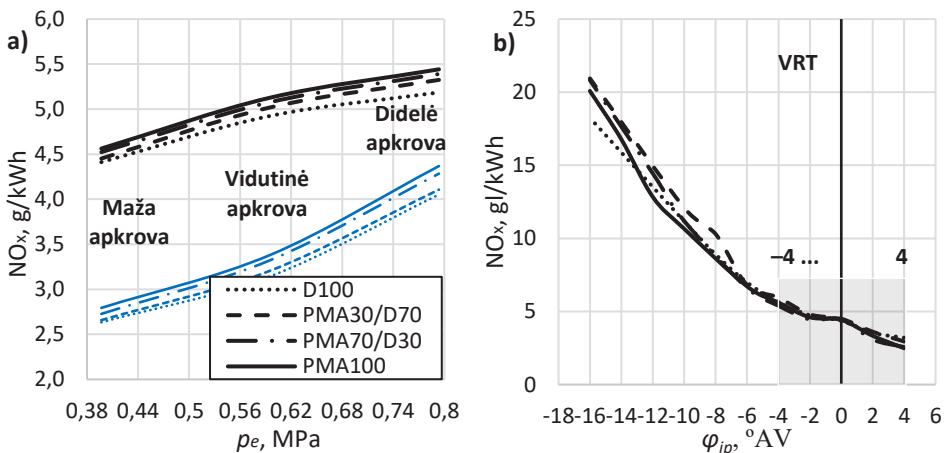
PMA100 gautos praktiškai identiškoms reikmėms. Mažiausia suodžių koncentracija fiksuota VDV veikiant didelės apkrovos režimu, priešinga tendencija lyginant su VDV darbu neaktyvavus DRV. Aliejinguose degaluose esanti O_2 lėmė mažesnes riebaus mišinio zonas (3.8 pav. a mėlyna spalva) ir atitinkamai sumažėjo suodžių koncentracija deginiuose.

3.4.2. Azoto oksidų emisija

Aukšta degimo temperatūra dyzeliniuose varikliuose prisideda prie azoto oksidų formavimosi (Wang *et al.* 2012), kurie aprašomi trimis cheminėmis lygtimis, vadinamomis Zeldovičiaus mechanizmu: (i) $N_2 + O \leftrightarrow NO + N$, (ii) $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$, ir (iii) $N + OH \leftrightarrow NO + H$ (Mollenhauer *et al.* 2010). 3.12 a paveiksle matyti, kad padidinus variklio apkrovą nuo mažos iki vidutinės NO_x emisijos išaugo 4,41–4,92 g/kWh VDV veikiant D100 ir 4,56–5,13 g/kWh su PMA100, tai sudarė 11,6–12,5 % NO_x emisijų padidėjimą. NO_x emisijos papildomai išaugo 5,5–6,0 % padidinus VDV apkrovą nuo 0,595 MPa iki 0,794 MPa. Eksperimento metu bandytos degalų rūšys turėjo mažai įtakos NO_x emisijų pokyčiui. VDV veikiant didesnės apkrovos režimu išaugo deginių temperatūra (3.7 pav. a juoda spalva) ir atitinkamai susiformavo didesnis azoto oksidų kiekis.

Varikliui veikiant PMA100 NO_x emisijų kiekis išaugo 0,9–3,4 % lyginant su D100. Remiantis kitų autorių tyrimais (Wang *et al.* 2009), nustatyta, kad degalai savo sudėtyje turintys deguonies, degimo proceso metu lokalias degimo kameroje esančias zonas užpildo papildomu O_2 kiekiu ir prisideda prie išaugusių NO_x emisijų. Ši tendencija sutampa su autoriaus Wang *et al.* (2009) pateiktomis išvadomis, kur teigiama, kad dūmingumui mažėjant (3.11 pav. a) NO_x emisijų kiekis didėja, dėl susiformavusios didesnės O_2 koncentracijos degimo kameroje. Ankstesniuose autorių leidiniuose buvo detaliai ištirta PMA100 cheminė sudėtis (Raslavičius *et al.* 2018), kur matyti, jog PMA100 sudaro 90,8 % oleino rūgštys (nesočiosios riebalų rūgštys). Šis vyraujantis nesočiųjų riebalų rūgščių kiekis lemia išaugusias NO_x emisijas VDV, kurias patvirtino autorių Rodriguez *et al.* (2017) ir Pinzi *et al.* (2013) atlikti eksperimentiniai tyrimai. Vienas pagrindinių azoto oksidų susidarymo veiksnių, tai aukšta temperatūra degimo kameroje. AVL BOOST programa atlikta skaitinė analizė, varikliui veikiant PMA100 visose degimo fazėse (kinetinė, difuzinė ir baigiamoji) buvo gautos aukštesnės degimo temperatūros cilindre reikšmės (3.1 pav. c) negu VDV veikiant D100. Ši tendencija ypač gerai atsiskleidžia iš difuzinės degimo fazės pereinant į baigiamąją degimo fazę, kurios metu buvo pasiektas temperatūros ekstremumas cilindre apie 1500 K ir apie 60 K mažesnis VDV veikiant D100. Atlikti eksperimentiniai bandymai sutampa su atliktais autorių Jazair *et al.* (2011), Ndayishimiye *et al.* (2011), Bari *et al.* (2002), Nwafor *et al.* (2003), Roy *et al.* (2013), Agarwal *et al.* (2013), kurie tyrė augalinį aliejų.

Degalų įpurškimo kampo keitimas turėjo didelę įtaką azoto oksidų emisijoms (3.12 pav. b). Paankstinus φ_{ip} pastebėtas NO_x emisijų staigus augimas, o didžiausia reikšmė 20,1 g/kWh pasiekta esant -16°AV iki VRT, kuri padidėjo beveik 3 kartus lyginant su įprastu φ_{ip} kampu. Kitų autorių Wang *et al.* 2012 atlikti tyrimai patvirtino, kad azoto oksidų emisijų kiekis didėja ankstinant degalų įpurškimo kampą. Į degimo kamerą pradėjus anksčiau purkšti degalus lėmė ankstesnę degimo pradžią ir užsitęsusi degimą, kuris turėjo įtakos azoto oksidų emisijų augimui (Pinzi *et al.* 2013). Paankstinant degalų įpurškimas prisidėjo esant išaugusiam λ (3.8 pav. b), kuris buvo vienas pagrindinių veiksnių azoto junginių su deguonimi formavimuisi. 3.12 b paveiksle pažymėtas φ_{ip} intervalas nuo -2°AV iki VRT iki $+4^\circ\text{AV}$ už VRT yra priimtas kaip sklandaus φ_{ip} intervalas ir priimtinas NO_x emisijų mažinimo įrankis. Į cilindrą įpurškus degalus esant $+4^\circ\text{AV}$ už VRT gauta priešinga azoto oksidų emisijų tendencija negu esant ties VRT, aliejingi degalai lėmė mažesnes NO_x emisijas ir sudarė 2,49 g/kWh, o VDV veikiant D100 gauta 3,21 g/kWh NO_x emisijų reikšmė.



3.12 pav. Azoto oksidų NO_x priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyvuotam DRV (juodos kreivės) ir aktyvuotam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.12. Variation of smoke absorption coefficient against a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

VDV veikiant su aktyviu DRV prisidėjo prie sumažėjusio λ (3.8 pav. a mėlyna spalva), kuris turėjo didelę įtaką azoto oksidų emisijų formavimuisi, todėl fiksuotas NO_x mažėjimas T_{id} (3.12 pav. a mėlyna spalva). Į degimo kamerą grąžinami deginiai sumažino lokalių oro pertekliaus zonų kiekį, todėl sumažėjo aukštų

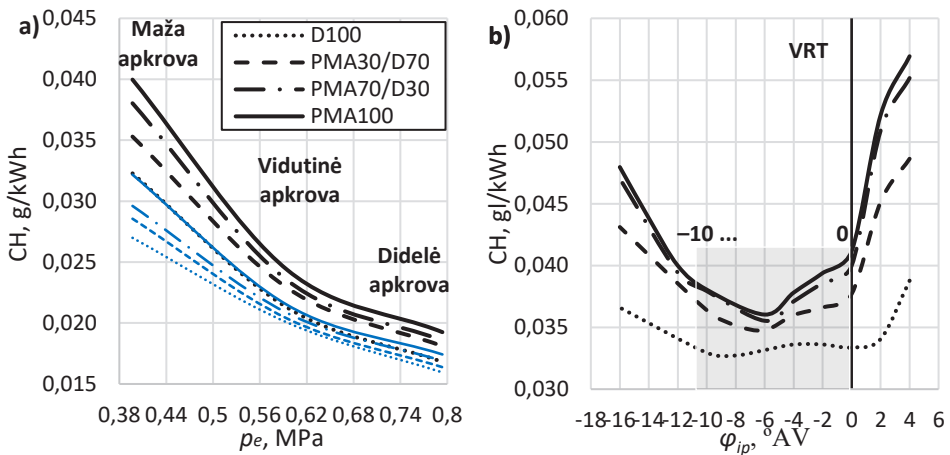
temperatūrų formavimosi zonos lėmusios mažėjantį NO_x susidarymą. VDV veikiant maža apkrova gautos 2,63–4,05 g/kWh NO_x emisijų reikšmės, lyginant su variklio darbu neaktyvavus DRV (3.12 pav. a juoda spalva), nustatytas 40,4 % (D100) ir 38,8 % (PMA100) NO_x emisijų sumažėjimas. Didinant variklio apkrovą iki vidutinės NO_x emisijos neženkliai padidėjo 3,14–3,38 g/kWh, o lyginant su VDV darbu neaktyvavus DRV nustatytas 34,1–36,2 % NO_x emisijų sumažėjimas. Didelė variklio apkrova sumažino DRV įtaką variklio darbui ir lėmė mažesnę skirtumą tarp VDV darbo su aktyviu ir neaktyviu DRV ir prisidėjo prie 19,7–21,2 % NO_x emisijų sumažėjimo. Varikliui veikiant 0,794 MPa apkrova fiksuotas 4,05–4,37 g/kWh NO_x emisijų dydis (D100–PMA100). PMA100 sudėtyje esanti deguonis lėmė didesnę λ (3.8 pav. a mėlyna spalva) ir T_c (3.1 pav. c). VDV veikimas su aktyviu DRV lėmė mažesnes NO_x emisijas visomis degalų rūšimis, o naudojant biologinės kilmės PMA100 ir mišinius NO_x emisijos neženkliai išaugo lyginant su D100. Tačiau DRV aktyvavimas prisidėjo prie ženklaus dūmingumo didėjimo (3.11 pav. a mėlyna spalva). Jeigu pavyktų pasiekti homogeninį degimo procesą, tai leistų efektyvinti NO_x emisijų mažinimą nepadarant neigiamos įtakos suodžių susidarymui.

3.4.3. Angliavandenilių emisijų koncentracija deginiuose

Degimo procesas VDV yra labai sudėtingas dėl heterogeninio mišinio susidarymo aukštoje temperatūroje, kai tuo pačiu metu vyksta degalų garavimo, maišymosi ir degimo procesai. Degalų įpurškimo metu susiformuoja maži lašeliai, kurių dydis priklauso nuo degalų išpurškimo greičio bei slėgio. Susidarę degalų lašeliai garuoja ir maišosi su oru įsiurbimo takto metu. Degimo kameroje susidaro daug lokalių riebaus–lieso mišinio zonų ir visiškai nesudegęs oro ir degalų mišinys, sąlygoja anglies ir vandenilio cheminių junginių formavimąsi išmetamosiose dujose (Mollenhauer *et al.* 2010). Oro trūkumas degimo proceso metu yra pagrindinė angliavandenilių formavimosi priežastis. Eksperimento metu deginiuose pastebėti maži CH emisijų kiekiai, sudarantys 0,017–0,040 g/kWh visame VDV apkrovų diapazone (3.13 pav. a juoda spalva). CH emisijų koncentracija didėjo proporcingai didėjant aliejaus koncentracijai degaluose PMA100 > PMA70/D30 > PMA30/D70 > D100. Ši tendencija išliko visame variklio apkrovų diapazone beveik nepakitus.

Didžiausios CH reikšmės fiksuotos VDV veikiant maža apkrova VDV veikiant su aliejingais degalais. PMA100 sudarytas iš ilgų anglies atomų grandinių, kurios suardomos prieš prasidedant degimo procesui, dar kitaip vadinamu indukcijos periodu. Dėl staiga įvykstančios degimo fazės cilindre, ilgus anglies atomų grandines nėra visiškai suardomos ir sudeginamos, todėl dalis angliavandenilių pašalinami kartu su deginiais. Dėl PMA100 būdingo mažesnio H_L negu D100 degalų sąnaudos išaugo (3.2 pav. a juoda spalva) ir atitinkamai

angliavandenilių kiekis. Didžiausias CH emisijų skirtumas VDV veikiant D100 ir PMA100 sudarė apie 25 % esant žemai VDV apkrovai. Didėjant variklio apkrovai b_e mažėjo (3.3 pav. a juoda spalva), η_e išaugo (3.4 pav. a juoda spalva) ir susidarė palankios visiško degimo sąlygos ypač VDV veikiant aliejingais degalais. Šį teiginį patvirtina išaugęs T_{id} (3.7 pav. a juoda spalva) ir atitinkamai mažėjantis CH emisijų skirtumas tarp D100 ir aliejingų degalų. VDV veikiant su augaliniu aliejumi autoriai Hellier *et al.* (2015), Vaitilingom *et al.* (2006), Wang *et al.* (2006), Rakopoulos *et al.* (2006), Roy *et al.* (2013), Agarwal *et al.* (2007), Hazar *et al.* (2010) nustatė CH emisijų neženklių didėjimą kaip ir VDV veikiant PMA100.



