



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Dovydas Mačiulis

**DEGIMO PROCESO ANALIZĖ SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIUI
VEIKIANT ĮVAIRIAIS BIODEGALŲ MIŠINIAIS IR KEIČIANT EGR**

**COMBUSTION PROCESS ANALYSIS OF COMPRESSION IGNITION
ENGINE RUNNING ON VARIOUS BIOFUEL BLENDS AND CHANGING EGR**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Dovydas Mačiulis

**DEGIMO PROCESO ANALIZĖ SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIUI
VEIKIANT ĮVAIRIAIS BIODEGALŲ MIŠINIAIS IR KEIČIANT EGR**

**COMBUSTION PROCESS ANALYSIS OF COMPRESSION IGNITION
ENGINE RUNNING ON VARIOUS BIOFUEL BLENDS AND CHANGING EGR**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. doc. Alfredas Rimkus

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

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė

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

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
AUTOMOBILIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Automobilių transporto inžinerijos specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Saugirdas Pukalskas

(Vardas, pavardė)

2022-01-09

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2022-01-09 Nr. 01

Vilnius

Studentui (ei)

Dovydui Mačiuliui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Degimo proceso analizė slėginio uždegimo varikliui veikiant įvairiais biodegalų mišiniais ir keičiant EGR patvirtinta dekanu is.vgtu.lt.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2023 m. gegužės mėn. 12 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

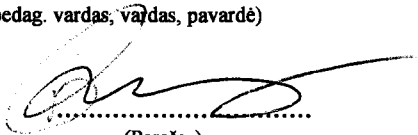
1. Naudojant mokslinę literatūrą atlikti slėginio uždegimo variklio degimo proceso bei energetinių ir ekologinių rodiklių pokyčio, veikiant įvairiais biodegalų mišiniais ir keičiant EGR, apžvalgą. Formuluoti tyrimo problemą, tikslą, sprendimo būdus.
2. Parengti eksperimentinių tyrimų metodiką ir atlikti slėginio uždegimo rodiklių standinius tyrimus keičiant išmetamųjų dujų recirkuliacijos intensyvumą.
3. Atlikti slėginio uždegimo variklio degimo proceso rodiklių skaitinį modeliavimą (eksperimentinių tyrimų analizę ir sintezę), optimizuojant išmetamųjų dujų recirkuliacijos intensyvumą varikliui veikiant įvairiais biodegalų mišiniais.
4. Apibendrinti atliktus eksperimentinius ir teorinius tyrimus ir pateikti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....

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

Vadovas

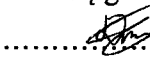


(Parašas)

dr. doc. Alfredas Rimkus

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

Užduotį gavau


.....
(Parašas)

Dovydas Mačiulis

(Vardas, pavardė)

2022-01-12

(Data)

<table><tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr><tr><td>Transporto inžinerijos fakultetas</td></tr><tr><td>Automobilių inžinerijos katedra</td></tr></table>	Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Transporto inžinerijos fakultetas	Automobilių inžinerijos katedra	<table><tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr><tr><td>Egz. sk.</td><td></td></tr><tr><td>Data-.....-.....</td><td></td></tr></table>	ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas										
Transporto inžinerijos fakultetas										
Automobilių inžinerijos katedra										
ISBN	ISSN									
Egz. sk.										
Data-.....-.....										
Antrosios pakopos studijų Transporto inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas										
Pavadinimas	Degimo proceso analizė slėginio uždegimo varikliui veikiant įvairiais biodegalų mišiniais ir keičiant EGR									
Autorius	Dovydas Mačiulis									
Vadovas	Alfredas Rimkus									
	Kalba: lietuvių									
Anotacija										
Baigiamajame magistro darbe analizuojamas vidaus degimo variklio veikimas, naudojant įvairius hidrinto augalinio aliejaus (angl. Hydrotreated Vegetable Oils - HVO) ir biobutanolio mišinius. Papildomai tiriamas išmetamųjų dujų recirkuliacijos (angl. Exhaust Gas Recirculation - EGR) poveikis nevisiško degimo produktų (CO, CH), azoto oksidų (NOx), šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO2) ir dūmingumo emisijai. Atlikta mokslinių straipsnių apžvalga. Sudaryta eksperimentinio tyrimo metodika, pateiktos tyrimo metu naudotos įrangos charakteristikos, naudotų degalų mišinių savybės, skaitinio modeliavimo metodika. Atlikti eksperimentiniai tyrimai naudojant įvairius biodegalų mišinius ir keičiant išmetamųjų dujų recirkuliacijos intensyvumą. Remiantis eksperimentiniais rezultatais, naudojant programos AVL BOOST paprogramę „Burn“, atlikta degimo proceso skaitinė analizė, matematinio modelio validavimas. Nustatyti degimo rodiklių skirtumai ir tikėtinos priežastys, leidžiančios geriau suprasti degimo metu vykstančius procesus, kai variklis veikia įvairiais degalais ir keičiamas EGR intensyvumas. Skaitiniu simulavimu ištirti variklio rodikliai naudojant degalų mišinį su didesne biobutanolio koncentracija. Tai leidžia parinkti tinkamiausią degalų mišinį ir EGR intensyvumą, siekiant geriausių variklio ekologinių ir energetinių rodiklių. Darbą sudaro 4 dalys: įvadas, literatūros šaltinių apžvalga, tyrimo metodikos ir medžiagų skyrius, eksperimentiniai tyrimo rezultatai ir jų analizė, degimo proceso matematinis modeliavimas, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis - 52 p. teksto be priedų, 36 iliustracijos, 5 lentelės, 23 informaciniai šaltiniai. Atskirai pridedami 2 darbo priedai ir dvi publikacijos, bei konferencijos dalyvio pažymėjimas.										
Prasminiai žodžiai: slėginis uždegimo variklis, degimo vėlavimo fazė, kinetinė degimo fazė, difuzinė degimo fazė, hidrintas augalinis aliejus, biobutanolis, iškastinis dyzelinas, išmetamųjų dujų recirkuliacija.										

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Transport Engineering</td></tr> <tr><td>Department of Automobile Engineering</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Transport Engineering	Department of Automobile Engineering	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Transport Engineering																			
Department of Automobile Engineering																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date-.....-.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Combustion process analysis of compression ignition engine running on various biofuel blends and changing EGR</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Dovydas Mačiulis</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Alfredas Rimkus</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Combustion process analysis of compression ignition engine running on various biofuel blends and changing EGR			Author	Dovydas Mačiulis			Academic supervisor	Alfredas Rimkus		
Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Combustion process analysis of compression ignition engine running on various biofuel blends and changing EGR																		
Author	Dovydas Mačiulis																		
Academic supervisor	Alfredas Rimkus																		
			<table border="1"> <tr> <td>Thesis language: Lithuanian</td> </tr> </table>	Thesis language: Lithuanian															
Thesis language: Lithuanian																			
<table border="1"> <tr> <td> Annotation The final master's thesis analyzes the performance of an internal combustion engine using various mixtures of hydrogenated vegetable oil and biobutanol. Additionally, the effect of exhaust gas recirculation on the emission of incomplete combustion products (CO, CH), nitrogen oxides (NOx), greenhouse gases (CO2) and smokiness is investigated. A review of scientific articles carried out. The experimental research methodology was compiled, the characteristics of the equipment used during the research, the properties of used fuel mixtures, and the numerical modeling methodology were presented. Experimental studies were carried out using various biofuel mixtures and changing the intensity of exhaust gas recirculation. Based on the experimental results, numerical analysis of the combustion process and validation of the mathematical model were performed using the "Burn" subroutine of the AVL BOOST program. To determine the differences in the combustion indicators and the probable causes allow a better understanding of the processes taking place during the combustion when the engine runs on different fuels and the intensity of EGR is changed. Numerical simulations were used to study engine performance using a fuel mixture with a higher concentration of biobutanol. This allows selecting the most appropriate fuel mixture and EGR intensity to achieve the best ecological and energy performance of the engine. Structure: introduction, review of literature sources, research methodology and materials department, experimental research results and their analysis, mathematical modeling ustion process, conclusions, references. Thesis consist of: 52 p. text without appendixes, 36 pictures, 5 tables, 23 records. 2 work appendices and two publications, as well as a conference participant certificate, are attached separately. </td> </tr> </table>				Annotation The final master's thesis analyzes the performance of an internal combustion engine using various mixtures of hydrogenated vegetable oil and biobutanol. Additionally, the effect of exhaust gas recirculation on the emission of incomplete combustion products (CO, CH), nitrogen oxides (NOx), greenhouse gases (CO2) and smokiness is investigated. A review of scientific articles carried out. The experimental research methodology was compiled, the characteristics of the equipment used during the research, the properties of used fuel mixtures, and the numerical modeling methodology were presented. Experimental studies were carried out using various biofuel mixtures and changing the intensity of exhaust gas recirculation. Based on the experimental results, numerical analysis of the combustion process and validation of the mathematical model were performed using the "Burn" subroutine of the AVL BOOST program. To determine the differences in the combustion indicators and the probable causes allow a better understanding of the processes taking place during the combustion when the engine runs on different fuels and the intensity of EGR is changed. Numerical simulations were used to study engine performance using a fuel mixture with a higher concentration of biobutanol. This allows selecting the most appropriate fuel mixture and EGR intensity to achieve the best ecological and energy performance of the engine. Structure: introduction, review of literature sources, research methodology and materials department, experimental research results and their analysis, mathematical modeling ustion process, conclusions, references. Thesis consist of: 52 p. text without appendixes, 36 pictures, 5 tables, 23 records. 2 work appendices and two publications, as well as a conference participant certificate, are attached separately.															
Annotation The final master's thesis analyzes the performance of an internal combustion engine using various mixtures of hydrogenated vegetable oil and biobutanol. Additionally, the effect of exhaust gas recirculation on the emission of incomplete combustion products (CO, CH), nitrogen oxides (NOx), greenhouse gases (CO2) and smokiness is investigated. A review of scientific articles carried out. The experimental research methodology was compiled, the characteristics of the equipment used during the research, the properties of used fuel mixtures, and the numerical modeling methodology were presented. Experimental studies were carried out using various biofuel mixtures and changing the intensity of exhaust gas recirculation. Based on the experimental results, numerical analysis of the combustion process and validation of the mathematical model were performed using the "Burn" subroutine of the AVL BOOST program. To determine the differences in the combustion indicators and the probable causes allow a better understanding of the processes taking place during the combustion when the engine runs on different fuels and the intensity of EGR is changed. Numerical simulations were used to study engine performance using a fuel mixture with a higher concentration of biobutanol. This allows selecting the most appropriate fuel mixture and EGR intensity to achieve the best ecological and energy performance of the engine. Structure: introduction, review of literature sources, research methodology and materials department, experimental research results and their analysis, mathematical modeling ustion process, conclusions, references. Thesis consist of: 52 p. text without appendixes, 36 pictures, 5 tables, 23 records. 2 work appendices and two publications, as well as a conference participant certificate, are attached separately.																			
<table border="1"> <tr> <td> Keywords: compression ignition engine, ignition delay period, premixed combustion phase, mixing – controlled combustion phase, hydrotreated vegetable oils, biobutanol, fossil diesel, exhaust gas recirculation. </td> </tr> </table>				Keywords: compression ignition engine, ignition delay period, premixed combustion phase, mixing – controlled combustion phase, hydrotreated vegetable oils, biobutanol, fossil diesel, exhaust gas recirculation.															
Keywords: compression ignition engine, ignition delay period, premixed combustion phase, mixing – controlled combustion phase, hydrotreated vegetable oils, biobutanol, fossil diesel, exhaust gas recirculation.																			

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS	10
ĮVADAS	11
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA	12
1.1. Atsinaujinantys biodegalai, naudojami slėginio uždegimo varikliuose	12
1.2. Degimo procesas slėginio uždegimo variklyje	12
1.3. HVO (hidrinto augalinio aliejaus) naudojimo slėginio uždegimo variklyje analizė	14
1.4. Butanolio, kaip slėginio uždegimo variklio degalų priedo, naudojimas	17
1.5. Išmetamųjų dujų recirkuliacijos (EGR) įtaka degimo procesui ir variklio rodikliams	21
2. TYRIMŲ METODIKA IR MEDŽIAGOS	31
2.1 Tyrimo planavimas	31
2.2 Tyrimo įranga	32
2.3 Tiriamieji degalai	34
2.4 Skaitinio modeliavimo metodika	35
3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ	37
4. DEGIMO PROCESO MATEMATINIS MODELIAVIMAS	45
4.1 Degimo proceso skaitinė analizė	45
4.2 Degimo proceso skaitinio modelio validavimas ir skaitinis tyrimas didinat biobutanolio koncentraciją	48
IŠVADOS	50
LITERATŪROS SĄRAŠAS	51
PRIEDAI	53

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Dizelinio variklio šilumos išsiskyrimo intensyvumą identifikuojantis skirtingus degimo procesus.....	13
1.2 pav. Vidutinis gryno bei mišinio (85 %) „Neste“ atsinaujinančio biodyzelino (HVO) poveikis išmetamųjų teršalų kiekiui EURO II – EURO VI transporto priemonėse, palyginti su besieriais EN 590 standarto dyzeliniais degalais.....	14
1.3 pav. Šilumos išsiskyrimo cilindre intensyvumas, priklausomai nuo degalų sudėties.....	15
1.4 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas cilindre, priklausomai nuo alkūninio veleno pasisukimo °.....	16
1.5 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo butanolio kiekio hidrintame augaliniame aliejuje.....	18
1.6 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo degalų sudėties.....	19
1.7 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo butanolio kiekio rapsų metilo esteryje.....	20
1.8 pav. Vidinės aukšto slėgio EGR sistemos.....	21
1.9 pav. Išorinės žemo slėgio EGR sistemos.....	22
1.10 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo EGR.....	23
1.11 pav. Azoto oksidų (NO _x) emisijų priklausomybė nuo variklio apkrovos.....	23
1.12 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo variklio apkrovos.....	24
1.13 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, (D100) lyginant su (F100) ir jų mišiniais.....	25
1.14 pav. Azoto oksido (NO _x) emisijų priklausomybė nuo degalų sudėties ir variklio apkrovos.....	26
1.15 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo degalų sudėties ir variklio apkrovos.....	27
1.16 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas esant skirtingiems EGR rodikliams.....	28
1.17 pav. NO _x ir suodžių emisija esant skirtingiems EGR dydžiams.....	28
2.18 pav. Bandymo planavimo eiga.....	31
2.19 pav. Bandymo schemas.....	33
2.20 pav. Tiriamųjų degalų ir jų mišinių tūrio dalis 1 litre.....	35
3.21 pav. Valandinių degalų masės sąnaudų priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	37
3.22 pav. Lyginamųjų degalų sąnaudų priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	38
3.23 pav. Valandinių degalų tūrio sąnaudų priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	38
3.24 pav. Išmetamųjų dujų temperatūros priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	39
3.25 pav. Efektyviojo naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	40
3.26 pav. Apskaičiuoto oro pertekliaus koeficiento priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	40
3.27 pav. Anglies monoksido išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	41
3.28 pav. Angliavandenilių kiekio išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	42
3.29 pav. Azoto oksidų kiekio išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	43
3.30 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	43

3.31 pav.	Anglies dioksido išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos.....	44
4.32 pav.	Slėgio priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV.....	45
4.33 pav.	Slėgio augimo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV.....	46
4.34 pav.	Temperatūros augimo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV.....	47
4.35 pav.	Šilumos išsiskyrimo intensyvumo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV.....	47
4.36 pav.	Skaitinio tyrimo būdu nustatyta ekologinių rodiklių priklausomybė nuo biobutanolio koncentracijos mišinyje su HVO.....	49

LENTELIŲ SĄRAŠAS

A1 lentelė. Gryno dyzelino, HVO, biobutanolio savybės.....	A priedas
B1 lentelė. Degimo proceso analizės rodikliai.....	B priedas
2.1 lentelė. Variklio 1,9 TDI (1Z) pagrindiniai techniniai duomenys.....	33
2.2 lentelė. Bandymo metu naudojama įranga ir jos tikslumas.....	34
2.3 lentelė. Naudotų degalų ir jų mišinių savybės.....	35

SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS

AV – alkūninis velenas;

CO – anglies monoksido koncentracija, ppm;

CO₂ – anglies dioksido emisija, g/kWh;

D100 – grynas iškastinis dyzelinas;

EGR – išmetamųjų dujų recirkuliacija (angl. *Exhaust Gas Recirculation*);

ES – Europos Sąjunga;

FSN – filtro dūmingumo skaičius (angl. *Filter Smoke Number*);

CH – angliavandeniliai, g/kWh;

H₂ – vandenilis;

HVO – hidrintas augalinis aliejus (angl. *Hydrotreated Vegetable Oils*);

HVO100 – grynas hidrintas augalinis aliejus;

LHV – žemutinis degalų šilumingumas (angl. *Lower Heating Value*);

M_{st} – stabdymo momentas, Nm;

NO_x – azoto oksidų emisija, g/kWh;

O₂ – deguonis;

p_e – vidutinis efektyvusis slėgis, MPa;

RME – rapsų metilo esteris;

TDI – tiesioginis įpurškimas su turbokompresoriumi;

VGT – viršutinis galinis taškas.

IVADAS

Nuo 19 a., kada buvo išrastas vidaus degimo variklis, iki šių dienų, transporto priemonių skaičius pasaulyje išaugo milijonus kartų. Dėl to padidėjo žmonių mobilumas, bet atsirado daug problemų: triukšmas, transporto spūstys, eismo įvykiai bei žuvusių žmonių keliuose skaičiaus didėjimas. Opiausia problema yra ta, kad automobilių išmetamųjų dujų ir kietųjų dalelių kiekis tiesiogiai kenkia žmonių sveikatai, sukelia šiltnamio efektą, todėl klimatas pasaulyje šiltėja.

Valstybių vadovai, aktyviai raginami visuomenės 2020 m. gruodžio mėn. Briuselyje patvirtino įsipareigojimą vykdyti ES Žaliąjį kursą, kuris reikalauja, kad iki 2030 m. grynasis ES viduje išmetamo šiltnamio efektą sukeliančiųjų dujų kiekis būtų sumažintas bent 55 % palyginti su 1990 metais. Šiuo laikotarpiu transporto sektoriaus išmetamųjų teršalų kiekis sudaro daugiau, kaip 25 % visos taršos (Europos aplinkos agentūra, s.a.).

Mokslininkai daug dirba tobulindami degalų sudėtį, taip mažindami taršą. Pradedama degalus gaminti iš atsinaujinančių žaliavų. Eksperimentai lėmė įvairių rūšių biodegalų atsiradimą: (bioetanoliai, hidrintas augalinis aliejus, ir biodujos).

Degimo procesą mokslininkai tobulina siekdami išgauti efektyvų variklio darbą mažiausiomis degalų sąnaudomis, pritaikę EGR technologiją, kuri ypač mažina NO_x emisiją. Labai svarbu, kad degimo proceso tinkamu metu išsiskirtų pakankamai energijos.

Tyrimo problema. Taršos mažinimas ir variklio veikimo efektyvumo didinimas.

Tyrimo tikslas. Išanalizuoti biodegalų savybių ir EGR įtaką degimo procesui, norint išsiaiškinti, kokios sudėties biodyzelino (HVO) ir biobutanolio mišinys yra mažiau taršus ir energetiškai efektyvus, lyginant su iškastiniu dyzelinu, reguliuojant deginių recirkuliaciją.

Darbo tyrimų objektas. Darbo objektas yra slėginio uždegimo variklio degimo procesas, energetiniai ir ekologiniai rodikliai.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti slėginio uždegimo variklio degimo proceso, naudojant įvairius biodegalus, mokslinių straipsnių apžvalgą.
2. Sudaryti tyrimo metodiką ir aprašyti tyrimams reikalingą įrangą.
3. Atlikti ekologinių rodiklių (dūmingumo, NO_x, CO, CO₂, CH) ir energetinių rodiklių (sukimo momento, degalų sąnaudų, išmetamųjų dujų temperatūros) matavimus, naudojant skirtingų rūšių biodegalų ir jų mišinius, bei keičiant EGR dydžius.
4. Atlikti slėginio uždegimo variklio degimo proceso rodiklių (šilumos išsiskyrimo, slėgio ir temperatūros) skaitinę analizę, tiriant atliktų bandymų rezultatus bei skaitinį modeliavimą, praplečiant eksperimentinį tyrimą.
5. Apibendrinti eksperimento metu gautus rezultatus ir pateikti darbo išvadas.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgiami įvairūs atsinaujinantys biodegalai, išmetamųjų dujų recirculiacijos sistema, jų įtaka degimo procesui ir ekologiniams rodikliams.

1.1. Atsinaujinantys biodegalai, naudojami slėginio uždegimo varikliuose

Europos Sąjungos transporto sektoriuje išmetamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis sudaro apie 25 % viso išmetamojo dujų kiekio. Šis kiekis vis labiau auga, dėl to ES 2019 metų gruodį priėmė Europos žaliąjį kursą, kuris nurodo iki 2030 metų 55 % sumažinti automobilių išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį. O iki 2050 metų išmetamą šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį transporto sektoriuje sumažinti 90 % (Europos žaliasis kursas, 2021).

Dėl šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimo, mokslininkai ieško būdų, kaip įprastus, didelę taršą sukeliančius degalus pakeisti į mažiau kenksmingus aplinkai. Todėl į dyzeliną pradėta maišyti biopriedai, kurie mažina NO_x emisijos išsiskyrimą į atmosferą.

Į iškastinį dyzeliną maišoma iš atsinaujinančių šaltinių gaunami priedai, kaip augalinis aliejus, perdirbtos gyvulinės kilmės riebalų atliekos. Tada degalai tampa draugiškesni aplinkai, nes išskiria mažiau šiltnamio efektą sukeliančių CO₂ dujų. CO₂ iš variklio gali išsiskirti ir ne mažiau, vertinant gyvavimo ciklą (Puricelli et al., 2021).

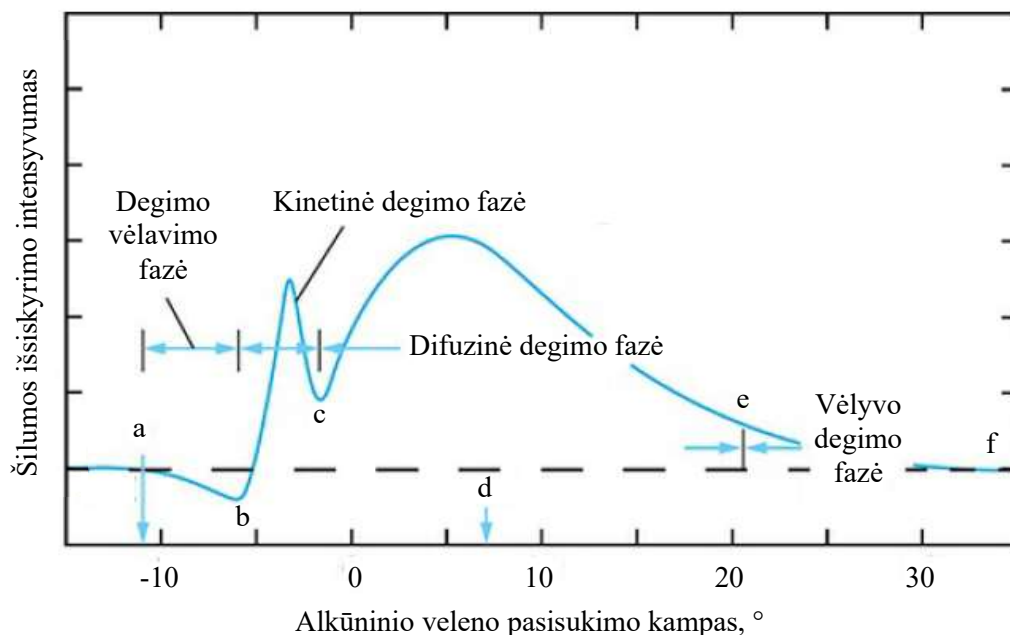
Biodegalai pagal atsiradimo eigą ir rūšį skirstomi į skirtingas kartas:

- Pirmos kartos biodegalai gaminami iš maistinių ir pašarinių energetinių augalų (kukurūzų, palmių aliejaus, rapsų metilo esterio). Šios kartos biodegalams naudojamos medžiagos kertasi su maisto grandine, o tai gali sukelti maisto pabrangimą (Puricelli et al., 2021).
- Antros kartos biodegalai gaminami iš nemaistinių ir pašarinių energetinių augalų (šiaudų, medienos atliekų, durpių, gyvulinės kilmės atliekų). Išgavimo procesai sudėtingi, reikalaujantys didelių lėšų, todėl pagaminamas nepakankamas kiekis (Puricelli et al., 2021).
- Trečios kartos biodegalai gaunami iš dumblių (mikrodumblių, melsvadumblių), ir iš aukštesniųjų alkoholių (Puricelli et al., 2021).
- Ketvirtosios kartos biodegalai yra naujiena biodegalų pramonėje. Jie išgaunami iš genetiškai modifikuotų mikroorganizmų (Puricelli et al., 2021).