3.13 pav. Angliavandenilių CH koncentracijos deginiuose priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyvuotam DRV (juodos kreivės) ir aktyvuotam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.13. Variation of hydrocarbons (CH) emissions dependence on a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Keičiant φ_{ip} angliavandenilių emisijos išmetamosiose dujose išliko didesnės VDV veikiant aliejingais degalais negu D100 (3.13 pav. b). CH emisijos sumažėjo visame φ_{ip} intervale φ_{ip} ankstinant nuo VRT iki -12°AV iki VRT. φ_{ip} ankstinimas iki -16°AV iki VRT lėmė CH emisijų staigų augimą 56,4 % VDV veikiant D100 ir 63,3 % su PMA100. Geri variklio η_e rezultatai (3.4 pav. b) φ_{ip} intervale nuo VRT iki -12°AV iki VRT patvirtino 3.13 b paveiksle išskirtą sklandaus φ_{ip} diapazoną, kur fiksuoti mažiausi CH emisijų kiekiai. Ženklus CH emisijų didėjimas,

fiksuotas vėlinant degalų įpurškimą, o pasiekus $+4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT nustatytos didžiausios CH emisijų reikšmės $0,039\text{--}0,057\text{ g/kWh}$ (D100–PMA100). PMA100 atveju CH emisijos ženkliai išaugo dėl į degalų kamerą įpurškiamo didesnio kiekio degalų, kurių visiškai sudegimui pritrūko laiko. PMA100 būdinga didesnė klampa negu D100 lėmė prastesnę degalų išpurškimą negu D100 ir sutrumpėjo kinetinė degimo fazė.

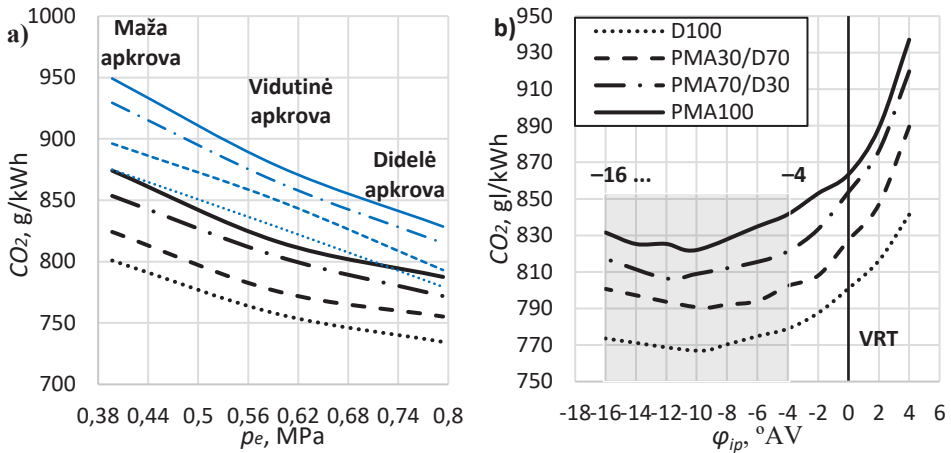
VDV veikiant su aktyvuotu DRV užfiksuota, kad CH koncentracija išmetamosiose dujose neženkliai sumažėjo (3.13 pav. a mėlyna spalva). VDV veikiant D100 su aktyvuotu DRV lyginant VDV darbą su neaktyviu DRV nustatytas CH emisijų sumažėjimas nuo $5,9\%$ esant mažai apkrovai iki $15,6\%$ esant didelei apkrovai ir atitinkamai gauta panaši tendencija VDV veikiant PMA100, CH emisijos sumažėjo 20% , kai $p_e = 0,397\text{ MPa}$ ir $11,8\%$, kai $p_e = 0,794\text{ MPa}$. Į degimo kamerą sugrąžintos išmetamosios dujos sumažino PMA100 daromą neigiamą įtaką ypač esant didesnėms variklio apkrovoms. VDV veikiant PMA100 ir aktyviu DRV lyginant su D100 CH emisijos išaugo $5,0\text{--}18,5\%$, atsižvelgiant į tai, kad VDV veikiant su neaktyviu DRV CH emisijos buvo padidėję $11,8\text{--}25,0\%$. CH emisijos esant didesnėms VDV apkrovoms mažai skyrėsi tarp VDV veikiančio D100 ir PMA100.

3.4.4. Anglies dvideginių koncentracija išmetamosiose dujose

Degimo proceso metu į degimo kamerą įpurkštų degalų dalelės virsta anglies dvideginiu, o susidaręs jo kiekis priklauso nuo sudegusio degalų kiekio, rūšies ir C/H santykio. Tiriamų D100 ir PMA100 C/H santykis yra praktiškai identiškas, todėl CO_2 emisijų kiekį daugiau lemia degalų sąnaudos negu degalų elementinė sudėtis. 3.14 a paveiksle (juoda spalva) matyti, kad didėjant variklio apkrovai CO_2 koncentracija išmetamosiose dujose išaugo. VDV veikiant PMA100 ir jo mišiniais su D100 fiksuotas $2,4\text{--}9,1\%$ CO_2 emisijų padidėjimas visame apkrovų diapazone lyginant su D100. Aliejingų degalų į degimo kamerą įpurškiama daugiau (3.2 pav. a juoda spalva), taip pat į cilindrą patenka didesnis oro masės kiekis (3.5 pav. a juoda spalva). PMA100 sudėtyje esantis $10,48\%$ deguonies kiekis prisideda prie efektyvaus degimo sąlygš ir didesnio η_e (3.4 pav. a juoda spalva). Analizuojant VDV išmetamąsias dujas pastebėtas ženklus dūmingumo sumažėjimas (3.11 pav. a juoda spalva) VDV veikiant PMA100, nes suodžiai efektyviau sudegė, o visišką degimo produktą gerai apibrėžia išaugęs CO_2 . Atlikus literatūros apžvalgą pastebėta, kad autoriai Shehata *et al.* (2011), Nagaraja *et al.* (2015), Agarwal *et al.* (2007) tyrę VDV veikimą su augalinių augalų aliejumi nustatė CO_2 didesnę kiekį negu VDV veikiant D100.

3.14 b paveiksle pavaizduotas CO_2 emisijų dydis VDV dirbant skirtingais φ_{ip} . Tyrimo metu nagrinėtas φ_{ip} intervalas nuo $-16\text{ }^{\circ}\text{AV}$ iki VRT iki $+4\text{ }^{\circ}\text{AV}$ už VRT, o mažiausias CO_2 emisijų kiekis fiksuotas paankstinus φ_{ip} intervale nuo $-14\text{ }^{\circ}\text{AV}$

iki -2 °AV iki VRT. Šiame sklandaus degalų įpurškimo diapazone užfiksuotas CO_2 emisijų kiekis, kuris sudarė apie 774–779 g/kWh VDV veikiant D100 ir 832–842 g/kWh su PMA100.



3.14 pav. Anglies dvideginio CO_2 koncentracijos išmetamosiose dujose priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyvuotam DRV (juodos kreivės) ir aktyvuotam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo φ_{ip} , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.14. Variation of carbon dioxide (CO_2) concentration in the exhaust gases against a) brake mean effective pressure (p_e), when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle (φ_{ip}), $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Paankstinus φ_{ip} pastebėtas CO_2 emisijų mažėjimas, kuris sutapo su B_d (3.2 pav. b) ir atitinkamai T_{id} (3.7 pav. b) sumažėjimu. Degalus įpurškiant už VRT nuo $+1$ iki $+4$ °AV, B_d ir T_{id} išaugo ir prisidėjo prie CO_2 emisijų didėjimo.

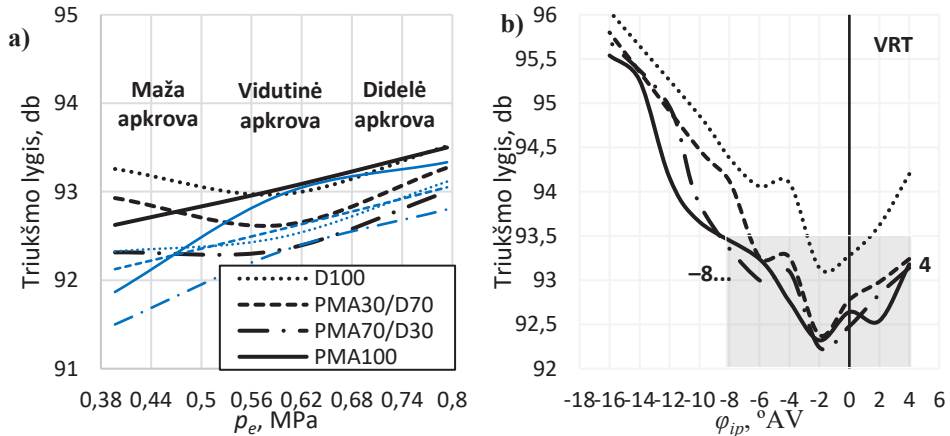
Išmetamųjų dujų grąžinimas į degimo kamerą padidino B_d (3.2 pav. a mėlyna spalva), todėl proporcingai išaugo CO_2 emisijos (3.14 pav. a mėlyna spalva). Didžiausios CO_2 reikšmės 874,9–949,2 g/kWh (D100–PMA100) užfiksuotos VDV veikiant mažos apkrovos režimu, o p_e padidinus iki 0,794 MPa CO_2 emisijų reikšmės sumažėjo 779,5–828,6 g/kWh (D100–PMA100). Šį mažėjimą patvirtina panaši b_e (3.3 pav. a) tendencija didėjant variklio apkrovai, augantis B_{oro} santykis (3.5 pav. a) ir išaugęs η_e (3.4 pav. b). Kaip ir neaktyvavus DRV variklio darbas su aliejingais degalais parodė didesnes CO_2 emisijų reikšmes negu VDV veikiančio su D100.

3.4.5. Vidaus degimo variklio skleidžiamas triukšmas

VDV sukeliamas triukšmas susidaro dėl išaugusio slėgio cilindruose ir trinties (Redel–Marcias *et al.* 2013), kuris auga kartu su didėjančiu variklio greičiu ir apkrova. Tyrimo metu variklio greitis išliko pastovus, tačiau didėjanti VDV apkrova prisidėjo prie didėjančio triukšmo lygio (3.15 pav. a juoda spalva). Nacionalinis profesinių saugos ir sveikatos institutas JAV nustatė didžiausią leistiną dienos triukšmo lygį matuojamą decibelais (NIOSH 2018), kurio ribose 91–97 dB veikė tirtas 1Z VDV. Atsižvelgiant į šio instituto reikalavimus, varikliui skleidžiant 91 dB tokioje aplinkoje rekomenduojama būti ne ilgiau kaip dvi valandas. Garso lygiui išaugus iki 94 dB, rekomenduojamas laikas sutrumpėja iki vienos valandos, o esant 97 dB leistinas buvimo laikas tokioje aplinkoje sutrumpėja iki 30 minučių (NIOSH 2018). VDV veikiant maža apkrova jis skleidė triukšmą 92,3–93,3 dB ribose, kuris mažiausiai kito priklausomai nuo degalų rūšies. Didžiausias triukšmo lygis pasiektas varikliui dirbant mineraliniu dyzelinu, o apie 1 dB sumažėjimas fiksuotas naudojant PMA70/D30 (3.15 pav. a juoda spalva). Dvikomponenčiai degalai lėmė išaugusį VDV η_e (3.4 pav. a juoda spalva), kuris paaiškina tolygų degimo procesą. Kiti autoriai Redel-Marcias *et al.* (2012) taip pat pastebėjo, kad naudojant aliejingus degalus sumažėjo variklio skleidžiamas triukšmas. Pakėlus p_e iki 0,595 MPa VDV skleidžiamas triukšmas beveik nepakito. Didėjant variklio apkrovai išaugo degalų sąnaudos (3.2 a ir 3.3 pav. a juoda spalva), slėgis ir temperatūra cilindre, kurie lėmė triukšmo didėjimą. Varikliui dirbant didžiausia apkrova susiformavo 93,5 dB triukšmo lygis VDV veikiant D100 ir PMA100, o VDV veikiant degalų mišiniais užfiksuoti artimi kiek mažesni triukšmo lygio rezultatai. PMA100 būdinga didesnė kinematinė klampa galėjo turėti įtakos VDV triukšmo dydžiui, o neigiamas poveikis sustiprėjo didinant įpurškiamų degalų kiekį. Visgi VDV veikiant PMA100 ir D100 skleidžiamas variklio triukšmas prie didesnių variklio apkrovų buvo identiškas, o VDV veikimas su PMA70/D30 pasižymėjo mažiausiu skleidžiamu triukšmo lygiu.

VDV skleidžiamam triukšmui didelės įtakos turėjo φ_{ip} . 3.15 b paveiksle pažymėtame sklandaus φ_{ip} intervale nuo -8°AV iki VRT iki $+4^\circ\text{AV}$ už VRT užfiksuotas mažiausias decibelų lygis. Šio diapazono viršutinė riba yra susieta su didžiausiu triukšmo lygiu 93,5 dB, kuris buvo pasiektas naudojant D100 ir PMA100 esant $p_e = 0,794$ MPa variklio apkrovai. Veiksmingi triukšmo mažinimo rezultatai pasiekti paankstinus φ_{ip} iki -2°AV iki VRT. Aliejinių degalų naudojimas prisidėjo prie mažiausio triukšmo lygio 92,2 dB VDV veikiant PMA70/D30, 92,3 dB su PMA100 ir 92,4 dB su PMA30/D70 (3.15 pav. b). Tęsiant φ_{ip} ankstinimą 1Z varilyje triukšmo lygis perkopė 93,5 dB žymę pasiekus -4°AV iki VRT, kai VDV veikė D100, φ_{ip} ties -8°AV iki VRT pasiekta db riba su PMA30/D70, ties -10°AV iki VRT VDV veikiant PMA70/D30 esant -12°AV pasiekta 93,5 dB riba naudojant PMA100. Vėlinant φ_{ip} intervale nuo $+1^\circ\text{AV}$ iki $+4^\circ\text{AV}$ už VRT gauta panaši tendencija kaip ir ankstinant degalų įpurškimą, o VDV veikiant aliejingais

degalais neviršijo 93,5 dB triukšmo ribos. VDV skleidžiamo triukšmo rezultatai parodė, kad didesnė aliejaus koncentracija degaluose lėmė paslankesnę reguliavimo charakteristiką rezultatams.