1.2. Degimo procesas slėginio uždegimo variklyje

Nuo degimo proceso priklauso variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai. Degimo procesai slėginio ir kibirkštinio uždegimo varikliuose turi skirtumus: degimas kibirkštinio uždegimo variklyje vyksta sklindant liepsnos frontui nuo uždegimo žvakės, o slėginio uždegimo

variklyje atskirai dega kiekvienas į degimo kamerą įpurkštų degalų lašelį. Toliau pateikiamas tipinio šilumos išsiskyrimo intensyvumo grafikas (1.1 pav.) slėginio uždegimo variklyje.



1.1 pav. Dyzelinio variklio šilumos išsiskyrimo intensyvumą identifikuojantis skirtingi degimo procesai, jų sudedamosios dalys: a – degalų įpurškimo pradžia (Į. pr.); b – degimo pradžia (Deg. pr.); c – kinetinės degimo fazės pabaiga; d – degalų įpurškimo pabaiga (Į. pab.); e – difuzinės degimo fazės pabaiga; f – degimo pabaiga (sudaryta pagal Heywood, 2018)

Degimo vėlavimo fazė (angl. *Ignition delay period*) – laikotarpis nuo degalų įpurškimo pradžios (Į. pr.) iki kol degalai užsidega (Deg. pr.). Esant ilgesnei degimo vėlavimo fazei susikaupia daug degalų, kuriems užsidegus intensyviau auga kinetinės degimo fazės metu slėgis ir temperatūra (Heywood, 2018).

Kinetinė degimo fazė (angl. *Premixed combustion phase*) – čia cheminė energija išsiskiria iš degalų, kurie susimaišę su oru per degimo vėlavimo laikotarpį greitai išskiria šilumą per keletą alkūninio veleno pasisukimo laipsnių. Degalų ir oro mišinys, degdamas šioje fazėje, lemia didelį šilumos išsiskyrimo intensyvumą. Šios fazės metu, esant dideliui slėgiui ir temperatūrai, auga azoto oksidų emisija (Heywood, 2018).

Difuzinė degimo fazė (angl. *Mixing – controlled combustion phase*) – kai degalai ir oras sudega iš anksto sumaišyti degimo vėlavimo fazėje, jie išskiria dalį savo cheminės energijos. Tada degimo greitis (arba šilumos išsiskyrimo greitis) yra kontroliuojamas pagal greitį, kuriuo degalai įpurškiami ir mišinys yra deginamas. Tai vyksta vykstant atskiriems procesams: degalų įpurškimas, garinimas, degalų garų maišymas su oru. Susimaišęs mišinys įpurškimo metu, bei jo degimo greitis šioje dyzelino degimo difuzinės liepsnos fazėje yra daugiausiai kontroliuojamas

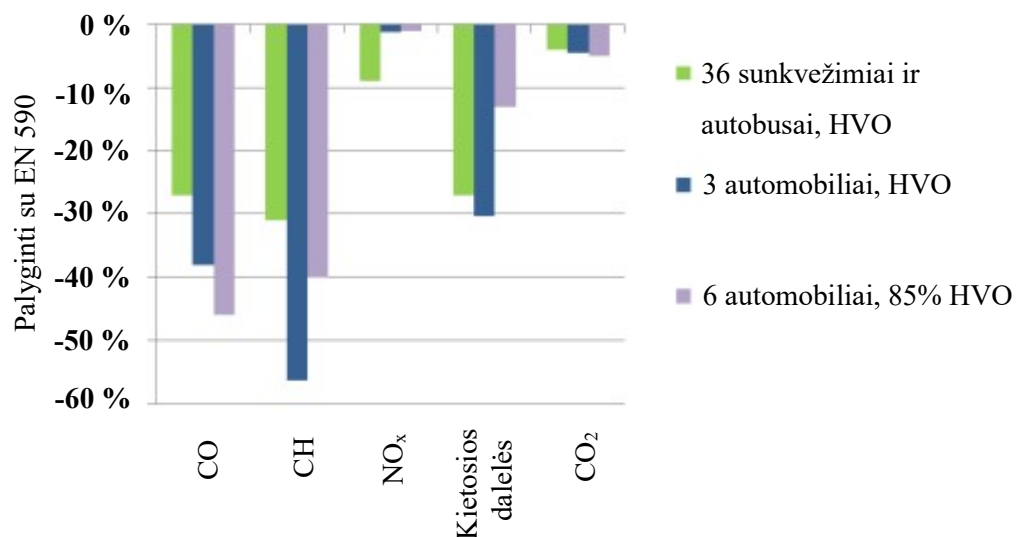
degalų garų ir oro maišymosi procesų. Esant didelei temperatūrai šioje fazėje yra geriau išdeginami suodžiai susidarę degimo metu (Heywood, 2018).

Vėlyvo degimo fazė (angl. *Late combustion phase*) – šiluma išsiskiria mažesniu intensyvumu ir mažėja degimo slėgio banga. Šios fazės metu nedidelė dalis degalų dar yra nesudegusi, dalies degalų energija yra suodžiuose ir degimo produktuose, todėl jie gali užsiliepsnoti. Cilindre esantis slėgis yra banguojantis, ir per šį laikotarpį sudegusios dujos maišosi su oru, skatina visapusiškesnį degimą ir mažiau išsiskiria taršių išmetamųjų dujų. Degimas proceso pabaigoje tampa lėtesnis, nes išsiplėtimo takto metu cilindre krinta dujų temperatūra. Ilgai užsitęsęs šiai fazei, sukaupta energija tiesiog išmetama pro vožtuvus bei perduodama į cilindrų sieneles, taip išekvojant įpurkštus degalus veltui, nesukuriant sukimo momento (Heywood, 2018).

1.3. HVO (hidrinto augalinio aliejaus) naudojimo slėginio uždegimo variklyje analizė

Degalai, pagaminti iš hidrinto augalinio aliejaus (angl. *Hydrotreated Vegetable Oils*) gaunami apdorojant vandeniliu ir izomerizuojant žaliavą, kuri pagaminta iš atliekų, t. y. žuvų, gyvulinės kilmės riebalų. Naudojant iš atsinaujinančių žaliavų pagamintus degalus, išsiskiria mažesnis CO₂ kiekis. Tai parafinis junginys, o aromatinių junginių trūkumas yra priežastis, dėl kurių sumažėja išmetamųjų kietųjų dalelių kiekis, bei sumažėja NO_x emisija (Parravicini et al., 2021).

Hartikka et al. (2012) atliktame tyrime, kuriame buvo ištirtos skirtingo tipo transporto priemonės naudojančios atsinaujinantį HVO biodyzeliną, buvo gauti rezultatai (1.2 pav.), kurie yra palyginti su iškastiniu dyzelinu, atitinkančiu EN 590 standartą.

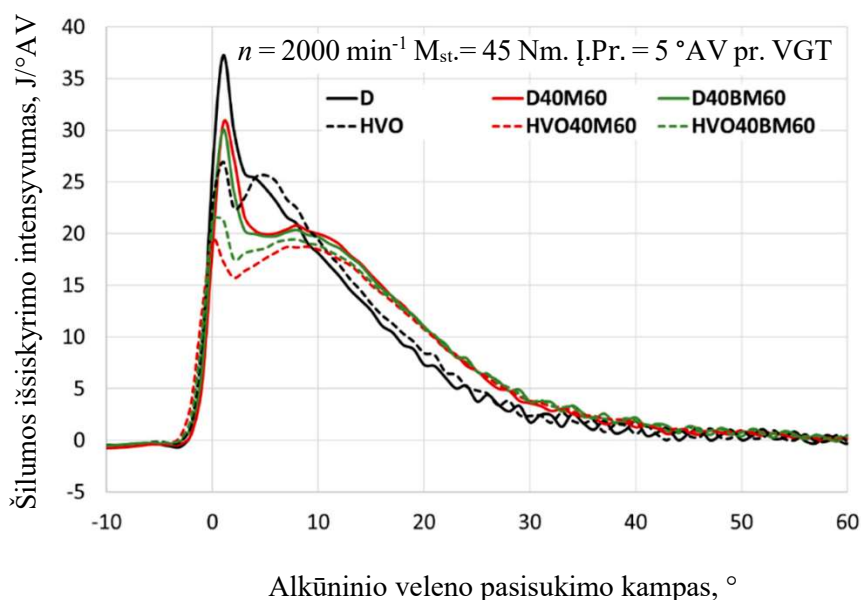


1.2 pav. Vidutinis gryno bei mišinio (85 %) „Neste“ atsinaujinančio biodyzelino (HVO) poveikis išmetamųjų teršalų kiekiui EURO II – EURO VI transporto priemonėse, palyginti su besieriais EN 590 standarto dyzeliniais degalais (sudaryta pagal Hartikka et al., 2012)

Iš gautų tyrimo rezultatų matyti (1.2 pav.), kad HVO mažina į aplinką išskiriamų kenksmingų medžiagų kiekį. Maždaug 60 % sumažėjo nesudegę angliavandeniliai lengvuosiuose automobiliuose, naudojant gryną HVO. Kitas žymus anglies monoksido sumažėjimas pastebimas automobiliuose, kurie naudojo 85 % HVO mišinį. Beveik 30 % sumažėjo kietųjų dalelių kiekis, išmetamas į aplinką, automobiliuose naudojant gryną HVO. Transporto priemonės, naudojusios HVO, 5–6 % mažiau išmetė į aplinką CO₂ (Hartikka et al., 2012).

HVO yra brangesnis už biodyzeliną, tačiau yra stabilesnis, bei turi didesnę savaiminio užsiliepsnojimo skaičių, todėl jis tinkamas naudoti atšiauresnio klimato sąlygomis (Puricelli et al., 2021).

Rimkus et al. (2020) atliktas tyrimas su tiesioginio įpurškimo 1,9 TDI dyzeliniu varikliu, panaudojant iškastinį dyzeliną su skirtingos sudėties degalais, gamtinėmis dujomis ir HVO, parodė, kad didesnis HVO cetaninis skaičius turi reikšmingą poveikį degimo procesui.

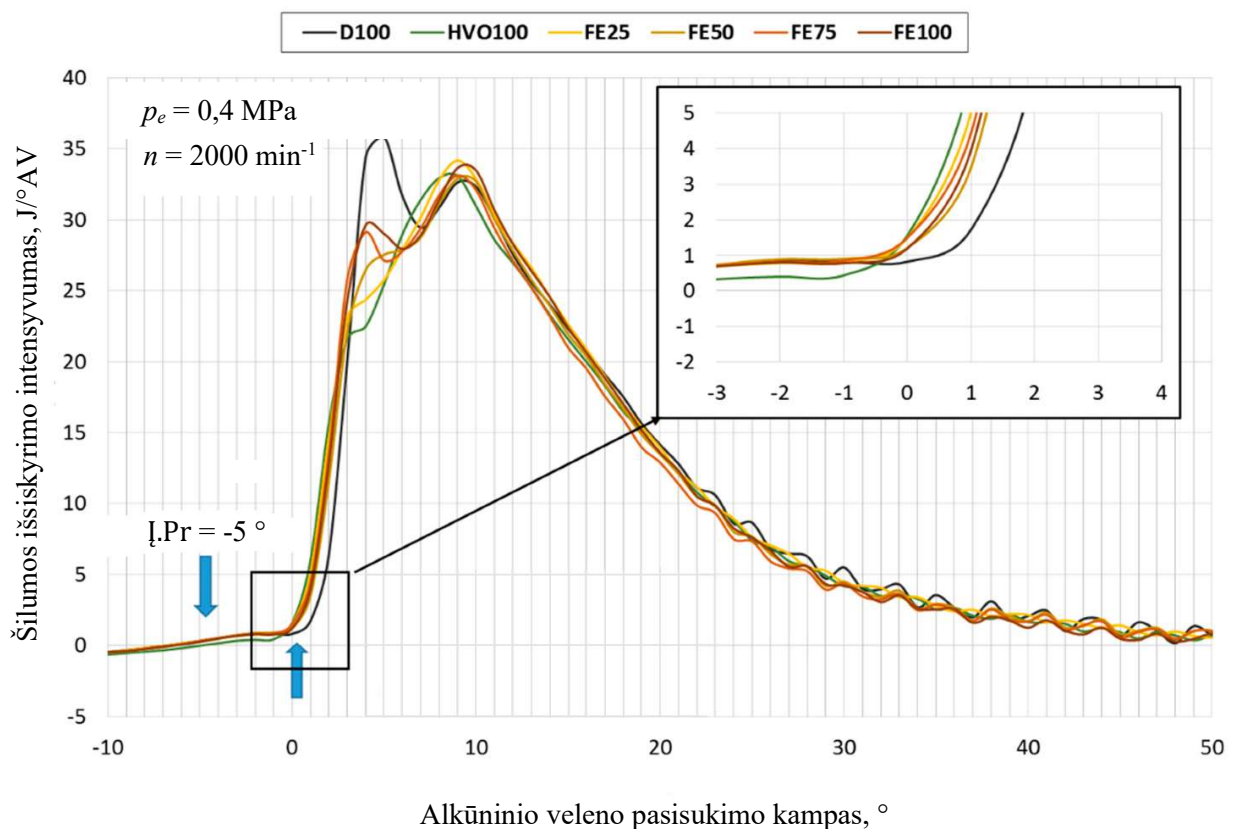


1.3 pav. Šilumos išsiskyrimo cilindre intensyvumas, priklausomai nuo degalų sudėties (sudaryta pagal Rimkus et al., 2020)