3.15 pav. VDV keliamo triukšmo priklausomybė nuo: a) variklio vidutinio efektyviojo slėgio p_e , esant neaktyvuotam DRV (juodos kreivės) ir aktyvuotam DRV (mėlynos kreivės), b) degalų įpurškimo paskubos kampo ϕ , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

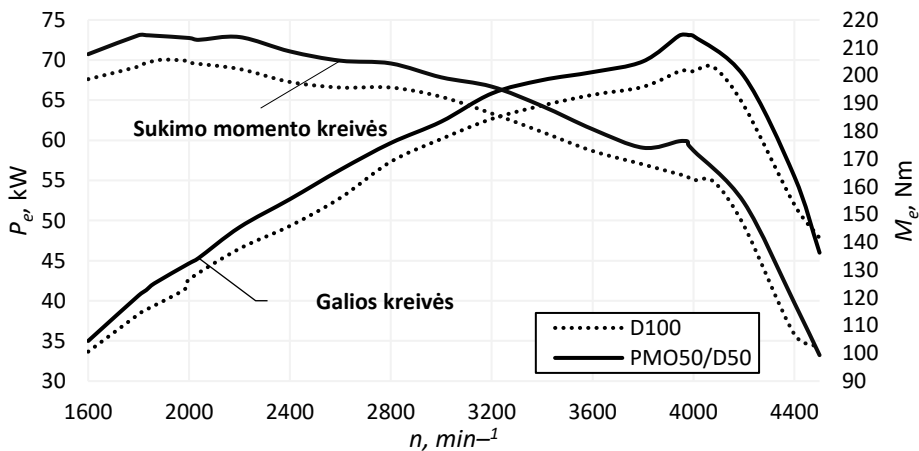
Fig. 3.15. Variation of engine noise against: a) brake mean effective pressure p_e , when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves), b) fuel injection angle ϕ , $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

VDV veikiant su aktyviu DRV pastebėtas neženklus triukšmo sumažėjimas visame apkrovų diapazone (3.15 pav. a mėlyna spalva). Mažiausią triukšmo lygį variklis skleidė esant mažai apkrovai, naudojant PMA70/D30 – 91,5 dB, PMA100 – 91,9 dB, PMA30/D70 – 92,1 dB ir D100 – 92,3 dB. Išmetamųjų dujų gražinimas į degimo kamerą dėl mažesnio deguonies kiekio sulėtino degimo greitį ir slėgio augimą, sumažėjo degimo metu susidarantys temperatūrų šuoliai, kurie lėmė triukšmo lygio mažėjimą

3.5. Dinaminių variklio rodiklių nustatymas varikliui veikiant mikrodumblių aliejumi

VDV sukimo momento ir galios nustatymo panaudotas važiuojantis automobilis su 1Z varikliu, pritaikant D100 ir PMA50/D50 degalus. Didžiausios sukimo momento reikšmės fiksuotos variklio veleniui sukantis $1600\text{--}2400 \text{ min}^{-1}$ greičiu.

Šiame diapazone VDV veikė efektyviai ir išvystė M_e diapazone 197,7–207,0 Nm. Didžiausia M_e reikšmė nustatyta, kai $n = 1889 \text{ min}^{-1}$ (3.16 pav.). VDV veikiant PMA50/D50 sukimo momentas išaugo 3,6–5,7 % minėtame veleno sukimosi intervale, o $M_{max} = 214,5 \text{ Nm}$ fiksuotas esant 1830 min^{-1} sukimosi greičiui, kuris sudarė 5,7 % didėjimą lyginant su VDV veikiančiu D100. Toliau didinant variklio sukimosi greitį, fiksuotos tolygiai mažėjančios M_e reikšmės iki kol buvo pasiektas P_{max} po kurio sekė staigus M_e ir P_e mažėjimas, o jų rezultatų kreivės parodė lygiagrečią viena kitos atžvilgiu tendenciją (3.16 pav.). VDV veikiant PMA50/D50 parodė didesnę VDV darbo efektyvumą dėl geresnio cilindro pripildymo oru ir didesnio energijos išsiskyrimo iš degalų masės vieneto efektyvumo lyginant su D100. VDV veikiant PMA50/D50 susidarė geresnės degimo sąlygos, iš degalų išsiskyrė didesnis energijos kiekis bei išaugo p_k . Galima teigti, kad PMA50/D50 naudojimas VDV prisidėjo prie didesnio λ , o dėl išaugusio pripūtimo slėgio ir mažesnio H_L išaugo B_d lyginant su D100. VDV veleno sukimosi greičiui viršijus daugiau negu 4200 min^{-1} fiksuotas staigus M_e ir P_e mažėjimas.



3.16 pav. Variklyje išvystomo sukimo momento M_e ir galios P_e priklausomybė nuo variklio greičio n

Fig. 3.16. The torque M_e and power P_e output in the engine dependence on the engine rotation speed n

Variklyje išvystoma P_e augo didėjant veleno sukimosi greičiui, užfiksuota didėjančios galios tiesinė priklausomybė nuo VDV sukimosi greičio, kol buvo pasiektas $P_{max} = 69,1$ esant $n = 4082 \text{ min}^{-1}$. VDV veikiant su PMA50/D50 nustatyta analogiška variklio išvystomos galios didėjimo tendencija, o veleno sukimosi intervale nuo 1800 min^{-1} iki 4100 min^{-1} fiksuota vidutiniškai 6 % didesnė galia negu VDV veikiant D100. VDV veikiantis PMA50/D50 išvystė

6,6 % didesnę galią negu su D100, kai $n = 2400\text{--}2600 \text{ min}^{-1}$. VDV veikiančio PMA50/D50 $P_{max} = 73,2 \text{ kW}$ kaip ir M_{max} išvystyta kiek anksčiau negu VDV veikiant su D100 t. y., kai $n = 3975 \text{ min}^{-1}$, VDV veikiant D100 esant 4082 min^{-1} užfiksuota $P_{max} = 69,1 \text{ kW}$ (3.16 pav.). VDV veikiant PMA50/D50 M_{max} ir P_{max} pasiekta anksčiau t. y. prie mažesnio n , kuriam įtakos galėjo turėti didesnis mikrodumplių aliejaus CI ir susiformavusios visiško degimo sąlygos, kurios buvo apžvelgtos atliktuose stenginiuose bandymuose pagal 1-ą ir 2-ą metodikas. Išaugęs deginių srautas priverstė turbokompresoriaus turbiną sukstis didesniu greičiu, padidėjo slėgis turbokompresoriuje ir oro masės srautas lėmęs geresnį cilindro užpildymą oru. VDV veikiant PMA50/D50 dėl mažesnio žemutinio šilumingumo ir didesnės klampos degalų išpurškimas truko ilgiau, kas lėmė ilgesnę degimo trukmę ir išaugusią temperatūrą cilindre. Nustatyta, kad VDV veikiant PMA50/D50 P_{max} išaugo 6,0 % lyginant su D100. Geresnėmis visiško sudegimo savybėmis pasižymėjęs PMA50/D50 ir sąlygojo tolygų degimo procesą (Karabektas *et al.* 2013, Rodriguez *et al.* 2017), kuri patvirtina išaugęs variklio η_e (3.4 a pav.). VDV pasiekus P_{max} dėl variklio komponentuose susidariusių trinties nuostolių ir pablogėjusio cilindro pripildymo fiksuotas staigus P_e sumažėjimas.

Reikėtų pažymėti, kad bandymų metu VDV veikė įprastu režimu t. y. nebuvo reguliuojamas degalų aukšto slėgio siurblys, degalų įpurškimo porcijos dydis keičiant degalus iš D100 į PMA50/D50, nebuvo keičiami degalų purkštukai ir kt. Reikia įvertinti, kad VDV veikiant PMA50/D50 degalų masinė ciklinė porcija santykinai padidėjo 1,11 karto 60–120 Nm variklio apkrovos diapazone, η_e padidėjo 1,05 karto, o H_L sumažėjo 1,12 karto lyginant su D100. Įvertinus aukščiau minėtus parametrus gauta, kad PMA50/D50 santykinai padidėjo 1,05 karto ir perskaičiavus M_e ir P_e rezultatus VDV veikiant PMA50/D50 ir D100 gauti praktiškai identiški rezultatai.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Eksperimentinių rezultatų analizei naudojant AVL BOOST programinį paketą nustatytos slėgio cilindre kitimo greičio, temperatūros cilindre ir jos kitimo greičio, sudegusios degalų masės dalies ir šilumos išsiskyrimo cilindre greičio priklausomybės nuo alkūninio veleno posūkio kampo varikliui veikiant maža apkrova. Išvardintų parametų stebėseną vykdyta trimis degimo procesą sudarančiomis fazėmis: kinetinei, difuzinei ir baigiamajai degimo fazėms, įvertinant indukcijos periodo svarbą prieš prasidedant kinetinei degimo fazei.
2. Varikliui veikiant mikrodumplių aliejumi išanalizuoti cilindre vykstantys šiluminiai-cheminiai procesai ir slėgio pokyčiai. Skaitinė degimo proceso analizė leido argumentuoti ir pagrįsti eksperimentiškai

nustatytus variklio parametrus. Cilindre vykstantys degimo procesai išreikšti per skirtingas degimo fazes bei nustatytos parametrų kitimo tendencijos pasirinktoms degalų rūšims. Indukcijos periodo metu skirtumas tarp charakteringų mikrodumblių aliejaus ir dyzelino reikšmių sudarė iki 4,0 %, kuris neišaugo kinetinės ir difuzinės degimo fazių metu, o slėgio cilindre kitimas buvo mažesnis negu 0,2 %.

3. Atlikus standinius slėginio uždegimo variklio energetinių ir ekologinių rodiklių palyginamuosius tyrimus, naudojant mikrodumblių aliejų ir mišinius su dyzelinu bei keičiant apkrovos charakteristikas su neaktyviu DRV nustatyta, kad variklio efektyvusis naudingumo koeficientas padidėjo iki 12,0 %, o dūmingumas sumažėjo iki 41,1 % lyginant su dyzelinu. Dėl aliejaus mažesnio žemutinio šilumingumo efektyviosios lyginamosios degalų sąnaudos išaugo iki 17,4 % bei neženkiai išaugo NO_x ir CO_2 iki 4,8 % ir 9,1 % atitinkamai lyginant su dyzelinu.
4. Atlikus slėginio uždegimo variklio energetinių ir ekologinių rodiklių palyginamuosius tyrimus naudojant mikrodumblių aliejų ir mišinius su dyzelinu bei keičiant apkrovos charakteristikas esant neaktyviam DRV nustatyta, kad VDV veikiant aliejingais degalais variklio efektyvusis naudingumo koeficientas kaip ir su neaktyviu DRV padidėjo iki 12,0 %, o dūmingumas sumažėjo net iki 54,2 % lyginant su dyzelinu, gauti ypač geri rezultatai. Nors efektyviosios lyginamosios degalų sąnaudos maksimaliai išaugo iki 15,2 % lyginant su dyzelinu, tačiau gauti geresni rezultatai su aktyviu DRV negu neaktyviu DRV. Varikliui veikiant aliejumi NO_x maksimaliai išaugo iki 7,9 % lyginant su dyzelinu, o CO_2 kaip ir su neaktyviu DRV iki 9,1 %.
5. Išnagrinęjus veiksmingus sprendinius pagerinti VDV energetinius ir ekologinius rodiklius jo nemonifikuojant, o panaudojant mikrodumblių aliejų ir jo mišinius su dyzelinu buvo nustatyti sklاندus degalų įpurškimo paskubos kampo intervalai varikliui veikiant mažos apkrovos režimu nuo -15°AV iki -4°AV iki VRT. Didžiausias nesutapimas (skirtumas) nustatytas tarp NO_x ir dūmingumo parametrų. NO_x sklاندus degalų įpurškimo intervalas nustatytas nuo -4°AV iki $+4^\circ\text{AV}$, o dūmingumo nuo -16°AV iki -10°AV iki VRT.
6. Atlikus išorinės greitininės charakteristikos eksperimentinius tyrimus nemonifikuojant variklio, nekeičiant degalų siurblio ir purkštukų nustatyta, kad VDV veikiant mikrodumblių aliejumi ir dyzelino mišiniu sukimo momento ir galios rodikliai nepablogėjo lyginant su dyzelinu.

Bendrosios išvados

1. Terminės analizės bandymų metu nustatyta, kad diferencinės skenavimo kalorimetrijos metodas yra tinkamesnis mikrodumblių aliejaus ir jo mišinių su dyzelinu virimo ir užsiliepsnojimo temperatūrų nustatymui taikyti negu termogravimetrinės analizės metodas. Grynas mikrodumblių aliejus pasižymėjo geriausiu terminiu stabilumu ir didžiausia virimo temperatūra. Nustatyta, kad taikant dviejų liestinių metodą gautos pakankamai tikslios degalų savaiminio užsiliepsnojimo temperatūros, o didžiausia pasižymėjo mikrodumblių aliejus. Cetaninio indekso skaičiavimai atlikti taikant tris skirtingus metodus ir remiantis mažiausia paklaida nustatyta, kad CCI_3 metodas yra priimtinas pasirinktų degalų rūšių Cetaninio indekso nustatymui. Galima teigti, kad CCI_3 metodas yra universalus ir gali būti pritaikytas įvairių degalų rūšių Cetaninio indekso apskaičiavimams atlikti.
2. Naudojant AVL BOOST programinį paketą su bandomaisiais degalų mišiniais atlikta slėgio cilindre kitimo greičio, temperatūros cilindre ir jos kitimo greičio, sudegusios degalų masės dalies, bei šilumos išsiskyrimo greičio cilindre analizė. Didžiausios šių parametų reikšmės buvo nustatytos varikliui veikiant mikrodumblių aliejumi ir tendencin-

gai mažėjo didinant dyzelino kiekį degalų mišinyje. Iš šilumos išsiskyrimo grafikų nustatyta indukcijos periodo trukmė, kinetinė, difuzinė ir baigiamoji degimo fazės bei jų trukmės.

3. Eksperimentiškai ištirta mikrodumplių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu įtaka slėginio uždegimo variklio apkrovos esant aktyvuotam ir neaktyvuotam deginių recirkuliaciniam vožtuvui. Nustatyta, kad varikliui veikiant aliejumi variklio efektyvusis naudingumo koeficientas padidėja iki 12,0 %, dūmingumas sumažėja iki 54,2 %, o variklyje sukuriama triukšmo lygis praktiškai nepakito ir neženkliai išauga NO_x ir CO_2 emisijos lyginant su dyzelinu. Atlikta išorinė greižtuminė charakteristika varikliui veikiant aliejaus ir dyzelino mišiniui bei nustatyta, kad VDV sukimo momentas ir galia nepablogėjo lyginant su dyzelinu.
4. Atlikus eksperimentinius reguliavimo charakteristikos tyrimus variklį apkrovus 0,397 MPa ir jo nemodifikuojant, nustatyti sklандаus degalų įpurškimo intervalai, kuriuose galima efektyviai eksploatuoti variklį su mikrodumplių aliejumi ir jo mišiniais su dyzelinu. Energetiniams rodikliams nustatytas sklандаus degalų įpurškimo paskubos kampo intervalas nuo $-15\text{ }^\circ\text{AV}$ iki $-4\text{ }^\circ\text{AV}$ iki VRT. Ekologiniams rodikliams buvo sudėtingiau nustatyti sklандаus degalų įpurškimo intervalą dėl skirtingų charakteringų savybių, nulemiančių ekologinių rodiklių dydį, tačiau galima teigti, kad priimtinas intervalas yra nuo $-10\text{ }^\circ\text{AV}$ iki $-4\text{ }^\circ\text{AV}$ iki VRT.
5. Atlikus augalinės kilmės mikrodumplių aliejaus ir jo mišinių su mineraliniu dyzelinu fizikinių-cheminių charakteristikų tyrimus bei nustačius geresnius terminio stabilumo rezultatus ir aukštesnį Cetaninį indeksą lyginant su mineraliniu dyzelinu. Išanalizavus pagrindinius variklio energetinių ir ekologinių parametrų pokyčius bei atlikus degimo proceso cilindre analizę galima sukurti technines-ekonomines prielaidas tokių biodegalų gamybai šalyje, kurie potencialiai galėtų būti pritaikyti atskiruose transporto sektoriuose.

Literatūra ir šaltiniai

Agarwal, D.; Agarwal, A. K. 2007. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering* 27: 2314–2323.

Agarwal, A.K.; Dhar, A. 2013. Experimental investigations of performance, emission and combustion characteristics of Karanja oil blends fuelled DIC engine. *Renewable Energy* 52: 283–291.

Agarwal, D.; Kumar, L.; Agarwal, A. K. 2008. Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine. *Renewable Energy* 33: 1147–1156.

Agarwal, A. K.; Rajamanoharan, K. 2009. Experimental investigations of performance and emissions of Karanja oil and its blends in a single cylinder agricultural. *Applied Energy* 86: 106–112.

Almeida, S. C. A.; Belchior, C. R.; Nascimento, M. V. G.; Vieira, L. S. R.; Fleury, G. 2002. Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. *Fuel* 81: 2097–2102.

Alptekin, E.; Canakci, M. 2008. Determination of the density and the viscosities of bio-diesel–diesel fuel blends. *Renewable Energy* 33: 2623–2630

Altin, R.; Cetinkaya, S.; Yucesu, H. S. 2001. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management* 42: 529–538.

Atmanli, A.; Ileri, E.; Yilmaz, N. 2016. Optimization of diesel–butanolvegetable oil blend ratios based on engine operating parameters. *Energy* 96: 569–580.

- AVL BOOST. 2011. AVL BOOST theory. Graz, Austria. 113 p.
- Bari, S.; Lim, T. H.; Yu, C. W. 2002. Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine. *Renewable Energy* 27: 339–351.
- Biopact. 2007. An in-depth look at biofuels from algae. *Biopact*. <http://global.mongabay.com/news/bioenergy/2007/01/in-depth-look-at-biofuels-from-algae.html>.
- Baskar, P.; Senthilkumar, A. 2016. Effects of oxygen enriched combustion on pollution and performance characteristics of a diesel engine. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19: 438–443.
- Butrimaitė, J.; Dementjev, A.; Dikčius, G.; Gadonas, R.; Jasevičiūtė, J.; et al. 2003. *Vadovėlis Fizika biomedicinos ir fizinių mokslų studentams*, Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 212 p.
- Bux, F.; Chisti, Y. (Eds). 2016. *Algae biotechnology: Products and processes*. Springer, New York.
- Brownbridge, G.; Azadi, P.; Smallbone, A.; Bhave, A.; Taylor, B.; Kraft, M. 2014. The future viability of algae-derived biodiesel under economic and technical uncertainties. *Bioresource Technology* 151: 166–173.
- Bosch, G. R. 2009. *Dyzelinių variklių valdymo sistemos*. Kaunas: Smatijos leidykla 328 p.
- Challen, B.; Baranescu, R. 1999. *Diesel engine reference book*. Oxford: Butterworth–Heinemann.
- Charlet, A. 1994. *Combustion et pollution des biocarburants dans les moteurs diesel à injection directe*. Orle'ans: Universite' d'Orle'ans.
- Collet, P.; Hélias, A.; Lardon, L.; Steyer, J. P.; Bernard, O. 2015. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Applied Energy* 154(15): 1089–1102.
- Corsini, A.; Marchegiani, A.; Rispoli, F.; Sciulli, F.; Venturini, P. 2015. Vegetable oils as fuels in diesel engine, engine performance and emissions. *Energy Procedia* 81: 942–949.
- Dalrymple, O. K.; Halfhide, T.; Innocent Udom, I.; Gilles, B.; Wolan, J.; Zhang, Q.; Ergas, S. 2013. Wastewater use in algae production for generation of renewable resources: A review and preliminary results. *Aquatic Biosystems* 9:2. doi: 10.1186/2046-9063-9-2.
- Demirbas, A. 2009. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. *Applied Energy* 86: 108–117.
- Daho, T.; Vaitilingom, G.; Sanogo, O. 2009. Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in non-modified domestic boiler. *Fuel* 88: 1261–1268.
- Dogan, O. 2011. The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions. *Fuel* 90: 2467–2472.

Ernsting, A. 2016. Biofuel or biofraud? The vast taxpayer cost of failed cellulosic and algalbiofuels. *IndependentScience News*. <https://www.independentsciencenews.org/environment/biofuel-or-biofraud-the-vasttaxpayer-cost-of-failed-cellulosic-and-algal-bio-fuels>.

European Comission. 1989. CORDIS. ID: EN3B0019. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/13119_en.html>.

European Comission. 1989. CORDIS. ID: EN3B0020. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/13116_en.html>.

European Comission. 2014. CORDIS. ID: 230598. <http://cordis.europa.eu/result/rcn/144097_en.html> [Tikrinta 2018.11.16].

European Comission. 2019. CORDIS. ID: 241301. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/93226_en.html>. [Tikrinta 2018.11.16]

European Comission. 2019. CORDIS. ID: 241383. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/94338_en.html>. [Tikrinta 2018.11.16]

European Comission. 2019. CORDIS. ID: 256526. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/95036_en.html>.[Tikrinta 2018.11.17]

European Comission. 2014. CORDIS. ID: 268164. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/100473_en.html>. [Tikrinta 2018.11.17]

European Comission. 2014. CORDIS. ID: 268211. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/100477_en.html>. [Tikrinta 2018.11.18]

European Comission. 2014. CORDIS. ID: 268208. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/103638_en.html>. [Tikrinta 2018.11.20]

European Comission. 2017. CORDIS. ID: 679814. <http://cordis.europa.eu/project/rcn/199416_en.html>. [Tikrinta 2018.11.20]

Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/75/ES. 2010. Dėl pramoninių išmetamų teršalų (taršos integruotos prevencijos ir kontrolės). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>.

Franklin, S.; Somanchi, S.; Wee, J.; Rudenko, G.; Moseley, J. L.; et al. 2012. Production of hydroxylated fatty acids in *Prototheca moriformis*. *US8852885 B2*.

Fontaras, G.; Kousoulidou, M.; Karavalakis, G.; Bakeas, E.; Samaras, Z. 2011. Impact of straight vegetable oil diesel blends application on vehicle regulated and non-regulated emissions over legislated and real world driving cycles. *Biomass and Bioenergy* 35: 3188–3198.

Fort, E. F.; Blumberg, P. N. 1982. Performance and durability of a turbocharged diesel fueled with cottonseed oil blends. *International conference on plant and vegetable oils as fuels*, Fargo, ND, USA.

Ghorbania, A.; Rahimpour, H. R.; Ghasemi, Y.; Zoughic, S.; Rahimpour, M. R. 2014. A review of carbon capture and sequestration in Iran: microalgal biofixation potential in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Review* 35: 73–100.

- Go, S.; Lee, S. J.; Jeong, G. T.; Kim, S. K. 2012. Factors affecting the growth and the oil accumulation of marine microalgae, *Tetraselmis suecica*. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 35(1–2): 145–150.
- Gumbytė, M.; Makarevičienė, V.; Skorupskaitė, V.; Sendžikienė, E.; Kondratavičius, M. 2018. Enzymatic microalgae oil transesterification with ethanol in mineral diesel fuel media. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10(1): Article Number 013105.
- Guo, Z.; Liu, Y.; Guo, H.; Yan, S.; Mu, J. 2013. Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production. *Journal of Environmental Sciences* 25(1): S85–S88.
- Harwood, H. 1984. Oleochemicals as a fuel: Mechanical and economic feasibility. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 61: 315–324.
- Hazar, H.; Aydin, H. 2010. Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO)-diesel blends. *Applied Energy* 87: 786–790.
- Hebbal, O. D.; Reddy, K. V.; Rajagopal, K. 2006. Performance characteristics of a diesel engine with deccan hemp oil. *Fuel* 85: 2187–2194.
- Hellier, P.; Ladommatos, N.; Yusaf, T. 2015. The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. *Fuel* 143: 131–143.
- Higelin, P. 1992. Huiles végétales – Biocombustible diesel. Incidence des aspects thermiques liés au type de moteur sur la combustion. Université d'Orléans.
- Huang, C. H.; Tan, C. S. 2014. A Review: CO₂ Utilization. *Aerosol and Air Quality Research*. 14: 480–499.
- Independent States in the World. 2012. Bureau of Intelligence and Research. Washington, DC.
- Islam, M. A.; Magnusson, M.; Brown, R. J.; Ayoko, G. A.; Nabi, N.; Heimann, K. 2013. Microalgal species selection for biodiesel production based on fuel properties derived from fatty acid profiles. *Energies* 6: 5676–5702.
- Jacquot, J. E. 2008. Biofuel Comparison Chart: The "Good," the Bad and the (Really) Ugly. *Treehugger*. <https://www.treehugger.com/clean-technology/biofuel-comparison-chart-the-good-the-bad-and-the-really-ugly.html>
- Jalinier, C. 1988. Etude comparative de l'inflammation et de la combustion de l'huile de coton et du gazole utilisés comme carburant dans un moteur diesel à injection indirecte. Orléans: Université d'Orléans.
- Jazair, W.; Kubo, S.; Takayasu, M.; Yatsufusa, T.; Kidoguchi, Y. 2011. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by rapeseed oil biofuel. *Jurnal Mekanikal* 33(2): 32–39.
- Juul, N.; Meibom, P. 2012. Road transport and power system scenarios for Northern Europe in 2030. *Applied Energy* 92: 573–582.

- Kalam, M. A.; Husnawan, M.; Masjuki, H. H. 2003. Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine. *Renewable Energy* 28: 2405–2415.
- Kalam, M. A.; Masjuki, H. H. 2004. Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil. *Biomass and Bioenergy* 27: 289–297.
- Karabektas, M.; Ergen, G.; Hosoz, M. 2013. Effects of the blends containing low ratios of alternative fuels on the performance and emission characteristics of a diesel engine. *Fuel* 112: 537–541.
- Khadka, C. B. 2015. How Much Money Can an Equation Really Save? Standard Test Method for Calculating Cetane Index via Four Variable Equation. *Economic Journal of Development Issues* 19 & 20 (1–2): 60–76
- Kyriakopoulos, G. L.; Chalikias, M. S.; Kalaitzidou, O.; Skordoulis, M.; Drosos, D. 2015. Environmental viewpoint of fuelwood management. *CEUR workshop proceedings* 1498: 416–425.
- Knothe, G.; Dunn, R. O.; Bagby, M. O. 2003. Biodiesel: the use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels. *Fuels and Chemicals from Biomass* 10: 172–208. doi: 10.1021/bk-1997-0666.ch010
- Koseoglu, O. R.; Al-Hajji, A.; Al-Tuwailib, A. A. 2016. Characterization of crude oil and its fractions by thermogravimetric analysis. *Patent WO2016111958A1*. [Tikrinta 2018.11.20]
- Krašto apsaugos ministerija. 2019. Vilnius. http://kam.lt/lt/titulinis_1220.html [Tikrinta 2019.05.14]
- Labeckas, G.; Slavinskas, S. 2006. Performance of direct-injection off-road diesel engine on rapeseed oil. *Renewable Energy* 31: 849–863.
- Lebedevas, S.; Pukalskas, S.; Daukšys, V. 2020. Mathematical modelling of indicative process parameters of dual-fuel engines with conventional fuel injection system. *Transport* 35: 57–67.
- Lietuvos statistikos metraštis. 2018. Vilnius 442 p. ISSN 2029-3631.
- Lithuanian's National Inventory Report. 2016. Greenhouse Gas Emission 1990–2014. Republic of Lithuania. Vilnius. 452 p.
- Lithuanian Pollutants Emission Inventory for Period 1990–2016. 2018. Vilnius. doi:10.2800/571876.
- Lu, J. J.; Chen, W. H. 2015. Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis. *Applied Energy* 160: 49–57.
- Makarevičienė, V.; Skorupskaitė, V.; Andrulevičiūtė, V. 2013. Biodiesel fuel from microalgae-promising alternative fuel for the future: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 12: 119–130.

- Makarevičienė, V.; Janulis, P. 2013. Environmental effect of rapeseed oil ethyl ester. *Renewable Energy* 28: 2395–2403.
- Makarevičienė, V.; Lebedevas, S.; Rapalis, P.; Gumbytė, M.; Skorupskaitė, V.; Žaglinskis, J. 2014 a. Performance and emission characteristics of diesel fuel containing microalgae oil methyl esters. *Fuel* 120: 233–239.
- Makarevičienė, V.; Skorupskaitė, V.; Levisauskas, D.; Andrulevičiūtė, V.; Kazancev, K. 2014 b. The optimization of biodiesel fuel production from microalgae oil using response surface methodology. *International Journal of Green Energy* 11(5): 527–541.
- Makarevičienė, V.; Gumbytė, M.; Skorupskaitė, V.; Sendžikienė, E. 2017. Biodiesel fuel production by enzymatic microalgae oil transesterification with ethanol. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9(2): Article Number 023101.
- Masjuki, H.; Kalam, M.; Maleque, M. 2000. Combustion characteristics of biological fuel in diesel engine. *SAE 2000 world congress*. doi: 10.4271/2000-01-0689.
- Mat, S. C.; Idoras, M. Y.; Hamid, M. F.; Zainal, Z. A. 2018. Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 808–823
- Misra, R. D.; Murthy, M. S. 2010. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 3005–3013.
- Mollenhauer, K.; Tschoeke, H. 2010. Handbook of Diesel Engines. Berlin: Springer.
- Moss, B. 2016. Ultimate review: the unlimited biotech potential of algae. *Green tech*. <http://labiotech.eu/algae-review-industry-biotech-greentechbiofuels-nutrition-scrubbing>. [Tikrinta 2018.11.05]
- Mostafa, S. S. M.; El-Gendy, N. S. 2013. Evaluation of fuel properties for microalgae *Spirulina platensis* bio-diesel and its blends with Egyptian petro-diesel. *Arabian Journal of Chemistry*.
- Murugesan, A.; Umarani, C.; Subramanian, R.; Nedunchezian, N. 2009. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 653–662.
- Narayana, R. J.; Ramesh, A. 2006. Parametric studies for improving the performance of a *Jatropha* oil-fuelled compression ignition engine. *Renewable Energy* 31: 1994–2016.
- Nagaraja, S.; Sooryaprakash, K.; Sudhakaran, R. 2015. Investigate the effect of compression ratio over the performance and emission characteristics of variable compression ratio engine fueled with preheated palm oil – diesel blends. *Procedia Earth and Planetary Science* 11: 393–401.
- Ndayishimiye, P.; Tazerout, M. 2011. Use of palm oil-based biofuel in the internal combustion engines: performance and emissions characteristics. *Energy* 36: 1790–1796.
- Nettles-Anderson, S.; Olsen, D. B.; Johnson, J. J.; Enjalbert, J. N. 2014. Performance of a Direct Injection IC Engine on SVO and Biodiesel from Multiple Feedstocks. *Journal of Power and Energy Engineering* 2: 1–13.

- NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health). 2018. *Noise and hearing loss prevention, guidance and regulations*. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/noise/reducenoiseexposure/regsguidance.htmlaboutcancer/statistics/cancerstatsreport/>; 2018 [Tikrinta 2018.09.16].
- Nwafor, O. M. I.; Rice, G. 1996. Performance of rapeseed oil blends in a diesel engine. *Applied Energy* 54: 345–354.
- Nwafor, O. M. I.; Rice, G.; Ogbonna, A. I. 2000. Effect of advanced injection timing on the performance of rapeseed oil in diesel engines. *Renewable Energy* 21: 433–444.
- Nwafor, O. M. I. 2003. The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. *Renewable Energy* 28:171–181.
- Nuttal, W. J.; Samaras, C.; Bazilian, M. 2017. Energy and the Military: Convergence of Security, Economic, and Environmental Decision-Making. *Cambridge Working Paper in Economics* 1752: 29 p. doi: 10.17863/cam.17547.
- Pandey, R. K.; Rehman, A.; Sarviya, R. M. 2012. Impact of alternative fuel properties on fuel spray behavior and atomization. *Renewable Sustainable Energy Review* 16: 1762–1778.
- Pinzi, S.; Rounce, P.; Herreros, J. M.; Tsolakis, A.; Dorado, M. P. 2013. The effect of biodiesel fatty acid composition on combustion and diesel engine exhaust emissions. *Fuel* 104: 170–182.
- Plank, M.; Wachtmeister, G.; Thuncke, K.; Remmele, E.; Emberger, P. 2017. Effect of fatty acid composition on ignition behavior of straight vegetable oils measured in a constant volume combustion chamber apparatus. *Fuel* 207: 293–301.
- Prabu, S. S.; Asokan, M. A.; Prathiba, S.; Ahmed, S.; Puthean, G. 2018. Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine. *Renewable Energy* 122: 196–205.
- Pramanik, K. 2003. Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renewable Energy* 28: 239–248.
- Rakopoulos, C. D.; Antonopoulos, K. A.; Rakopoulos, D. C.; Hountalas, D. T.; Giakoumis, E. G. 2006. Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins. *Energy Conversion and Management* 47: 3272–3287.
- Rakopoulos, C. D.; Dimaratos, A. M.; Giakoumis, E. G.; Rakopoulos, D. C. 2011. Study of turbocharged diesel engine operation, pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends. *Applied Energy* 88: 3905–3916.
- Ramadhas, A. S.; Jayaraj, S.; Muraleedharan, C. 2005. Characterization and effect of using rubber seed oil as fuel in the compression ignition engines. *Renewable Energy* 30: 795–803.

- Rapier, R. 2012. Current and projected costs for biofuels from algae and pyrolysis. *Energy trends*. <http://www.energytrendsinsider.com/2012/05/07/current-and-projected-costs-for-biofuels-from-algae-and-pyrolysis>. [Tikrinta 2019.03.22]
- Rashedul, H. K.; Masjuki, H. H.; Kalam, M. A.; Teoh, Y. H.; How, H. G.; Fattah, I. M. R. 2015. Effect of antioxidant on the oxidation stability and combustion performance emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel biodiesel blend. *Energy Conversion and Management* 106: 849–858.
- Raslavičius, L.; Semenov, V. G.; Chernova, N. I.; Keršys, A.; Kopeyka, A. K. 2013. The promise and challenges of algae for transportation biofuels. *Proceedings of 17th International Conference Transport Means*. Kaunas: 83–86.
- Raslavičius, L.; Semenov, V. G.; Chernova, N. I.; Keršys, A.; Kopeyka, A. K. 2014 a. Producing transportation fuels from algae: In search of synergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 133–142.
- Raslavičius, L.; Keršys, A.; Starevičius, M.; Sapragnonas, J.; Bazaras, Ž. 2014 b. Biofuels, sustainability and the transport sector in Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32: 328–346.
- Redel-Marcias, M. D.; Pinzi, S.; Leiva-Candia, D. E.; Cubero-Atienza, A. J.; Dorado, M. P. 2013. Influence of fatty acid unsaturation degree over exhaust and noise emissions through biodiesel combustion. *Fuel* 109: 248–255.
- Redel-Marcias, M. D.; Hervas-Martinez, C.; Pinzi, S.; Gutierrez, P. A.; Cubero-Atienza, A. J.; Dorado, M. P. 2012. Noise prediction of a diesel engine fueled with olive pomace oil methyl ester blended with diesel fuel. *Fuel* 98: 280–287.
- Ryan, T.; Dodge, L.; Callahan, T. 1984. The effects of vegetable oil properties on injection and combustion in two different diesel engines. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 61: 1610–1619.
- Rodriguez, R. P.; Borroto, Y. S.; Espinoza, E. A. M.; Verhelst, S. 2017. Assessment of diesel engine performance when fueled with biodiesel from algae and microalgae: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69: 833–842.
- Roy, M. M.; Wang, W.; Bujold, J. 2013. Biodiesel production and comparison of emissions of a DI diesel engine fueled by biodiesel-diesel and canola oil-diesel blends at high idling operations. *Applied Energy* 106: 198–208.
- Rubin, E. S.; Taylor, M. R.; Yeh, S.; Hounshell, D. A. 2004. Learning curves for environmental technology and their importance for climate policy analysis. *Energy* 29:1551–1559.
- Ruyck, J. D.; Jossart, J. M.; Palmers, G.; Lavric, D.; Bram, S.; Novak, A. *et al.* 2006. Project CP/53, Liquid biofuels in Belgium in a global bio-energy context. Belgium: *Belgian Science Policy*.
- Ryu, K. 2010. The characteristics of performance and exhaust emissions of a diesel engine using a biodiesel with antioxidants. *Bioresource Technology* 101: 78–82.

Santander, C. M. G.; Rueda, S. M. G. R.; da Silva, N. L.; de Camargo, C. L.; Theo, G.; Kieckbusch, T. G.; Maciel, M. R. W. 2012. Measurements of normal boiling points of fatty acid ethyl esters and triacylglycerols by thermogravimetric analysis. *Fuel* 92(1): 158–161.

Science Daily. 2009. Scientists Agree Human-induced Global Warming Is Real, Survey Says. University of Illinois at Chicago. <https://www.sciencedaily.com/releases/2009/01/090119210532.htm>. [Tikrinta 2018.09.12]

Sendzikiene, E.; Makareviciene, V.; Janulis, P. 2006. Influence of fuel oxygen content on diesel engine exhaust emissions. *Renewable Energy* 31: 2505–2512.

Senthur Prabu, S.; Asokan, M. A.; Prathiba, S.; Ahmed, S.; Puthan, G. 2018. Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesel engine. *Renewable Energy* 122: 196–205.

Shaheed, A.; Swain, E. 1999. Combustion analysis of coconut oil and its methyl esters in a diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 213: 417–425

Sharzali, C. M.; Idroas, M. Y.; Prathiba, S.; Hamid, M. F.; Zainal, Z. A. 2018. Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 808–823.

Shehata, M. S.; Razek, S. M. A. 2011. Experimental investigation of diesel engine performance and emission characteristics using jojoba/diesel blend and sunflower oil. *Fuel* 90: 886–897.

Sidibe, S. S.; Blin, J.; Vaitilingom, G.; Azoumah, Y. 2010. Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2748–2759.

Skorupskaitė, V.; Makarevičienė, V.; Levisauskas, D. 2015. Optimization of mixotrophic cultivation of microalgae *Chlorella* sp for biofuel production using response surface methodology. *Fuel Processing Technology* 150: 78–87.

Skorupskaitė, V.; Makarevičienė, V.; Gumbytė, M. 2016. Opportunities for simultaneous oil extraction and transesterification during biodiesel fuel production from microalgae: A review. *Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts* 7: 45–50.

Slade, R.; Bauen, A. 2013. Micro-algae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy* 53: 29–38.

Sonar, D.; Soni, S. L.; Sharma, D.; Srivastava, A.; Goyal, R. 2015. Performance and emission characteristics of a diesel engine with varying injection pressure and fuelled with raw mahua oil (preheated and blends) and mahua oil methyl ester. *Clean Technologies and Environmental Policy* 17: 1499–1511.

Statistical yearbook of Lithuania. 2018. Vilnius: Statistics Lithuania. 462 p.

Stenman, T. 2005. Sustainable Energy from Vegetable Oil. *BC Sustainable Energy Association*. <https://www.resilience.org/stories/2005-01-12/sustainable-energy-vegetable-oil/>. [Tikrinta 2018.09.26]

- Transportas ir ryšiai 2017. 2018. Vilnius: Lietuvos statistikos departamentas. 117 p.
- Troni, K. L.; Damaceno, D. S.; Ceriani, R. 2016. Improving a variation of the DSC technique for measuring the boiling points of pure compounds at low pressures. *The Journal of Chemical Thermodynamics* 100: 191–197.
- Tsaousis, P.; Wang, Y.; Roskilly, A. P.; Caldwell, G. S. 2014. Algae to energy: Engine performance using raw algal oil. *Energy Procedia* 61: 656–659.
- Uddin, S. M. A.; Azad, A. K.; Alam, M. M.; Ahamed, J. U. 2015. Performance of a diesel engine run with mustard-kerosene blends. *Procedia Engineering* 105: 698–704.
- Vaitilingom, G. Huiles végétales – Biocombustible diesel. Influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant: Université d'Orleans; 1992.
- Vaitilingom, G. 2006. Utilisation énergétique de l'huile de coton carburant des moteurs diesels. *Cahiers Agricultures* 15(1). doi:10.1016/j.agee.2006.09.006.
- Van Den Hende, S.; Vervaeren, H.; Boon, N. 2015. Flue gas compounds and microalgae: (Bio-)chemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology Advances* 30(6): 1405–1424.
- Vanhemelryck, J. L. 1997. Influences des propriétés du carburant dans les moteurs diesel à injection directe: application aux huiles végétales et leurs dérivés. UCL/FSA.
- Varatharajan, K.; Cheralathan, M. 2013. Effect of aromatic amine antioxidants on NO_x emissions from a soybean biodiesel powered DI diesel engine. *Fuel Process Technology* 106: 526–532.
- Varatharajan, K.; Cheralathan, M.; Velraj. 2011. Mitigation of NO_x emissions from a jatropha biodiesel fuelled DI diesel engine using antioxidant additives. *Fuel* 90: 2721–2725.
- Venkus, P.; Kostkevičienė, J.; Bendikienė, V. 2017. Green algae *Chlorella vulgaris* cultivation in municipal wastewater and biomass composition. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 25(1): 56–63.
- Versan Kok, M. V.; Topa, E. 2016. Combustion characteristics and kinetics of diesel and canola oil samples. *Energy Sources Part A* 38(7): 967–974.
- Wang, Y. D.; Al-Shemmeri, T.; Eames, P.; McMullan, J.; Hewitt, N.; Huang, Y.; *et al.* 2006. An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil. *Applied Thermal Engineering* 26: 1684–1691.
- Wang, X.; Cheung, C. S.; Di, Y.; Huang, Z. 2012. Diesel engine gaseous and particle emissions fueled with diesel–oxygenate blends. *Fuel* 94: 317–323.
- Wellinger, A. 2009. Algal biomass. Does it save the world?. *IEA Bioenergy*. <http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/AlgaeBiomass8-09.pdf>. [Tikrinta 2018.02.20]

- Yao, X.; Lau, N. T.; Chan, C. K.; Fang, M. 2005. The use of tunnel concentration profile data to determine the ratio of NO₂/NO_x directly emitted from vehicles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 5: 12723–12740.
- Yen, H. W.; Hu, I. C.; Chen, C. Y.; Chang, L. S. 2014. Design of photobioreactors for algal cultivation, In: Pandey A, Lee D–J, Chisti Y, Soccol CR (Eds.) *Biofuels from Algae*. Elsevier, Amsterdam. ISBN 9780444595584: 23–45.
- Yilmaz, N.; Morton, B. 2011. Effects of preheating vegetable oils on performance and emission characteristics of two diesel engines. *Biomass and Bioenergy* 35: 2028–2033.
- Yilmaz, N.; Vigil, F. M. 2014. Potential use of a blend of diesel, biodiesel, alcohols and vegetable oil in compression ignition engines. *Fuel* 124: 168–172.
- Yusaf, T. F.; Yousif, B. F.; Elawad, M. M. 2011. Crude palm oil fuel for diesel-engines: experimental and ANN simulation approaches. *Energy* 36: 4871–4878.
- Zander, V. H. 2010. Microalgae: predators of the greenhouse gas. *Spiegel*. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/mikroalgenfressfeinde-des-klimagases-a-688670.html>. [Tikrinta 2019.01.12]
- Zion market research. Global algae biofuel market will reach USD 9.88 billion by 2024. *Globe newswire*. New York. <https://www.zionmarketresearch.com/news/algae-biofuel-market>. [Tikrinta 2018.02.18]
- Žaglinskis, J. 2014. Dyzelinių variklių, dirbančių antros kartos biodegalų mišiniais, eksploatacinių charakteristikų tyrimai. *Daktaro disertacija*. Klaipėdos universitetas.
- Žemės ūkio informacijos ir kaimo verslo centro statistinė informacija. 2019. Traktorių, savaeigių ir žemės ūkio mašinų ir jų priekabų. Vilnius. <https://www.vic.lt/zutrs/traktoriai-reg/statistika/>.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Raslavičius, L.; Felneris, M.; Pukalskas, S.; Rimkus, A., Melaika, M. 2019. Evaluation of *P.moriformis* oil and its blends with diesel fuel as promising contributors to transportation energy, *Energy* 189: 116196. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116196>.