Iš grafiko (1.3 pav.), kuriame pateikti bandymo rezultatai, pastebima, kad esant vienodam degalų įpurškimo laikui (angl. *Start of injection SOI*) skirtingų naudojamų degalų degimo vėlavimo fazė yra panaši, bet šiek tiek anksčiau užsidega HVO40M60 degalų mišinys. Degalų degimo pradžioje (angl. *Start of combustion SOC*), lyginant su iškastiniu dyzelinu (D100), HVO turi didesnę šilumos išsiskyrimo greitį. Dyzelino degimo pradžia įvyksta esant 2° prieš VGT, o HVO degimo pradžia vyksta esant 3° prieš VGT. Tačiau kinetinėje degimo fazėje, HVO šilumos išsiskyrimo greitis sumažėja pasiekęs 27 J/°AV, nes šie biodegalai turi didesnę cetaninę skaičių ir taip sutrumpina užsidegimo uždelsimo fazę, o šilumos išsiskyrimas iš anksto sumaišytame etape

mažėja (Rimkus et al., 2020). O dyzelinas išskiria ganėtinai didesnę šilumos greitį $37 \text{ J/}^\circ\text{AV}$. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo skirtumas tarp HVO ir D100 yra $10 \text{ J/}^\circ\text{AV}$. Aukštas šilumos išsiskyrimo greitis lemia didesnę azoto oksidų išsiskyrimą į aplinką naudojant dyzeliną. HVO difuzinėje degimo fazėje šilumos išsiskyrimo greitis sumažėja iki $23 \text{ J/}^\circ\text{AV}$. Toliau difuzinės fazės metu HVO šilumos išsiskyrimo greitis pakyla iki $26 \text{ J/}^\circ\text{AV}$, taip padėdamas išdeginti susidariusius suodžius degimo metu. Vėliau HVO šilumos išsiskyrimo greitis tolygiai mažėja vėlyvo degimo fazės link. Dyzelinas difuzinės degimo fazės pradžioje išskiria nežymiai daugiau šilumos, negu toje pačioje fazėje išskyrė HVO. Tačiau, kaip ir HVO, taip ir dyzelinas, difuzinėje degimo fazėje palaipsniui užteršia kietųjų dalelių filtrus suodžiais. Abiejų degalų reikšmės apylygiai susilygina vėlyvo degimo fazėje. HVO paskutinėje degimo fazėje yra stabilesnis lyginant su iškastiniu dyzelinu (Rimkus et al., 2020).

Shepel et al. (2021) atliktame tyrime, naudojant hidrintą augalinį aliejų, riebalų rūgščių esterius ir iškastinį dyzeliną 1,9 darbinio tūrio tiesioginio įpurškimo variklyje, nustatė, kad HVO mažesnis klampumas nei dyzelino, jis intensyviau išgaruoja, geriau susimaišo su aplinkos oru. Šios savybės sudaro palankias sąlygas mažesniai išmetamųjų teršalų kiekiui susidarymui degimo proceso metu (Shepel et al., 2021).



1.4 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas cilindre, priklausomai nuo alkūninio veleno pasisukimo $^\circ$
(sudaryta pagal Shepel et al., 2021)

Iš grafike pateiktų eksperimento rezultatų (1.4 pav.), atliktų su 0,4 MPa. variklio apkrova ir esant variklio sūkiams 2000 min^{-1} , galime pastebėti, kad iškastinio dyzelino gaišties fazė yra ilgesnė už HVO $1,1^\circ \text{AV}$ intervalu. Gaišties fazės metu susikaupia didesnis įpurškėtų degalų kiekis, dėl kurio kinetinėje degimo fazėje dyzelino šilumos išsiskyrimo greitis padidėja iki $36 \text{ J}/^\circ\text{AV}$, taip sudarydamas didelius azoto oksidų kiekius. O šilumos išsiskyrimo greitis HVO kinetinėje degimo fazėje siekia $23 \text{ J}/^\circ\text{AV}$, ir tolygiai kildamas pereina į difuzinę degimo fazę pasiekdamas $33 \text{ J}/^\circ\text{AV}$. Joje HVO šilumos išsiskyrimo greitis ir trukmė nežymiai pralenkia iškastinį dyzeliną taip geriau išdegindamas susidariusius suodžius degimo metu. Vėlyvo degimo fazėje HVO šilumos išsiskyrimo greitis (angl. *Rate of heat release*) mažėja tolygiau už iškastinį dyzeliną (Shepel et al., 2021).

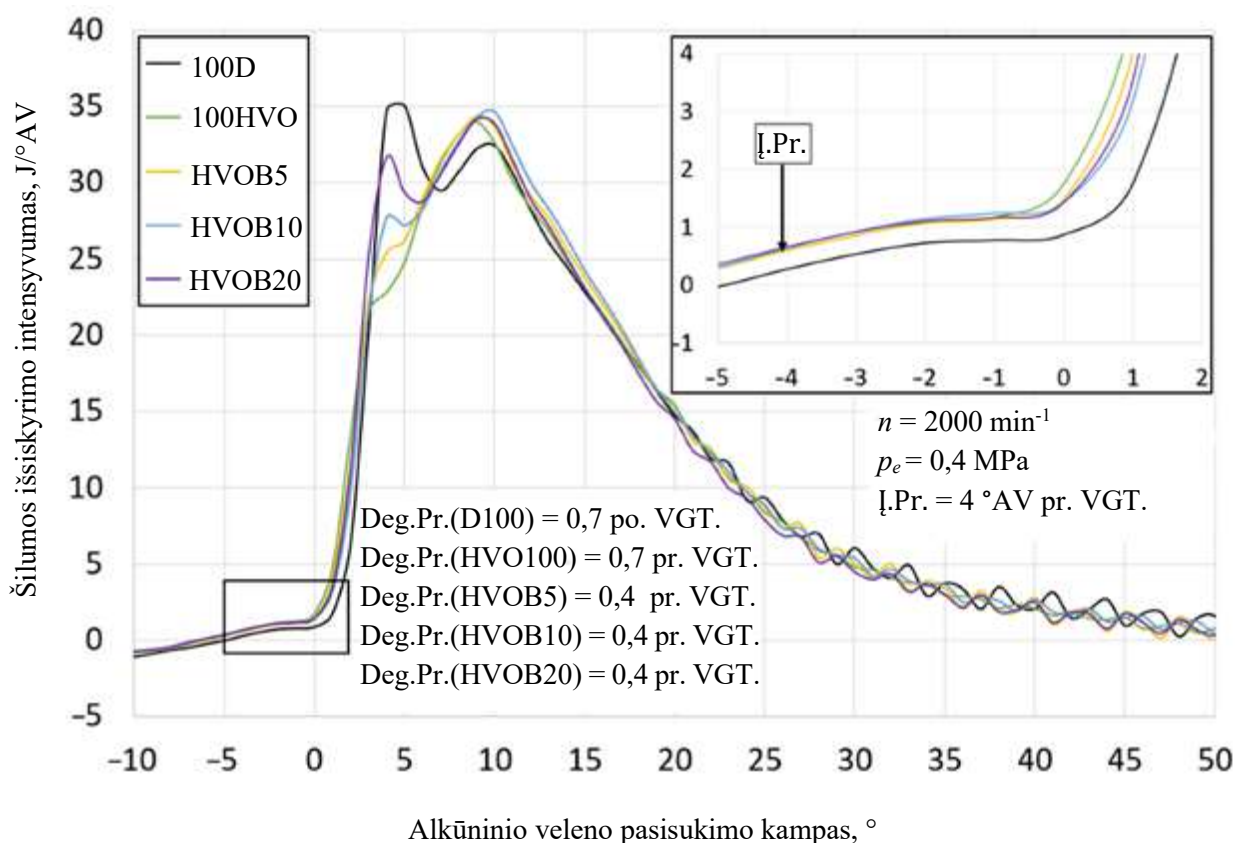
Apibendrinus galima teigti, kad HVO yra tinkamas naudoti slėginio uždegimo varikliuose, nes turi didesnę cetaninę skaičių, kuris sutrumpina užsiliepsnojimo gaišties fazę, dega tolygiau, išskiria mažiau azoto oksidų ir kitų teršalų, pasižymi geresnėmis degalų tarpusavyje maišymosi savybėmis lyginant su iškastiniu dyzelinu.

1.4. Butanolio, kaip slėginio uždegimo variklio degalų priedo, naudojimas

Aukštesnieji alkoholiai, tokie kaip butanolis, yra viena iš alternatyvaus degalų priedo rūšių, gaunamų biologiškai fermentuojant biomasę: miežius, šiaudus, cukranendres (Trindade et al., 2017). Šio priedo fizinės savybės (A priedas) yra labai artimos dyzelino savybėms, todėl šis priedas gali būti naudojamas slėginio uždegimo variklio degaluose (Killol et al., 2019).

Valeika et al., 2021 metais atliktas tyrimas su tiesioginio įpurškimo 1,9 TDI dyzeliniu varikliu, pastoviu alkūninio veleno sukimosi greičiu $n = 2000 \text{ aps./min}^{-1}$, dirbančiu su HVO ir butanolio mišiniais įmaišius 5, 10, 20 tūrio % butanolio. Pastebėta, kad didėjant butanolio koncentracijai hidrintame augaliniame aliejuje iki 20 tūrio % degimo procesas yra artimas iškastiniam dyzelinui. Pagal grafiką (1.5 pav.) kuriame pateikti eksperimento rezultatai, galima pastebėti, jog įpurškus vienodu laiku skirtingus degalus: iškastinį dyzeliną ir HVO su butanolio priedais, biodegalų mišinio degimo vėlavimo fazė yra trumpesnė už iškastinį dyzeliną. HVO su butanolio priedais degalų degimo pradžia prasideda $1,1^\circ \text{AV}$ prieš VGT, o iškastinio dyzelino $0,7^\circ$ po VGT. Kinetinėje degimo fazėje, iškastinis dyzelinas staigiai išskiria šilumą, pasiekdamas $35 \text{ J}/^\circ\text{AV}$ greitį tuo padidindamas azoto oksidų išsiskyrimą į aplinką, o HVO $23 \text{ J}/^\circ\text{AV}$. Didėjant butanolio koncentracijai iki 20 tūrio % HVO, šilumos išsiskyrimo intensyvumo reikšmė tampa didesnė už gryno HVO, bet ne tokia didelė, kaip iškastinio dyzelino, ir ji siekia $32 \text{ J}/^\circ\text{AV}$. O mažėjant butanolio koncentracijai HVO, mažėja šilumos išsiskyrimo greitis kinetinėje degimo fazėje. Difuzinėje degimo fazėje HVO su skirtinga butanolio koncentracija reikšmės kildamos susivienodina ir pasiekia dyzelino kinetinėje degimo fazėje reikšmę, dėl to geriau išdegina

susidariusius suodžius degimo metu. Dyzelinas difuzinėje degimo fazėje nepasiekia HVO su butanolio priedais reikšmių, ir išskiriančios šilumos intensyvumo reikšmė yra $32 \text{ J/}^\circ\text{AV}$, kas yra palanku susidaryti suodžiams kietųjų dalelių filtre. Difuzinės degimo fazės pabaigoje, link vėlyvo degimo fazės, ir joje, šilumos išsiskyrimo greitis susilygina, ir palaipsniui mažėja biodegalų skirtingos koncentracijos prieduose ir iškastiniame dyzeline (Valeika et al., 2021).