Raslavičius, L.; Striūgas, N.; Felneris, M.; Skvorčinskienė, R.; Miknius, L. 2018. Thermal characterization of *P.moriformis* oil and biodiesel, *Fuel* 220: 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.010>.

Raslavičius, L.; Striūgas, N.; Felneris, M. 2018. New insights into algae factories of the future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 643–654. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.024>.

Straipsniai kituose leidiniuose

Felneris, M.; Rimkus, A.; Pukalskas, S. 2019. Biodegalų iš mikrodumblių auginimo, perdirbimo ir panaudojimo technologijų apžvalga transporto sektoriuje. *Inžinerinės ir edukacinės technologijos mokslinių straipsnių žurnalas* 2019 (1): 169–176. ISSN 2029–9303

Felneris, M.; Raslavičius, L. 2016. Energy and carbon balance of algal biofuel, in *Proceedings of the 20th International Conference Transport Means* (5–7 October 2016, Juodkrantė, Lithuania). Kaunas: Technologija, 3: 815–819.

Felneris, M.; Raslavičius, L. 2016. Algal biodiesel in Lithuania: from promise to reality. *Proceedings of the 9th International Scientific Conference (Transbaltica 2015)*. Book Series: *Procedia Engineering* 134: 109–113

Raslavičius, L.; Felneris, M. 2018. Algae-based CO₂ capture in cold and humid climate countries. In: Castillo J (Ed.), *Bioenergy: Prospects, Applications and Future Directions*. New York: Nova Science Publishers: 43–67. ISBN: 978–1–53614–038–5.

Summary in English

Introduction

Formulation of the Problem

In 2009, scientists worldwide engaged in research on climate change unanimously concluded that human activity has a significant impact on ongoing global warming (Science-Daily 2009). Major sources of atmospheric pollution are industry, transport, agricultural, households waste and pollution from natural sources (Rubin *et al.* 2004). The search of alternative energy sources that will ensure sustainable development and the transition to 100% renewable energy sources is a challenge for both the energy and transport sectors (Juil *et al.* 2012).

It should be emphasized that transport plays a very important role in the socio-economic development of more than 195 countries worldwide (Bureau of Intelligence and Research 2012). Lithuania has no exception (Statistical Yearbook of Lithuania 2018). Depending on the biofuel production technology used in the motor transport sector are divided into first, second, third and fourth generation. In Lithuania as well as in the EU are well researched physico-chemical characteristics of the first- and second-generation biofuels, possibilities of application in ICE were investigated, advanced commercial production technologies are developed, the annual production potential of these products in any country is easily calculated and predictable. Third-generation biofuels, or biofuels derived from the processing of algae biomass, are currently of great interest to the scientific community and are considered as a viable raw material for a clean energy production. The use

of next-generation algae biomass is undoubtedly one of the possible ways to reduce the environmental impact of an ICE; especially in those areas where alternative solutions are not technologically advanced – aviation, navigation, etc. This requires not only extensive experimental research on internal combustion engines, but also the identification of technological and economic means. Merely if a complete package of measures is implemented, covering the cost-effectiveness of production, the dynamic and environmental characteristics of internal combustion engines and their impact on combustion process in the cylinder, a reasonable discussion could be made about these types of biofuel appearance on the market. The third generation heterotrophic microalgae species *P. moriformis* was selected to solve the problem, which has the advantage over other industrial algae species – the possibility to save large amounts of electricity in the energy balance per year. Finding the answers to scientific questions would create successful preconditions for producing biofuels from microalgae biomass in the country and their use in the transport sector.

Relevance of The Thesis

The relevance of the work, both nationally and globally, can be seen through the problems to be solved:

1. Nowday, the transport sector contributes the most to atmospheric pollution in Lithuania and accounts for one third of all GHG emissions in the country. Comparing GHG emissions from the agriculture, energy and transport sectors, the transport sector is the most problematic, with emissions rising by 12.2 % between 2005 (18.0%) and 2018 (30.2%).
2. Over the last ten years, only three regions of the world have succeeded in reducing CO₂ emissions (–16% in the EU, –8% in the US, –1% in Japan). In other countries, carbon dioxide growth has risen drastically (+44% in China, +76% in India, +51% in Saudi Arabia, +42% in Indonesia, etc.). Only radical changes – green transport, energy efficiency technologies and so on – could save to reduce CO₂. At the UN Conference on Climate Change (COP 25) in Madrid on 2019, the countries failed to agree on a single global market for CO₂, which encourages further efforts to find optimal solutions to mitigate climate change, including those related to transport.
3. Microalgae biomass-based fuels for transport are the most promising energy source in the world to meet future challenges, on the other hand the properties and applications of such fuel type in internal combustion engines have been poorly studied.
4. In Lithuania so far has not been evaluated the possibilities to grow microalgae biomass for biofuel production. The impact of microalgae oil on the internal combustion engine performance was not evaluated either.

The global market for biofuels made from algae biomass (consisting of biodiesel, aviation fuel, green diesel, etc.) for the transport and aviation sectors in 2017 was 4.1 billion Eur. and it is likely that by 2024 will grow by 8.6 % annually to 8.7 billion Eur. In

2017, European countries were world leaders in the production of biofuel from algae biomass (Zion market research 2018). While new production technologies are actively being developed, research into the use of microalgae oil in diesel engines solving scientific-technical uncertainties are still at an early stage and poses many challenges. One of them is the EU's ambition to become the first continent of neutral impact on climate by 2050.

Object of Research

Physico-chemical properties of pure microalgae oil and its blends with mineral diesel, characterization of combustion process in diesel engine cylinders and evaluation of suitability of these fuels for internal combustion engines.

The Aim of the Thesis

Substantiate the internal combustion engine efficiency and eco-efficiency of the use of microalgae biomass fuels.

The Tasks of the Thesis

To achieve the tasks of the thesis the following exercises must be solved:

1. For the fuel types experimentally investigate and characterize energy conversion, phase change and thermal decomposition during combustion and pyrolysis, determining the following characteristics: boiling point, ignition temperature, calculated cetane index, fatty acid composition and storage stability.
2. To perform numerical mathematical a comparative heat release analysis in the cylinder of microalgal oil and its mixtures with mineral diesel using AVL BOOST software package and based on laboratory test results.
3. Experimentally investigate the influence of microalgae oil and its blends with mineral diesel on load, adjustment and power output characteristics of the compression ignition engine at the different loads, start of fuel injection angles, active and inactive EGR. To verify the reliability of numerical mathematical analysis results with the results of experimental research.
4. Based on the experimental results, to propose the most effective adjustment characteristics for the performance of unmodified ICE with an application of microalgae oil and its blends with mineral diesel.

Research Methodology

Experimental research and numerical mathematical analysis are applied in this paper. Physico-chemical characteristics of fuels were determined using standard equipment at KTU and calorimetric analysis according to DIN 51900 for upper and lower calorific values. The fatty acid composition of microalgae oil was analyzed according to LST EN ISO 5508 and LST EN ISO 12966-2 methodologies, the acid number was determined using

LST EN 14104 standard. Thermal analysis of the investigated fuels was carried out using standard LST EN ISO 11358-2 and laboratory equipment available at the Lithuanian Energy Institute (part of Santaka Valley infrastructure). Performed the following research on selected modification diesel engine: numerical mathematical analysis of the biofuel combustion in the cylinder using AVL BOOST software package, determination of load and adjustment characteristics using VGTU bench laboratory equipment (diesel engine, sensors of cylinder pressure and exhaust gas temperature, exhaust gas analyzer, fuel consumption meter, exhaust gas recirculation valve, etc.) and research methodology, determination of engine power output characteristics using a diesel engine installed in a car of Vilnius College of Technology and Design.

Scientific Novelty

Contribution of this dissertation to the development of transport engineering science:

1. For the experimental assay a poorly researched microalgae *P.moriformis* oil specie was used and its effect on the energy and ecological parameters of a compression ignition engine was determined. For the period 2000 to 2017, only oils derived from the microalgae of *Chlorella protothecoides*, *Tetraselmis suecica* and *Botryococcus braunii* till now have been used to determine diesel engine characteristics.
2. A complex investigation of ICE load, adjustment and power output characteristics allowed to use microalgae oil as a substitute for fossil fuels in an unmodified engine.
3. Energy transformations, phase changes and term decomposition process of *P.moriformis* oil and biodiesel applied by using thermogravimetric analysis methods: differential scanning calorimetry and thermogravimetry has been developed.
4. Numerical mathematical analysis of microalgae oil combustion process in engine cylinders was performed using AVL BOOST software package.

Practical Value of the Research Findings

1. Based on the experimental research and numerical mathematical analysis results, the optimal start of fuel injection interval was determined for engine operation with *P.moriformis* biofuel, successfully enabling it to operate without major modifications nor changing the basic factory settings.
2. *P.moriformis* oil and its blends with mineral diesel can be successfully used in motor vehicles and successfully replace part of the fossil fuels in the overall energy balance of the transport sector. The new knowledge developed in this dissertation can be successfully used for further research into the implementation and application of microalgae oil and biodiesel in internal combustion engines.

3. The boiling and ignition temperatures as well as the Cetane Index of microalgae oil and biodiesel extracted from it were determined using thermal analysis experimental tests. These results can be applied for the further microalgae oil research.

The Defended Statements

1. The stability of microalgae oil and thermal degradation dynamics are determined by the oleic acid, which occupies most of the structure.
2. Start of fuel ignition is determined on the basis of a new method patented in 2016, where the Cetane Index is expressed as a function of density and TGA index, provides an accurate estimation of the Cetanic Index for microalgae oil, which is close to the results reported in scientific journals.
3. The microalgae oil injected into the cylinder has a similar ignition delay as diesel fuel.
4. Microalgae oil and its blends with diesel improve the net efficiency of a compression ignition engine compared to diesel fuel.
5. Microalgae oil can effectively improve the ecological parameters of a compression ignition engine: significantly reduce the amount of smoke absorption coefficient with almost no change of NO_x concentration in exhaust gases compared to mineral diesel.
6. Proposed microalgae specie can partially or completely replace diesel and its cultivation and processing into fuel is promising for the Lithuanian energy and transport sectors.

Approval of the Research Findings

7 scientific papers were published on the subject of the thesis: 3 – in publications of the *Clarivate Analytics Web of Science* with citation index; 2 – in other publications of international databases; 1 – in publications of other reviewable scientific publications; 1 – in the section of the book, reviewable scientific publications.

The described results of the research in the thesis were presented at four scientific conferences held in Lithuania and abroad:

- 9th international scientific conference *Transbaltica* 2015. Vilnius, Lithuania;
- 20th international scientific conference *Transport Means* 2016. Kaunas, Lithuania;
- 8th international scientific conference *Algal Biomass, Biofuel and Bioproducts* 2018. Seattle, USA;
- 9th international scientific conference *Algal Biomass, Biofuel and Bioproducts* 2019. Boulder, USA.

Structure of the Thesis

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, a list of literature, a list of the author's publications on the topic of the dissertation, and three appendices.

The thesis includes 152 pages, excluding annexes, 31 numbered formulas, 33 figures and 20 tables. 149 references were used in the preparation of the dissertation.

1. Feasibility Analysis of Microalgae Oil Application in Transport Engines

The chapter analyzes the assumptions and possibilities of the production and use of pure microalgae oil and its blends with mineral diesel in transport sector, based on statistical and scientific literature. Knowledge of the application of such biofuels in compression ignition engines is limited and only three auto-trophic algae biomass types have been characterized in a few scientific articles. It is one of the most promising raw materials for fuel production and should be successfully commercialized starting in 2025. Scientists in many parts of the world are unanimous in agreeing that today there is no consensus on what kind of microalgae and what biofuel production technology could be universal for most countries. To answer these questions, researchers are working intensively developing scenarios for countries in different climate zones to commercialize the bioeconomy of algae, which will successfully contribute in reduction of the negative impact of GHG, particularly in the transport sector. In this part of the dissertation, the country's transport sector is analyzed in detail, fuel consumption and pollutant emissions training in the long-term perspective is identified, and niche transport sectors are observed, which has not a specific solution on atmospheric pollution reduction and dependence on fossil fuels. The study continues with a review of ongoing FP1–FP7 and H2020 projects on the conversion of algal biomass to biofuels and their application in the transport sector, characterizing the obtained and failed research results. In the second part of literature review the use of vegetable oil in ICE is explained and compared to mineral diesel.

Vegetable oils as an alternative fuel can offer almost all the benefits of biodiesel: better lubricating properties of moving engine parts, safe storage abilities in high volume, less stringent safety requirements, similar performance to diesel fuel and significantly reduced atmospheric pollution by harmful compounds. However, vegetable oils application in ICE is not well researched, the emission characteristics are very similar to regular biodiesel: the absence of sulfur and its compounds, significantly reduced smoke, lower levels of unburned hydrocarbons and carbon monoxide, but a slight increase in nitrogen concentration of oxides during combustion process (Stenman 2005). The main advantage of a vehicle maintained with vegetable oil over other alternative fuels is that it can be called “Zero CO₂” (Table S.1.1).

The diesel engine was developed in the 19th century and fed with vegetable oils (Hebbal *et al.* 2006). Subsequently, oils as fuel were used in extreme conditions during the war and natural disasters (Vaitilingom *et al.* 1992). This type of fuel was revisited after the first oil crisis in the 70s.

Table S.1.1. Appraisal of energy demand for biodiesel production from different oil crops (Jacquot 2008).

Crops	Soy	Rape	Microalgae
GHG*	49	37	-183
Water consumption	High	High	average
Fertilizer consumption	Low-average	average	Low
Pesticides consumption	average	average	Low
Energy consumption	Low-average	Low-average	High
Technological readiness	Fully commercialized. Competing with food crops	Fully commercialized. Competing with food crops	Technology is still under the progress. There is potential for huge production volumes.

Remark: * – The level of CO₂ (kg) exposed during the production of one MJ of energy (cultivation, harvesting, processing and application in internal combustion engine were evaluated).