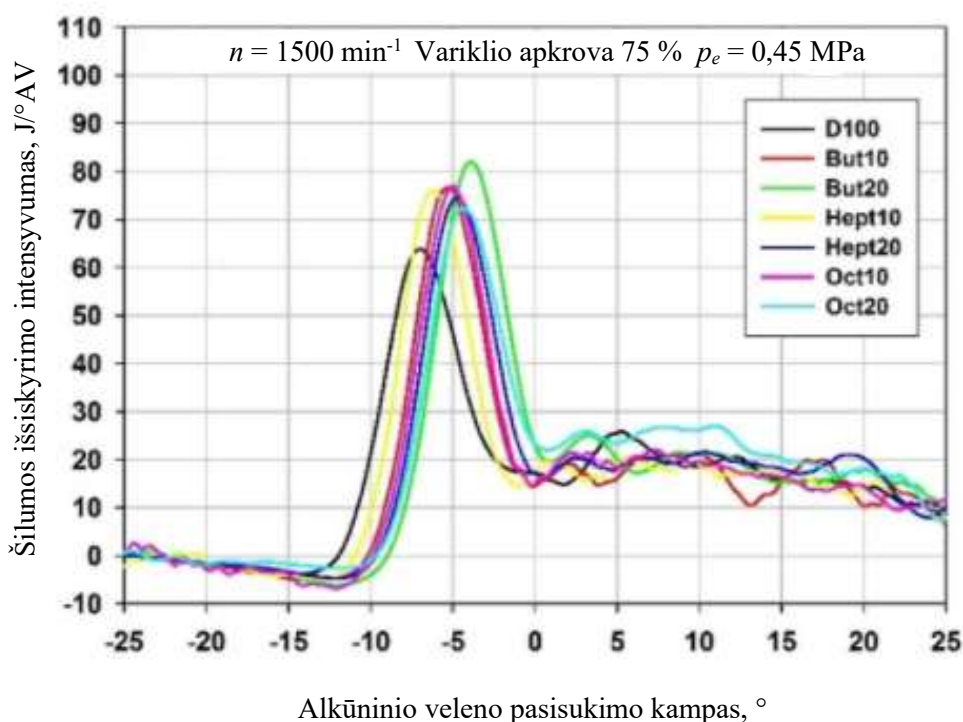


1.5 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo butanolio kiekio hidrintame augaliniame aliejuje (sudaryta pagal Valeika et al., 2021)

Apžvelgus tyrimo rezultatus, galima pastebėti, kad iškastinio dyzelino degimo savybės nusileidžia hidrinto augalinio aliejaus su skirtingos koncentracijos butanolio priedais. Galima daryti išvadą, kad naudojant HVO ir n-butanolio mišinius gaunami geriausi rezultatai, įskaitant didesnį cetatinį skaičių, trumpesnę gaisties fazę (Valeika et al., 2021).

Mokslininkai tiria, su kuria degalų rūšimi, įmaišius butanolį, kaip priedą, gaunami geriausi rezultatai degimo procesui ir ekologiniams rodikliams. Nour et al., 2019 metais atliko tyrimą su 0,8 darbinio tūrio vieno cilindro 4 taktų tiesioginio įpurškimo varikliu, esant 1500 min^{-1} variklio sūkių, ir esant 0,45 MPa. vidutiniam efektyviajam slėgiui, panaudojant iškastinį dyzeliną (D100), ir į jį įmaišius 10, 20 tūrio % butanolio (But10, But20). Iš pateikto tyrimo šilumos išsiskyrimo grafiko (1.6 pav.), galima pastebėti, kad uždegimo gaisties fazė pailgėjo But10, But20 degalų mišiniuose lyginant su D100. Kinetinėje degimo fazėje D100 pradeda degti anksčiau 4°AV , nei

dyzelino su butanoliu mišiniai, ir šilumos išsiskyrimo intensyvumo reikšmė pasiekia $63 \text{ J/}^\circ\text{AV}$. But10 kinetinėje fazėje pasiekia $78 \text{ J/}^\circ\text{AV}$, o But20 šiluma išskiria $82 \text{ J/}^\circ\text{AV}$ intensyviau, taip sudarydama didelį azoto oksidų kiekį. Difuzinėje degimo fazėje D100 ir But20 šilumos išsiskyrimo greitis dar pasiekia $28 \text{ J/}^\circ\text{AV}$ taip geriau išdegindamas degimo metu susidariusius suodžius. O But10 tepasiekia $20 \text{ J/}^\circ\text{AV}$ greitį, ir palaipsniui mažėja vėlyvo degimo fazės link. But10 nepasiekęs aukštos temperatūros išsiskyrimo intensyvumo, mažiau išdegina susidariusių suodžių, dėl to greičiau užsikemša kietųjų dalelių filtras (Nour et al., 2019). Panašios tendencijos vyrauja ir esant kitoms apkrovoms.



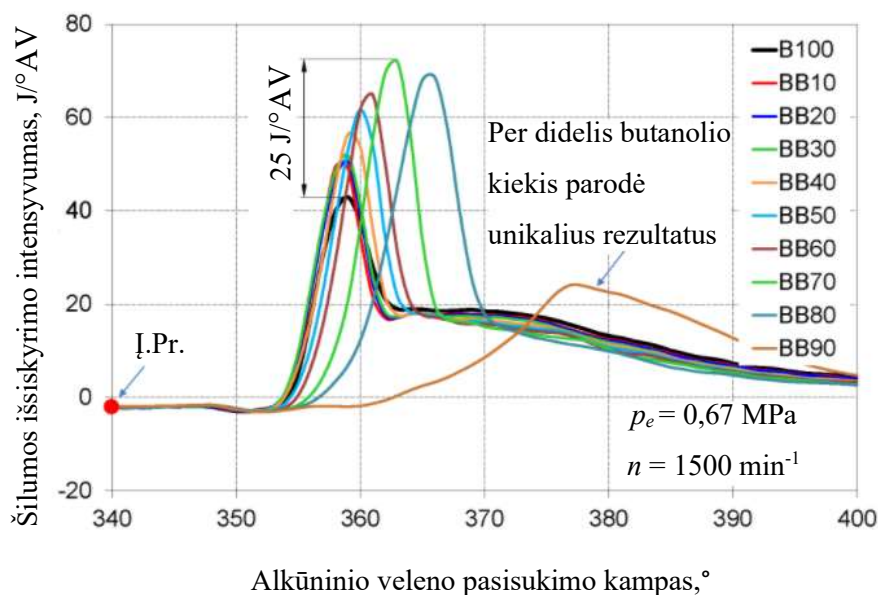
1.6 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo degalų sudėties
(sudaryta pagal Nour et al., 2019)

Išanalizavus tyrimo duomenis, pastebima, kad kuo didesnė butanolio koncentracija iškastiniame dyzeline, tuo geresni degimo rodikliai, daugiau išdega suodžių, taip sumažinama oro tarša. Atsižvelgiant į iškastinio dyzelino kenksmingumą aplinkai, butanolio naudojimas, kaip priedo šioje degalų rūšyje, leidžia jį ir toliau naudoti, taip smarkiai neteršiant aplinkos (Nour et al., 2019).

Butanolis laikomas perspektyviu degalų priedu dyzeliniuose varikliuose dėl savo klampumo, didesnio šilumingumo, palyginti su mažesniais alkoholiais, ir sudaro stabilus mišinius (Goga et al., 2019). Todėl jis plačiai taikomas maišymui su kitomis degalų rūšimis, pagerindamas jų energetines ir aplinkosaugines savybes. Tutak et al., 2021 metais atliko tyrimą, naudojant rapsų metilo esterį (RME) maišant įvairiomis proporcijomis su butanoliu, pridedant po 10 tūrio %, kol

pasiekia 90 tūrio % butanolio. Eksperimentas buvo atliekamas naudojant 1 cilindro dyzelinį variklį, veikiant pastovia 0,67 MPa apkrova. Iš gautų rezultatų (1.7 pav.), galima pastebėti, kad, kuo mažesnė koncentracija butanolio rapsų metilo esteryje, tuo degimo gaišties fazė yra trumpesnė. Butanolio koncentracijai didėjant, ilgėja vėlyvo degimo fazė. Kinetinėje degimo fazėje RME pasiekia 42 J/°AV šilumos išsiskyrimo intensyvumą, o didėjant butanolio koncentracijai rapsų metilo esteryje, tendencingai didėja šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje fazėje ir susidaro daugiau azoto oksidų. O rapsų metilo esterio mišiniai su 70 ir 80 tūrio % didžiausią šilumos išsiskyrimo intensyvumo reikšmę apie 70 J/°AV pasiekia kinetinėje degimo fazėje. Tarp gryno rapsų metilo esterio ir mišinio su 70 tūrio % butanolio, šilumos išsiskyrimo intensyvumo skirtumas siekia 25 J/°AV. Grynas rapsų metilo esteris difuzinėje degimo fazėje šilumą išskiria intensyviau, ir jo greitis siekia 19 J/°AV. Didėjant butanolio koncentracijai rapsų metilo esteryje, tolygiai mažėja šilumos išsiskyrimo intensyvumas difuzinėje fazėje (Tutak et al., 2021). Vėlyvoje degimo fazėje RME išskiriama šiluma stabiliai mažėjo, o mišinių su butanolio nežymiai svyravo.

Eksperimento metu buvo naudojamas rapsų metilo esteris su 90 tūrio % butanolio. Gauti rezultatai buvo unikalūs, nes mišinio degimo gaišties fazė buvo ilga, šiluma kinetinėje degimo fazėje neišsiskyrė. Pasiekus difuzinę degimo fazę, šilumos išsiskyrimo greitis tepasiekė 22 J/°AV. Vėlyvo degimo fazėje šio mišinio šilumos išsiskyrimo greitis buvo nenaudingas, nes visa sukaupta energija buvo išleista pro vožtuvus, taip nesukūrus tinkamo sukimo momento (Tutak et al., 2021).



1.7 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo butanolio kiekio rapsų metilo esteryje (sudaryta pagal Tutak et al., 2021)

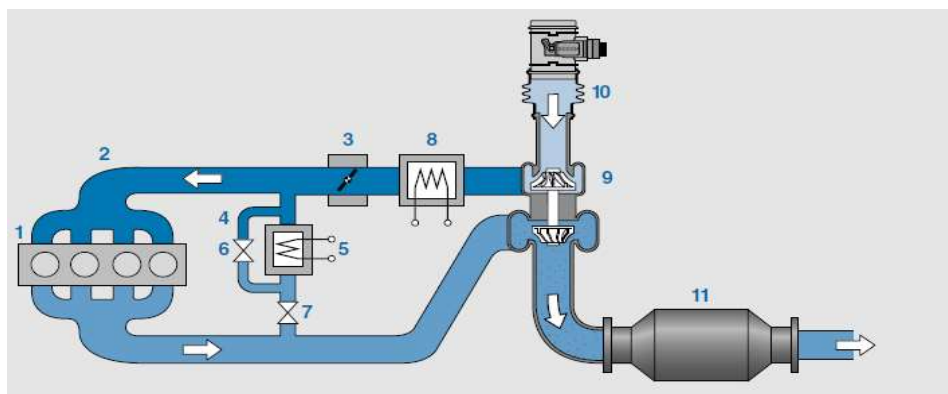
Apžvelgus tyrimo duomenis, galima pastebėti, kad padidėjus butanolio koncentracijai padidėjo variklio efektyvumas. Butanolis pagerino degimo stabilumą. Padidėjo NO_x emisijos, o

CO bei suodžių emisija sumažėjo. Variklis gali dirbti neviršijant 80 tūrio % butanolio rapsų metilo esteryje (Tutak et al., 2021).

Apibendrinant šiuos tyrimus, pastebėta, kad butanolis slėginio uždegimo varikliams yra tinkamas priedas. Jis tarpusavyje su kitais degalais gerai maišosi, pasižymi geru klampumu, šilumingumu. Aukštas cetano skaičius sumažina CO ir suodžių emisijas, pagerina degimo stabilumą. Butanolio koncentracijai degaluose siekiant iki 20 tūrio % nepablogėja degimo procesas, o koncentracijai didėjant, pastebima kai kurių rodiklių pablogėjimas. Grynas butanolis, kaip degalai, negali būti naudojami vieni slėginio uždegimo varikliui dirbti, nes juose daug deguonies ir greitai garuoja. Šio priedo gamybai naudojamos atsinaujinančios biologinės atliekos, taip mažinamas iškastinio dyzelino naudojimas.

1.5. Išmetamųjų dujų recirkuliacijos (EGR) įtaka degimo procesui ir variklio rodikliams

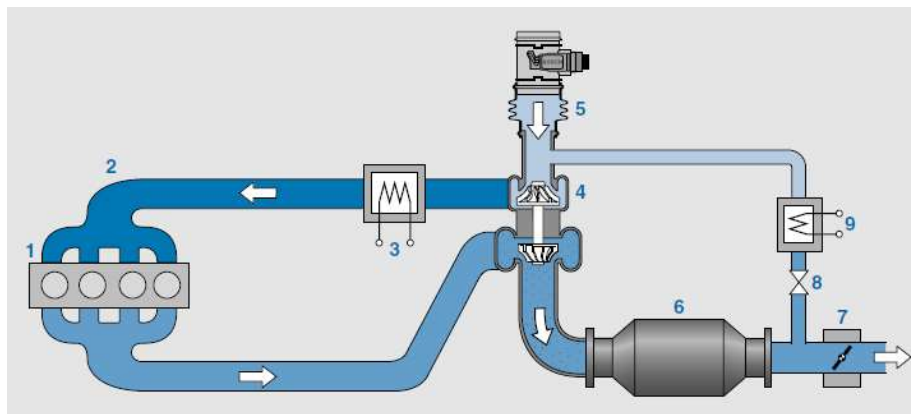
Šiuo metu automobiliuose (angl. *exhaust gas recirculation* – EGR) yra naudojamos dviejų rūšių sistemos: t. y. vidinė žemo ir išorinė aukšto slėgio. Vidinė aukšto slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema (1.8 pav.) pasižymi tuo, kad dalį išmetamųjų dujų, susidariusių po degimo proceso, sumaišo su naujai įsiurbtu oru, ir grąžina kitam degimo procesui vykdyti. Šis procesas atliekamas išmetamosioms dujoms turint didelį slėgį, kurio dar nepanaudojo turbokompresorius. Esant mažiausioms apkrovoms ir nesant pakankamam išmetamųjų dujų ir įsiurbiamo oro slėgio skirtumui šioje sistemoje, droseliu tenka priverstinai sumažinti įtekančio oro srautą (Reif, 2014).



1.8 pav. Vidinės aukšto slėgio EGR sistemos sudedamosios dalys: 1 – variklis; 2 – įsiurbimo kolektorius; 3 – droselis; 4 – aplinkkelis; 5 – EGR aušintuvas; 6 – praleidimo kanalo vožtuvas; 7 – EGR vožtuvas; 8 – tarpinis aušintuvas; 9 – turbokompresorius; 10 – oro masės matuoklis; 11 – oksidacijos tipo katalizinis konverteris (sudaryta pagal Reif, 2014)

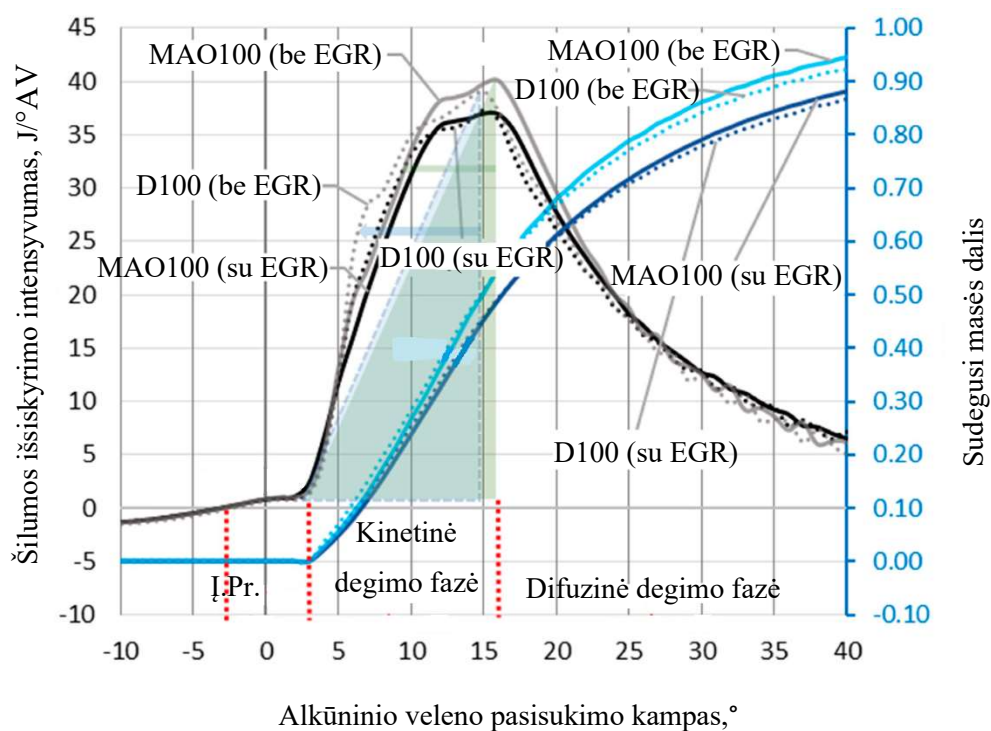
Išorinė žemo slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema (1.9 pav.), taip pat dalį išmetamųjų dujų kartu su naujai įsiurbtu oru grąžina vykdyti naujam degimo procesui. Tačiau

pagrindinis šios sistemos skirtumas yra tas, kad išmetamosios dujos yra grąžinamos joms pratekėjus turbokompresorių bei oksidacijos tipo katalizinį konverterį. Tokiu būdu grąžintose išmetamosiose dujose yra gerokai sumažintas kenksmingų aplinkai dalelių skaičius. Taip pat šios dujos yra grąžinamos dar prieš turbokompresorių, t. y. kuomet yra žemas įsiurbiamo oro slėgis, taip siekiant kuo vienodžiau paskirstyti atskiriems cilindrams tenkantį išmetamųjų dujų bei oro mišinį (Reif, 2014).



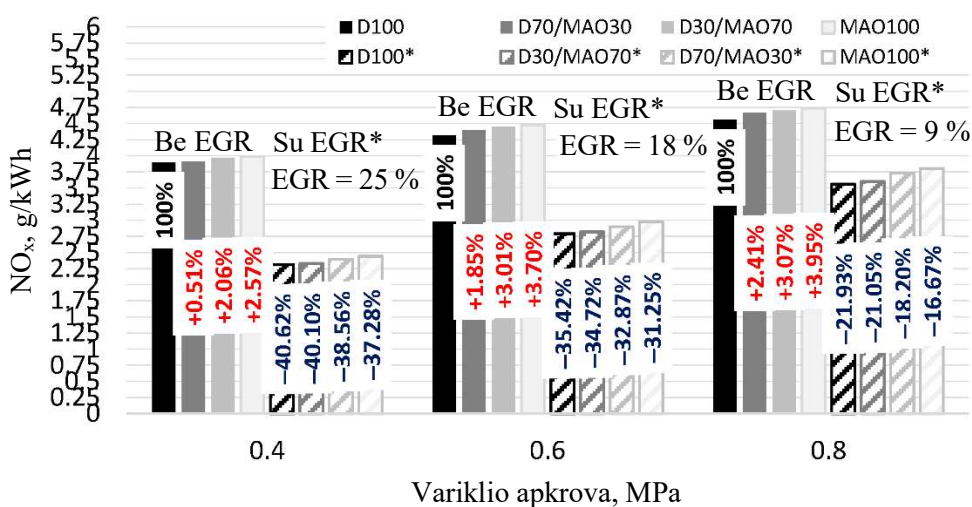
1.9 pav. Išorinės žemo slėgio EGR sistemos sudedamosios dalys: 1 – variklis; 2 – įsiurbimo kolektorius; 3 – tarpinis aušintuvas; 4 – turbokompresorius; 5 – oro masės matuoklis; 6 – oksidacinio tipo katalizinis konverteris; 7 – droselis; 8 – EGR vožtuvas; 9 – EGR aušintuvas (sudaryta pagal Reif, 2014)

Felneris et al. (2021) atliko tyrimą, naudojant 1,9 darbinio tūrio tiesioginio įpurškimo variklį su turbokompresoriumi ir aukšto slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema. Lygino iškastinį dyzeliną (D100) su mikrodumblių aliejumi (MAO100) bei skirtingos koncentracijos dyzelino ir mikrodumblių 30/70 tūrio % ir 70/30 tūrio % mišiniais. Iš grafiko (1.10 pav.) galima pastebėti, kad abiejų degalų rūšių (D100) ir (MAO100) įpurškimo pradžiai esant vienodai -3° prieš VGT, degimo pradžia 3° po VGT išlieka panaši. Kinetinėje degimo fazėje, be EGR tirtų degalų šilumos išsiskyrimo intensyvumas pasiekia $40 \text{ J}^{\circ}\text{AV}$, o kinetinėje degimo fazėje, su EGR 18 %, tirtų degalų šilumos išsiskyrimo intensyvumas siekia $36 \text{ J}^{\circ}\text{AV}$. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo skirtumas su EGR 0 % ir EGR 18 % yra $4 \text{ J}^{\circ}\text{AV}$. Su EGR šilumos išsiskyrimo greitis kinetinėje fazėje yra mažesnis, ir tas sąlygoja mažesnę azoto oksidų kiekio susidarymą, priešingai negu be EGR. Difuzinėje degimo fazėje šilumos išsiskyrimo greitis tirtų degalų rūšių, nepaisant EGR, tolygiai mažėja (Felneris et al., 2021).



1.10 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, priklausomai nuo EGR
(sudaryta pagal Felneris et al., 2021)

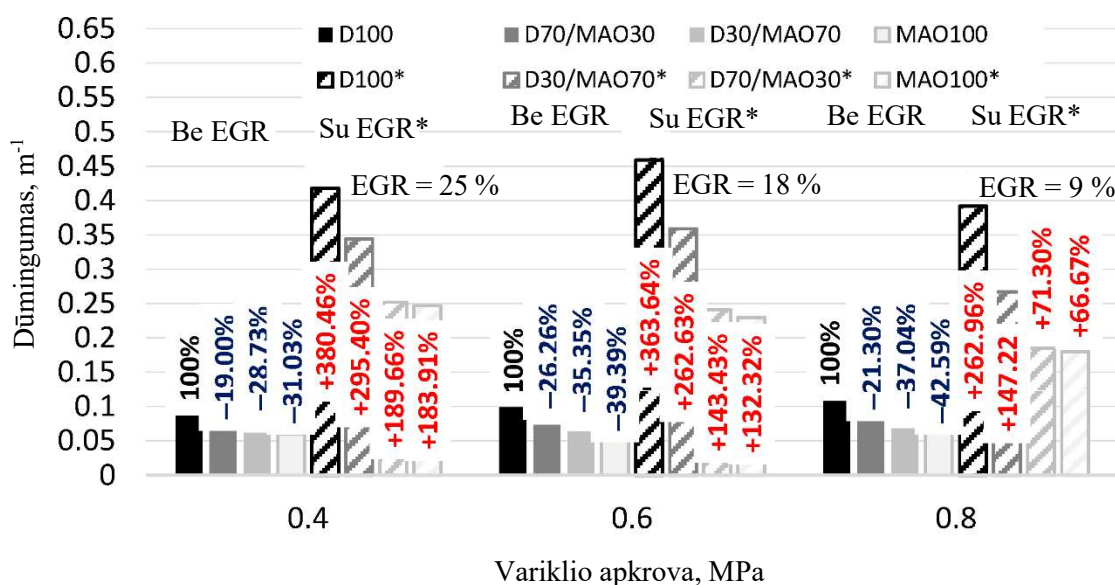
Tiriant azoto oksidų NO_x susidarymą, buvo nustatyta (1.11 pav.), kad esant 0,6 MPa variklio apkrovai, gryno iškastinio dyzelino be EGR NO_x emisija siekia 4,30 g/kWh., tačiau EGR 18 % NO_x emisija sumažėja apie 35 %. Kitų degalų rūšių: (MAO100), (D70/MAO30), (D30/MAO70) NO_x kiekis reikšmingai nesiskiria nuo gryno dyzelino be EGR. O esant EGR 18 %, skirtingų degalų rūšių NO_x reikšmės skiriasi nežymiai: nuo -35 % (D100), iki -31 % (MAO100). Azoto oksidų susidarymui didžiausią įtaką lemia variklio apkrova, nes nuo to priklauso degimo temperatūra ir EGR dydis (Felneris et al., 2021).



1.11 pav. Azoto oksidų (NO_x) emisijų priklausomybė nuo variklio apkrovos
(sudaryta pagal Felneris et al., 2021)

Iš gautų bandymo rezultatų (1.11 pav.) galima pastebėti, kad esant 0,8 MPa variklio apkrovai EGR 9 %, ir tuomet NO_x reikšmės mažėjo nuo 22 % (D100) iki 17 % (MAO100). O variklio apkrovai esant 0,4 MPa. EGR 25 % ir azoto oksidų susidaro mažiau nuo -41 % (D100) iki -37 proc. (MAO100). Degalų mišinių (D70/MAO30) ir (D30/MAO70) NO_x reikšmės įsiterpia tarp (D100) ir (MAO100) (Felneris et al., 2021).