Unlike products from mineral oil, natural oils are CO₂ neutral, under natural conditions they degrade within 15–24 days, there is no risk on water pollution (zero class), non-toxic, very low risk during transportation. The following parameters were evaluated to determine the engine performance and emissions running on vegetable oil: engine load, crankshaft rotation, fuel blends homogeneity, fuel physico-chemical characteristics (viscosity, calorific value, cetane number), ambient conditions (temperature, pressure, humidity), fuel injection type, etc.

2. Methodology of Experimental Research and Results of Fuel Thermal Analysis

The following fuels were used during the research:

- a) Basic types of fuel: a) High purity microalgae *P.moriformis* oil (PMA100) purchased from USA according to ASTM D 6751; b) mineral diesel (D100), free from biofuel additives and meeting LST EN 590: 2014 standard (A Annex Fig. A.1). c) *P.moriformis* Fatty Acid Methyl Ester (PMME100), manufactured by KTU Faculty of Chemical Technology, Department of Organic Chemistry. PMME100 and its blends with PM100 and D100 were used only in thermogravimetric analysis.
- b) Fuel blends: a) Six type of fuel blends in ratios 30/70 and 70/30 by volume: PMA30/D70, PMME30/D70, PMA30/PMME70, PMA70/D30, PMME70/D30, PMA70/PMME30 for the bench testing of engine; b) One fuel mixture consisting of D100 and PMA100 in a ratio of 50/50 by volume (PMA50/D50) to determine car engine power output characteristics.

Thermal properties of D100, PMA100, PMME100 and their blends were analyzed using TGA and DSC methods. Thermal analysis of fuels was performed by using NETZSCH STA 449 F3 Jupiter analyzer with a SiC furnace. In this study, fuel samples

of 6 mg were placed in the sample–crucible in the TGA chamber along with a reference crucible. The sample was heated in 10 °C/min velocity until 900 °C temperature was reached. The research for D100, PMA100 and PMME100 was replicated at Nitrogen atmosphere with a constant heating rate of 5, 10, 15, 20 and 30°C/min by using TGA. Nitrogen gas flow rate of 60 ml/min was used as an inert atmosphere. Oxidizing environment consisted of compressed air flow rate of 25 ml/min and nitrogen TG furnace wash flow rate of 35 ml/min. The differential thermogravimetric (DTG) curves were obtained by numerical derivation of the TG curves.

Detailed thermal analysis of microalgae oil and its blends with diesel and biodiesel was performed using TGA and DSC methods. The boiling temperature of the fuel determined by the DSC method was more accurate than that determined by the TGA method. The maximum boiling point of 399.1 °C was determined for the PMA100 sample. Complete destruction of the D100 sample occurred at 280 °C, using PMME100 has reached 370 °C and 480 °C with PMA100. The results showed that PMA100 had the best thermal stability properties. It has been found that the Two Tangents Method (T_{iTL}) is more suitable for determining the ignition temperatures of biofuels than the Demarcation Point Method (T_{iA}). The highest fuel ignition temperature was determined of 370.1 °C for microalgae oil and 155.3 °C for diesel. The boiling and ignition temperatures of biofuel blends cannot be deducted in proportion to the values of the basic fuels due to their different physico-chemical properties and unequal mixing efficiency. It can be stated that adding the microalgae oil into diesel and biodiesel in ratios of 30% and 70% significantly increases the thermal stability of such combustible mixtures. Cetane Index values were calculated analytically using three different methods, the most accurate CCI₃ method was selected. The results showed a good agreement with the control CI values of diesel and biodiesel found in the literature. Using CCI₃ method calculated CI values 100% fulfilled the reference values of microalgae biodiesel and had a small error of –2.2% for diesel. The difference between the values of the CI of microalgae oil and microalgae biodiesel was 8%, which shows a good correlation with literature review.

Comprehensive research on ICE was performed using three methodologies: 1 – bench testing of the diesel engine at constant 2000 rpm, at three different loads (low, medium and high) using four types of fuels (D100, PMA100, PMA30/D70, PMA70/D30); 1 – bench testing of ICE at constant 2000 rpm, when the time of start of fuel injection angle was changed from 16 CAD before TDC to 4 CAD after TDC, using D100, PMA100, PMA30/D70 and PMA70/D30; 3 – Determination of engine power output characteristics: torque (M_e) and power (P_e) operating on D100 and PMA50/D50 fuels.

During the bench testing of the engine, it was running with activated and deactivated EGR and 15 engine operating parameters were determined, including three energy indicators (hourly and brake fuel consumption, net efficiency); 5 ecological indicators (smoke absorption coefficient, NO_x, CH, CO₂ and noise levels) and seven other indicators (O₂, air mass flow rate, turbocharged pressure, cylinder pressure, exhaust temperature and excess air ratio). Indicators were determined from 7 repeated engine tests. The start of fuel injection timing angle from –16 CAD to + 4 CAD to top dead center was changed every two degrees, with deactivated EGR. The test results were determined from 5 repeats. Method

3 investigates the external power output characteristics of the engine by gradually increasing the engine speed to 4400 rpm. Torque and power values of the engine were determined, from data, repeated 3 times.

3. Theoretical and Experimental Engine Test Results

A numerical mathematical model of a compression ignition engine was applied to the analysis of experimental results using the AVL BOOST software package. Five different parameters: variation of in-cylinder pressure and its rise rate, in-cylinder temperature and its rise rate, mass fraction burnt and in-cylinder heat release rate on the angle of rotation of the crankshaft under low load of ICE were determined (Fig. S.3.1). Those parameters have provided knowledge of ongoing thermochemical processes, which have been listed three phases of the combustion process: premixed combustion, rate-controlled combustion and late combustion phases, assessing the importance of ignition delay before the beginning of premixed combustion phase. The new scientific knowledge about thermochemical processes and pressure changes in the cylinder during combustion processes of microalgal oil have been created. Numerical analysis of the combustion process allowed to substantiate the experimentally determined engine parameters.

The difference between the PMA100 and D100 thermochemical values during the ignition delay period was up to 4.0%, and the pressure rise in the cylinder was less than 0.2%. During premixed combustion and rate-controlled combustion phases, the difference between thermochemical values of PMA100 and D100 was less than 4.0%. Fuel and their blends used during the combustion process analysis arranged in the following order by their numerical pressure, temperature, heat release and fuel mass burned values, which had similar tendencies for all investigated parameters: PMA100 > PMA70/D30 > PMA30/D70 > D100.

Experimental investigation of ICE using microalgae oil and its blends with mineral diesel. The energy and ecological characteristics comparative research of a compression ignition engine using D100, PMA30/D70, PMA70/D30 and PMA100 were determined varying engine load characteristics with inactive EGR:

1) At low load regime: The use of PMA100 and its blends with D100 have increased the brake-specific fuel consumption (b_e) by 3.3–12.9% (Fig. S.3.2 a); net efficiency of an engine (η_e) increased by 3.5–12.0% (Fig. S.3.2 c); NO_x raised by 0.9–3.4% (Fig. S.3.3 c); CH raised by 9.4–25.0% (Fig. S.3.3 e); CO₂ increased by 2.9–9.1% (Fig. S.3.4 a); smoke absorption coefficient increased by 17.4–29.1% (Fig. S.3.3 a) and the noise produced in the engine has almost not been changed (Fig. S.3.4 c) compared to the engine running on diesel.

2) At medium load regime: The use of PMA100 and its blends with D100 have increased b_e by 4.1–17.4% (Fig. S.3.2 a); η_e increased by 2.6–7.8% (Fig. S.3.2 c); NO_x raised by 2.0–4.3% (Fig. S.3.3 c); CH raised by 9.5–14.3% (Fig. S.3.3 e); CO₂ increased by 2.4–7.8% (Fig. S.3.4 a); smoke absorption coefficient increased by 25.5–37.8% (Fig. S.3.3 a) and the noise produced in the engine has been almost unchanged (Fig. S.3.3 j) compared to the engine running on diesel.

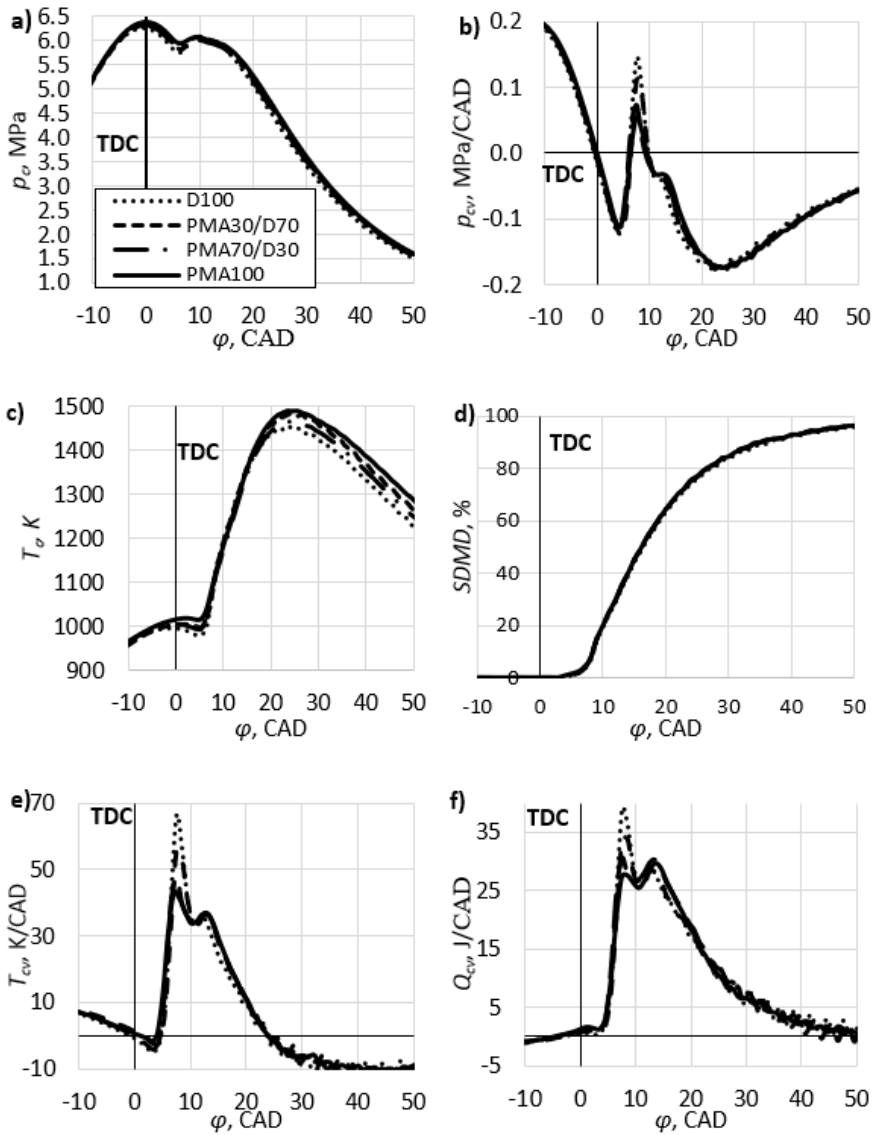


Fig. S.3.1. The dependence of the parameters as a function of φ when $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $p_e = 0,397 \text{ MPa}$, $\varphi_{ip} = 2 \text{ CAD}$ before TDC is determined in the engine cylinder: a) pressure in the cylinder; b) pressure rise rate in-cylinder; c) temperature in the cylinder; d) mass fraction burnt; e) temperature rise rate in-cylinder; f) heat release rate in-cylinder.

3) At high load regime: The use of PMA100 and its blends with D100 have increased b_e by 6.0–16.5% (Fig. S.3.2 a); η_e increased by 0.6–8.7% (Fig. S.3.2 c); NO_x raised by 2.5–4.8% (Fig. S.3.3 c); CH raised by 5.9–11.8% (Fig. S.3.3 e); CO_2 increased by 2.8–7.2% (Fig. S.3.4 a); smoke absorption coefficient increased by 20.6–41.1% (Fig. S.3.3 a) and the noise produced in the engine has been almost unchanged (Fig. S.3.4 c) compared to the engine running on diesel.

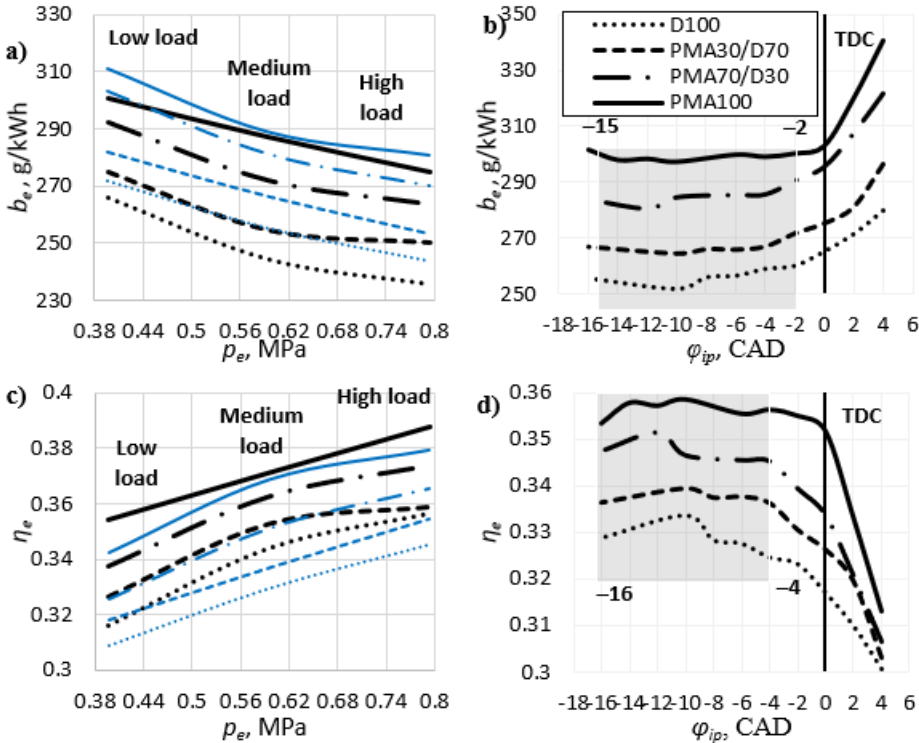


Fig. S.3.2. Variation of energy performance of ICE with microalgae oil and its blends: a) brake specific fuel consumption (b_e) against brake mean effective pressure (p_e); b) b_e against fuel injection angle (ϕ_{ip}); c) net efficiency (η_e) against p_e ; d) η_e against ϕ_{ip} ; when $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, black curves marks when EGR was deactivated and blue curves when EGR was activated.