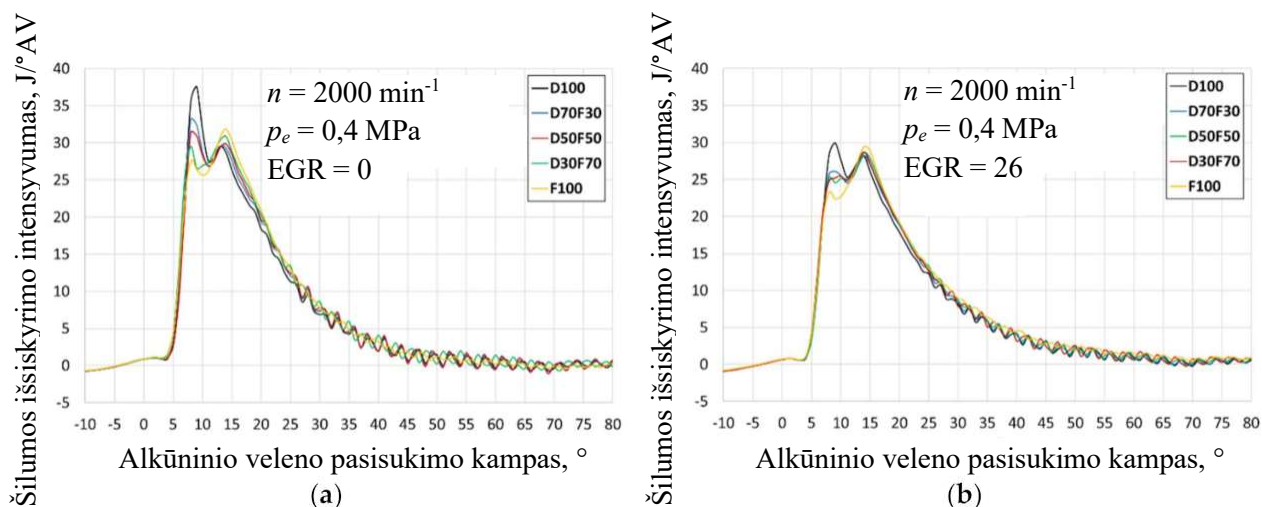
To paties eksperimento metu buvo tiriamas įvairių degalų: (D100), (MAO100) ir jų mišinių: (D70/MAO30), (D30/MAO70) dūmingumo intensyvumas su ir be EGR veikiant 0,4; 0,6; 0,8 MPa. variklio apkrovai. Nagrinėjant dūmingumą (1.12 pav.), esant 0,6 MPa. variklio apkrovai, didžiausias dūmingumas yra (D100) su EGR 18 % ir siekia $0,46 \text{ m}^{-1}$, tada eina (D70/MAO30) – $0,36 \text{ m}^{-1}$, (D30/MAO70) – $0,24 \text{ m}^{-1}$, o (MAO100) – $0,23 \text{ m}^{-1}$. Be EGR esant tai pačiai variklio apkrovai (D100) tesiekia $0,1 \text{ m}^{-1}$, (D70/MAO30) – $0,08 \text{ m}^{-1}$, (D30/MAO70) – $0,07 \text{ m}^{-1}$, o (MAO100) – $0,05 \text{ m}^{-1}$. Didėjant variklio apkrovai iki 0,8 MPa, mažėja (D100) dūmingumas su EGR iki $0,39 \text{ m}^{-1}$, bet didėja dūmingumas be EGR iki $0,11 \text{ m}^{-1}$. Panaši tendencija išlieka ir kitų degalų rūšių atveju. Galima daryti išvadą, kad EGR stipriai padidina visų tirtų degalų rūšių dūmingumą, ypač gryno iškastinio dyzelino, ir mišiniuose didėjant juose dyzelino koncentracijai, atitinkamai didėja ir dūmingumas (Felneris et al., 2021).



1.12 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo variklio apkrovos (sudaryta pagal Felneris et al., 2021)

Ieškant efektyviausių būdų, kaip sumažinti transporto priemonių išskiriamą taršą, Rimkus et al. (2021) atliko tyrimą, naudojant įprastą dyzeliną (D100) ir vištienos riebalus (F100) ir jų skirtingos koncentracijos mišinius: (D70/F30), (D50/F50), (D30/F70). Eksperimentas buvo atliktas su 1,9 darbinio tūrio tiesioginio įpurškimo dyzeliniu varikliu, išjungta ir įjungta išmetamųjų dujų recirkuliacija, ir esant skirtingoms variklio apkrovoms. Tyrimui naudojami

vištienos riebalų mišiniai buvo kaitinami iki $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, kad sumažėtų degalų klampumas, ir pagerėtų įpurškimas. Degalai buvo šildomi prijungus prie variklio aušinimo sistemos šildytuvą.



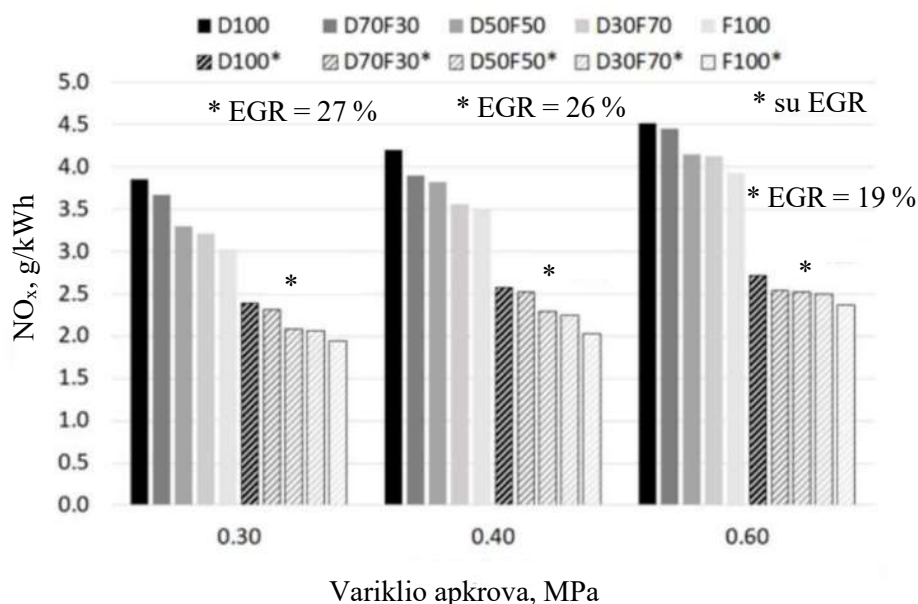
1.13 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas, (D100) lyginant su (F100) ir jų mišiniais, kai (a) išmetamųjų dujų recirkuliacija (EGR) išjungta ir (b) įjungta EGR (sudaryta pagal Rimkus et al., 2021)

Iš gautų tyrimo rezultatų grafiko (1.13 pav.) (a) galima pastebėti, kad degalai pradėjo degti 4° po VGT. Grynas dyzelinas, ir vištienos riebalų mišiniai be EGR pasiekė didesnę šilumos išsiskyrimo intensyvumą kinetinėje degimo fazėje, nei su EGR 26 %. O esant EGR 26 % (1.13 pav.). (b) (D100) kinetinėje degimo fazėje pasiekė $30\text{ J/}^{\circ}\text{AV}$ šilumos išsiskyrimo greitį, tai $8\text{ J/}^{\circ}\text{AV}$ mažiau nei be EGR. Gryni vištienos riebalai kinetinėje degimo fazėje su EGR pasiekė $23\text{ J/}^{\circ}\text{AV}$, o difuzinėje degimo fazėje pasiekė $29\text{ J/}^{\circ}\text{AV}$ ir tai labiausiai sumažina degimo procese susidariusias kenksmingas medžiagas: azoto oksidus. Pastebima tendencija, kad didėjant dyzelino koncentracijai vištienos riebaluose, atitinkamai didėja šilumos išsiskyrimo greitis, ypač be EGR, kinetinėje degimo fazėje (Rimkus et al., 2021).

EGR neleido stipriai pakilti šilumai kinetinėje degimo fazėje. O difuzinėje degimo fazėje su EGR, šiluma gerokai padidėjo, taip sumažindama NO_x medžiagų išsiskyrimą.

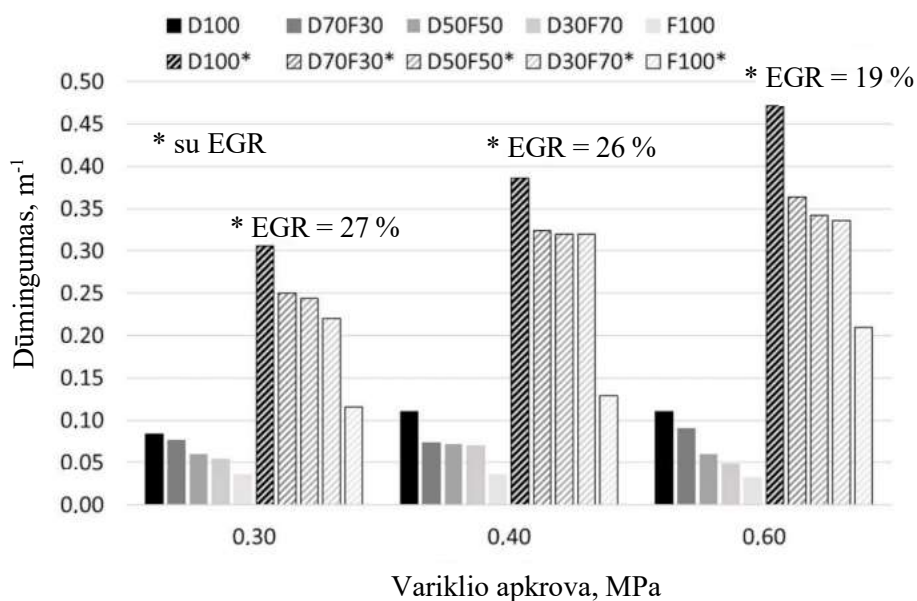
Viena iš kenksmingų medžiagų yra azoto oksidai (NO_x). Jų susidarymo kiekis gerokai priklauso nuo EGR naudojimo, degalų rūšies, ir variklio apkrovos dydžio (Mohiuddin et al., 2021). Didėjant apkrovoms (1.14 pav.), didėja azoto oksidų kiekis: (D100) $3,9\text{ g/kWh}$ esant $0,30\text{ MPa}$. variklio apkrovai, iki $4,5\text{ g/kWh}$ esant $0,60\text{ MPa}$. variklio apkrovai be EGR. Mažėjant dyzelino koncentracijai vištienos riebaluose, mažėja NO_x susidarymas. Grynuose vištienos riebaluose, esant $0,30\text{ MPa}$. variklio apkrovai, azoto oksidų kiekis 3 g/kWh , o padidinus variklio apkrovą iki $0,60\text{ MPa}$. azoto oksidų skaičius $3,9\text{ g/kWh}$ be EGR. Su EGR azoto oksidų kiekis gerokai sumažėja. Iškastinis dyzelinas su EGR pasižymi mažesniu NO_x kiekio susidarymu, nei gryni

vištienos riebalai be EGR. Didėjant variklio apkrovai, NO_x skirtumas tarp (D100) su EGR ir (F100) be EGR yra didžiausias ir siekia 1,2 g/kWh. Variklio apkrovai esant 0,30 MPa. (D100) su EGR 27 % ir (F100) be EGR skirtumas yra 0,6 g/kWh. Sprendžiant azoto oksidų emisijos mažinimą, EGR sistema pasiteisino tiek (D100), (F100) ir jų mišiniuose, neatsižvelgiant į skirtingas variklio apkrovas (Rimkus et al., 2021).



1.14 pav. Azoto oksido (NO_x) emisijų priklausomybė nuo degalų sudėties ir variklio apkrovos (sudaryta pagal Rimkus et al., 2021)

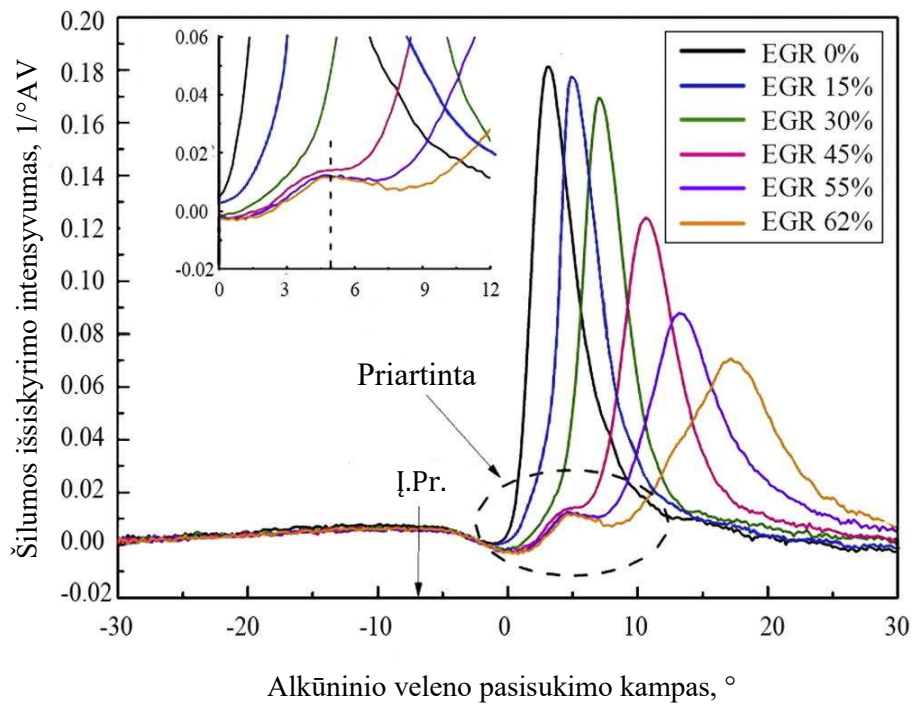
Dirbantis variklis neišvengiamai išmeta dūmus. Jų kiekis priklauso nuo degalų rūšies, skirtingos variklio apkrovos dydžio ir EGR naudojimo. Iš (1.15 pav.) galima pastebėti, kad atlikus bandymą esant 0,30 MPa, 0,40 MPa, 0,60 MPa. variklio apkrovai su įjungtu EGR ir be EGR dūmingumas gerokai skiriasi. Be EGR (D100) išskiria nuo $0,08 \text{ m}^{-1}$ iki $0,12 \text{ m}^{-1}$ priklausomai nuo variklio apkrovos didėjimo. Įjungus EGR (D100) dūmingumas didėjo nuo $0,31 \text{ m}^{-1}$ iki $0,48 \text{ m}^{-1}$ didėjant variklio apkrovoms nuo 0,30 MPa. iki 0,60 MPa. Didžiausias dūmingumo skirtumas naudojant (D100) nuo $0,48 \text{ m}^{-1}$ su įjungtu EGR iki $0,11 \text{ m}^{-1}$ be EGR. Dūmingumo skirtumas sudaro $0,37 \text{ m}^{-1}$. Mažėjant variklio apkrovoms dūmingumo skirtumas mažėja. Panaši tendencija stebima naudojant (F100). Grynų vištienos riebalų dūmingumas, esant visoms sudarytoms variklio apkrovoms, siekia $0,04 \text{ m}^{-1}$. Įjungtas EGR padidino grynų vištienos riebalų dūmingumą, bet ne taip smarkiai, kaip (D100) ir mišiniai. Didžiausias dūmingumo skirtumas naudojant (F100) nuo $0,03 \text{ m}^{-1}$ be EGR iki $0,21 \text{ m}^{-1}$ su EGR. Tai sudaro $0,18 \text{ m}^{-1}$ skirtumą. Didėjant variklio apkrovoms, mažėja EGR, dėl to gerokai didėja dūmingumas visų tirtų degalų rūšių, o ypač iškastinio dyzelino (Rimkus et al., 2021).



1.15 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo degalų sudėties ir variklio apkrovos
(sudaryta pagal Rimkus et al., 2021)

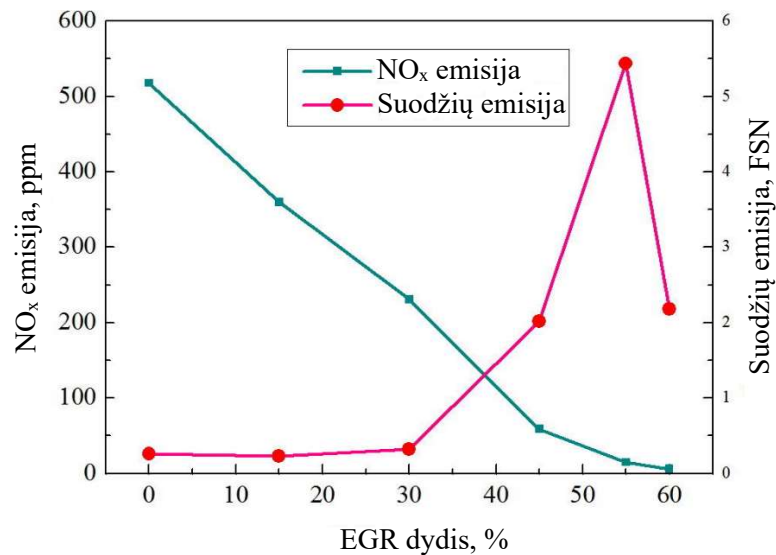
Išnagrinėjus Rimkus et al. (2021) atlikto tyrimo rezultatus, aiškėja, kad EGR sistemos naudojimas gerokai prisideda prie mažesnės azoto oksidų emisijos susidarymo. Pastebima tendencija, kad kuo didesnis procentas EGR, tuo labiau mažėja šilumos išsiskyrimo greitis kinetinėje degimo fazėje. Tai lemia mažesnę NO_x kiekio susidarymą. Variklį veikiant didesnėms apkrovoms, reikalingas didesnis šviežio darbinio mišinio kiekis, dėl to išmetamųjų kenksmingų medžiagų kiekis didėja. Mažinant variklio apkrovą, didėja EGR, kuri neleidžia išsiskirti dideliame šilumos intensyvumui, susidaro mažesnis į aplinką išskiriančių NO_x emisijos kiekis (Rimkus et al., 2021).

Iš anksčiau apžvelgtų tyrimų esant skirtingoms variklį veikiančioms apkrovoms, kai EGR 27 %, efektyviai sumažėja NO_x emisija. Shi et al. (2017) atliko tyrimą, naudojant keturių cilindrų dyzelinį variklį, EGR didinant nuo 0 iki 62 %. Eksperimentui buvo naudojamas biodyzelinas. Iš gauto šilumos išsiskyrimo intensyvumo grafiko (1.16 pav.) galima pastebėti, kad esant vienodam degalų įpurškimui, anksčiausiai užsidega degalai esant EGR 0 % ir pasiekia 0,19 1/°AV greitį. Didėjant EGR po 15 %, biodyzelino degimo vėlavimo fazė yra ilgesnė, o šilumos išsiskyrimo greitis mažėja. EGR pasiekus 45 % ir didėjant iki 62 %, atsiranda degimo vėlavimo fazė, degalai užsidega vėliau, šiluma išsiskiria lėčiau. Esant EGR 45 % šiluma pasiekia 0,12 1/°AV greitį, o esant EGR 62 % pasiekia 0,07 1/°AV greitį. Skirtumas tarp 62 % EGR ir EGR 0 % yra 0,12 1/°AV. EGR pasiekus 45 % ir daugiau, sumažėja deguonies koncentracija, degimo temperatūra, o tai lemia mažesnę NO_x kiekio susidarymą (Shi et al., 2017).



1.16 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumas esant skirtingiems EGR rodikliams (sudaryta pagal Shi et al., 2017)

Atlikdamas bandymą Shi et al. (2017) išsiaiškino, kaip EGR didėjant nuo 0 % iki 60 % veikia degimo procesą, kuris lemia NO_x ir suodžių susidarymą.



1.17 pav. NO_x ir suodžių emisija esant skirtingiems EGR dydžiams (sudaryta pagal Shi et al., 2017)

Iš gautų rezultatų (1.17 pav.) galima pastebėti, kad esant EGR 0 % NO_x emisija siekia 520 ppm, o didėjant EGR NO_x reikšmės gerokai mažėja. EGR pasiekus 60 % NO_x emisija artima nuliui. Tiriant suodžių emisijas buvo gauti rezultatai, kad nuo EGR 0 % iki EGR 30 % suodžių susidarymas yra nežymus. Didėjant EGR iki 45 % suodžių emisija padidėja iki 2 filtro dūmingumo

skaičiaus (angl. *Filter Smoke Number* FSN). EGR pasiekus 55 % suodžių emisija gerokai padidėja ir siekia 5,5 FSN. EGR pasiekus 60 % stebimas staigus suodžių emisijos kritimas iki 2,2 FSN. EGR didėjimas daro teigiamą poveikį NO_x emisijos mažėjimui, tačiau EGR didėjant nuo 30 % ir daugiau smarkiai didėja suodžių susidarymas. Optimalus suodžių ir NO_x emisijos variantas gaunamas, kuomet EGR apie 38 % (Shi et al., 2017).

Panašią suodžių ir NO_x emisijų susidarymo tendenciją atliktame tyrime pastebėjo Liang et al. (2021). Eksperimente buvo naudojami trijų komponentų degalai: biodyzelinas, pentanolis, dyzelinas. Naudojant deguonies prisotintus degalus ir EGR, NO_x emisija gerokai mažėja, o suodžių didėja, bet pasiekus EGR 45 % suodžių emisija mažėja. EGR teigiamai paveikia NO_x emisiją, tačiau reikia įvertinti ir kitus aspektus, kuriuos sukelia padidėjęs EGR: dūmingumas, suodžiai (Mourad et al., 2021).

Apibendrinus tyrimus, kurių degimo procesuose buvo naudojama EGR, galima pastebėti, kad išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema teigiamai veikia NO_x emisijų susidarymą, degimo procesą, bet didina dūmingumą. Priklausomai nuo variklio apkrovos, reguliuojama išmetamųjų dujų recirkuliacija, kuri turi įtakos šilumos išsiskyrimo greičiui. EGR esant nuo 9 % iki 30 % teigiamai veikia degimo procesą: degalai užsidega laiku, kinetinėje degimo fazėje šilumos išsiskyrimo greitis nebūna didelis, dėl to susidaro mažesnės NO_x emisijos, o difuzinėje degimo fazėje, šilumos išsiskyrimo intensyvumas padidėja, didėja dūmingumas. EGR esant nuo 45 % iki 62 % atsiranda antra gaišties fazė (po pilotinio įpurškimo), šiluma išsiskiria lėčiau, nes sumažėja deguonies koncentracija. Visų degalų suodžių emisija pirmiausia didėja, o po to mažėja didėjant EGR. To priežastis yra, kad išmetamosios dujos sumažina degimo temperatūrą, sumažėja deguonies koncentracija. Didėjant EGR normai, mažėja azoto oksidų susidarymo emisija. EGR pasiekus 50 % ir daugiau, NO_x emisija artima nuliui, bet dūmingumas stipriai padidėja. Didėjant variklio apkrovai, atitinkamai mažinama išmetamųjų dujų recirkuliacija. EGR sistemos naudojimas yra priimtinas dyzeliniuose varikliuose, surandant kompromisus tarp EGR dydžio, degalų rūšių, variklio apkrovos.

Iš atliktos literatūros šaltinių apžvalgos galima pastebėti, kad mokslininkai intensyviai ieško alternatyvių iškastiniam dyzelinui degalų ir jų mišinių, kurie nepablogintų variklio darbo, bet būtų mažiau taršus. Analizuotuose tyrimuose buvo naudojami įvairūs degalai: hidrintas augalinis aliejus, butanolis, rapsų metilo esteris, mikrodumblių aliejus, grynai vištienos riebalai ir jų mišiniai įvairiomis proporcijomis. Gauti rezultatai pateikiami išsamiuose grafikuose. Eksperimentais buvo siekiama nustatyti, kokią įtaką variklio darbui ir kenksmingų medžiagų susidarymui turi EGR veikimo strategija. Tyrimuose buvo lyginami iškastinio dyzelino ir įvairių degalų rūšių, jų mišinių, degimo proceso rodikliai nuo EGR 0 % iki EGR 62 %, ir kenksmingų medžiagų susidarymo emisijos. Atlikti tyrimai labai aktualūs, nes valstybės yra įsipareigojusios

mažinti aplinkos taršą, šiltnamio efektą sukeliančias dujas (Europos žaliasis kursas, 2021). Alternatyvių degalų naudojimas mažina iškastinio dyzelino naudojimą. Tyrimais siekta surasti optimalų santykį tarp variklio apkrovos, EGR dydžio, degalų rūšies ir kenksmingų medžiagų susidarymo kiekio, lyginant su iškastiniu dyzelinu.

2. TYRIMŲ METODIKA IR MEDŽIAGOS

Šiame skyriuje pateikiama informacija apie tyrimo planavimą, įrangą, naudotus degalus ir jų mišinių sudėtį, skaitinio modeliavimo metodiką.