Comparative studies of energy and ecological parameters of a compression ignition engine running on microalgae oil and its blends with diesel and have been made while the engine load characteristics were changed in the presence of active EGR.

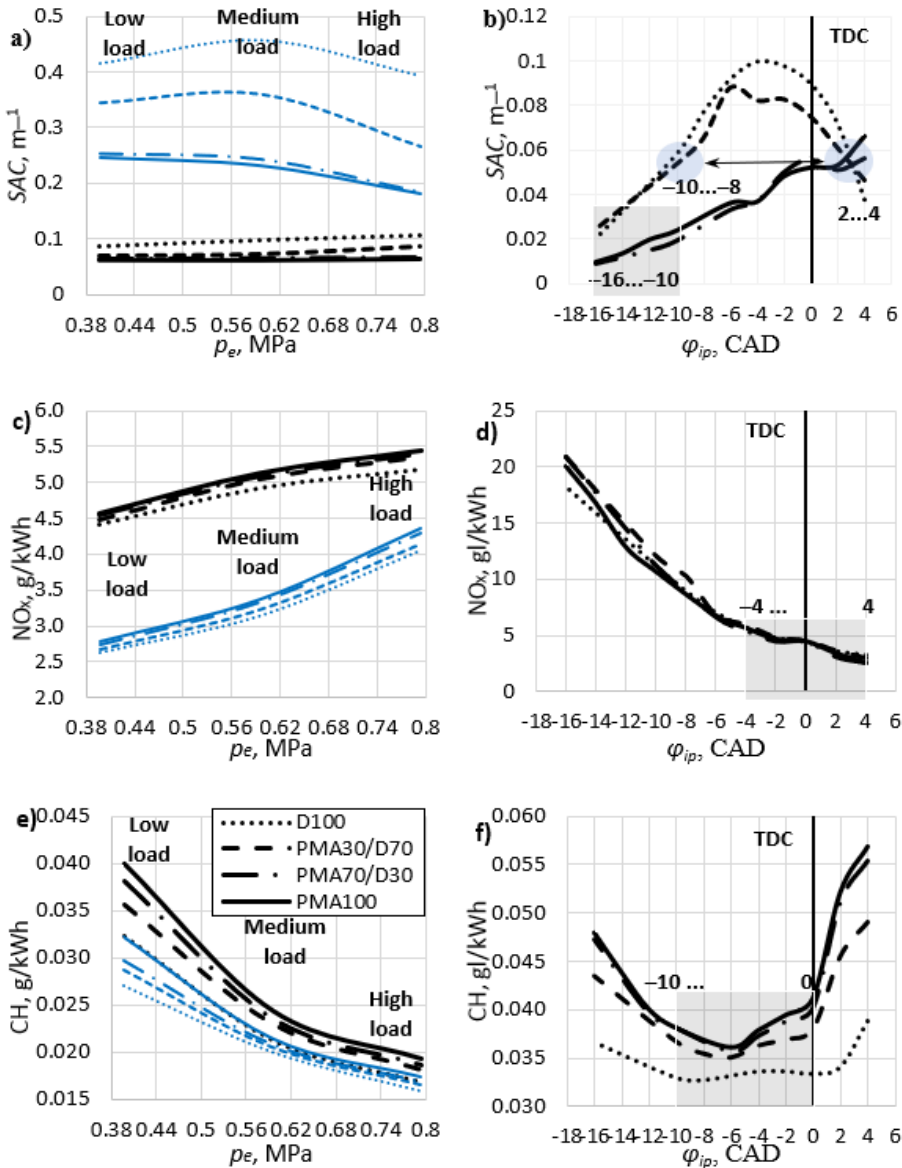


Fig. S.3.3. Variation of environmental performance of ICE with microalgae oil and its blends: a) smoke absorption coefficient (SAC) against brake mean effective pressure (p_e); b) SAC against fuel injection angle (φ_{ip}); c) Nitrogen dioxide (NO_x) against p_e ; d) NO_x against φ_{ip} ; e) hydrocarbons (CH) against p_e ; f) CH against φ_{ip} ; against p_e ; k) engine noise against φ_{ip} ; when $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves)

When ICE used PMA100 and its blends with D100 b_e have increased by 3.3–12.9% (at low load), 4.3–13.1% (at medium load), 3.9–15.2% (at high load) (Fig. S.3.2 a blue curves); η_e increased by 3.5–12.0% (low load), 7.0–11.8% (medium load), 4.1–9.9% (high load) (Fig. S.3.2 c blue curves); NO_x increased by 0.9–3.4% (low load), 2.0–4.3% (medium load), 1.5–7.9% (high load) (see Fig. S.3.3 c blue curves); CH increased by 9.4–25.0% (low load), 2.0–4.3% (medium load), 0.0–6.3% (high load) (Fig. S.3.3 e blue curves); CO_2 increased by 2.9–9.1% (low load), 2.6–6.0% (medium load), 1.8–6.3% (high load) (Fig. S.3.4 a blue curves); SAC decreased by 17.4–29.1% (low load), 21.6–49.5% (medium load), 32.3–54.2% (high load) (Fig. S.3.3 a blue curves), and the noise level almost unchanged compared to diesel (Fig. S.3.4 c blue curves).

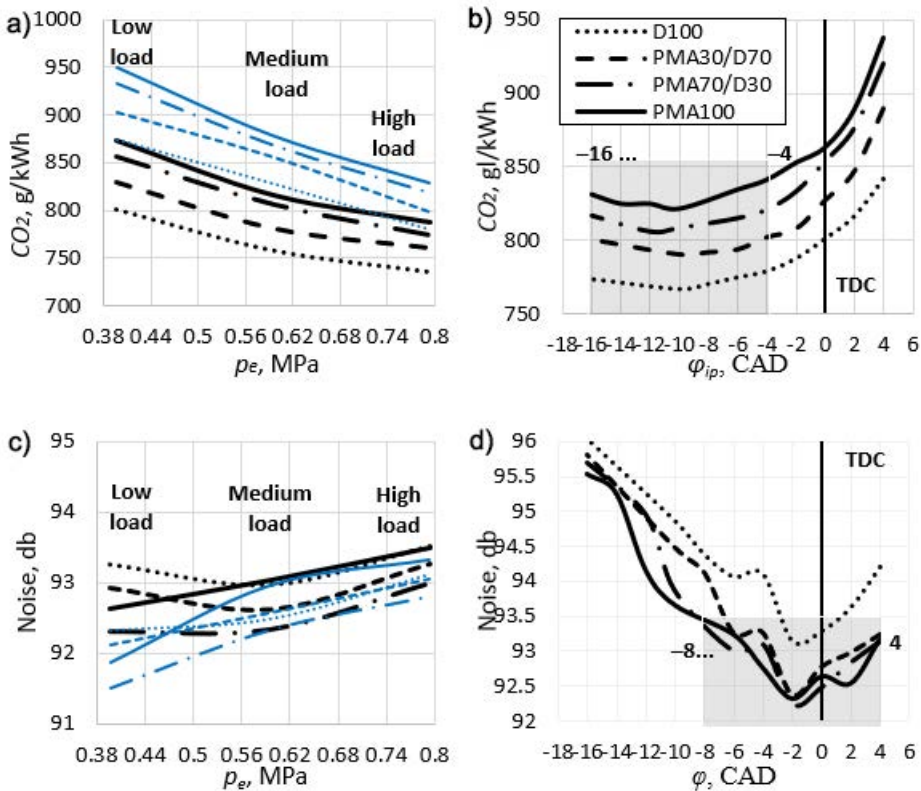


Fig. S.3.4. Variation of environmental performance of ICE with microalgae oil and its blends: a) carbon dioxide (CO_2) against p_e ; b) CO_2 against ϕ_{ip} ; c) engine noise against p_e ; d) engine noise against ϕ_{ip} ; when $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, when EGR was deactivated (black curves) and EGR was activated (blue curves)

The engine was running on microalgal oil and its blends during the research without any modification made, completely on factory settings. To improve energy and ecological parameters of a compression ignition engine the fuel injection angle was advanced and retarded in search of the best fuel injection angle that the ICE will work most appropriate. The optimum fuel injection angles were determined only at engine low load regime, when EGR was deactivated: b_e in the range of -15 CAD to -2 CAD before TDC (Fig. S.3.2 b); η_e when fuel was injected in the range of -16 CAD to -4 CAD before TDC (Fig. S.3.2 d); NO_x optimal start of fuel injection angle from -4 CAD before TDC to $+4$ CAD after TDC (Fig. S.3.3 d); CH in the range of -10 CAD before TDC until TDC was reached (Fig. S.3.3 f); CO_2 in the range of -16 to -4 CAD before TDC (Fig. S.3.4 b); SAC has the optimum fuel injection angle in the range of -16 to -10 CAD before TDC (Fig. S.3.3 b) and the engine noise level optimal start of fuel injection angle was set from -8 CAD before TDC to $+4$ CAD after TDC (Fig. S.3.4 d).

The ICE was examined on dyno bench CARTEC LPS 2510 for determination of the engine torque and power output characteristics. The ICE was not modified, the fuel pump and fuel injectors were not changed or adjusted. Results have shown that when the ICE was running on PMA50/D50 a slightly better torque and power characteristics were received compared to the engine running on diesel results (see Fig. S.3.5).

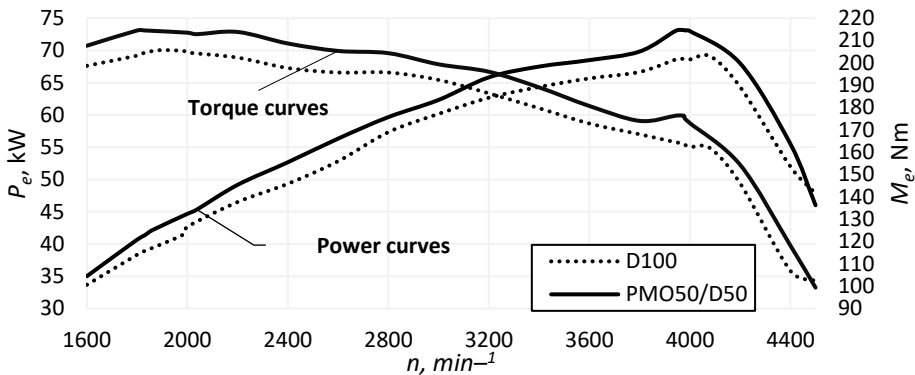


Fig. S.3.5. The engine torque M_e and power P_e output dependence on the crank rotation speed n

During the bench tests it was determined that ICE working with microalgae oil and its blends had higher engine net efficiency compared to diesel as well as fuel consumption was increased due to the lower calorific value of PMA100. After evaluating these elements, it was found that microalgae oil characterized by 1.05% better ratio against D100, therefore torque and power values have been slightly increased over diesel. It can be stated that when the engine was running on a microalgae oil blend with diesel, the torque and power parameters did not deteriorate compared to diesel.

General Conclusions

1. During the thermal analysis research, it was found that the application of differential scanning calorimetry method allowed to achieve more accurate results of boiling point and ignition temperatures for the microalgae oil and its blends with diesel than using thermogravimetric analysis method. Pure microalgae oil is characterized by the best thermal stability and the highest boiling point. Fuel ignition temperature results were obtained sufficiently accurate when Two Tangents Method was applied, and the highest ignition temperature was determined for microalgal oil. Cetane index was calculated using three different methods and based on the smallest error, CCI₃ method was assumed as the most suitable for Cetane index determination of selected fuels. It can be stated that the CCI₃ is a universal method suitable for the Cetane Index calculation of fuels with various nature.
2. Analysis of the pressure in the cylinder and its rate of change, the temperature in the cylinder and its rate of change, the mass of fuel fraction burned, and the rate of heat release in the cylinder using the AVL BOOST software package with tested fuel blends. The highest values of these parameters were determined for the engine running on microalgae oil and tended to decrease with an increasing amount of diesel in the fuel blend. The duration of the induction period, kinetic, diffuse and final combustion phases and their durations were determined from the heat release graphs. The duration of the ignition delay, premixed combustion, mixing-controlled combustion and late combustion phases were determined from the heat release graphs.
3. The influence of microalgae oil and its blends with mineral diesel on the compression ignition engine load with activated and deactivated EGR was experimentally investigated. It has been found that when ICE is running on microalgal oil and its blends with diesel, the engine net efficiency has been increased by up to 12.0% and smoke absorption coefficient has been reduced by up to 54.2%, noise levels generated in the engine have remained virtually unchanged, while NO_x and CO₂ have slightly increased compared to diesel.
4. Experimental investigations of the adjustment characteristic under the engine load of 0.397 MPa allowed to determine the effective fuel injection angle without modifying the ICE to operate it smoothly and efficiently using microalgae oil and its blends with diesel. For the energy parameters of the engine, the smooth start of the fuel injection angle from 15 CAD to 4 CAD before TDC have been set. To determine the effective fuel injection angle range for the environmental parameters is more difficult due to the different characteristic properties that determine the size of the ecological properties, but it can be stated that the effective fuel injection range is from 10 CAD to 4 CAD before TDC.
5. Investigation of physico-chemical characteristics of microalgae oil and its blends with mineral diesel, better thermal stability results and higher Cetane

index were obtained compared to diesel. Analyzing the main changes in the energy and ecological parameters of the engine and performing the analysis of the combustion process in the cylinder. It is possible to create technical-economic preconditions for the production of such biofuels in the country, which could be potentially applied in various transport sectors.

Priedai³

A priedas. Tyrimams naudotų degalų sudėtis mineralinio dyzelino kokybės pažymėjimas

B priedas. Techninės ir ekonominės prielaidos rentabiliam *P.moriformis* biomasės auginimui ir perdirbimui

C priedas. Cetaninio indekso apskaičiavimas

D priedas. Bendradarbiavimas su Federico Santa Maria technikos universiteto profesoriais tolimesniam biodegalų iš mikrodumblių tematikos plėtrai Čilės Respublikoje

E priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

F priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

G priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Mantas FELNERIS

MIKRODUMBLIŲ ALIEJUMI VEIKIANČIO DYZELINIO
VARIKLIO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (T 003)

INVESTIGATION ON THE CHARACTERISTICS OF DIESEL
ENGINE RUNNING ON MICROALGAL OIL

DOCTORAL DISSERTATION

Technological Sciences,
Transport Engineering (T 003)

2020 05 21. 14 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius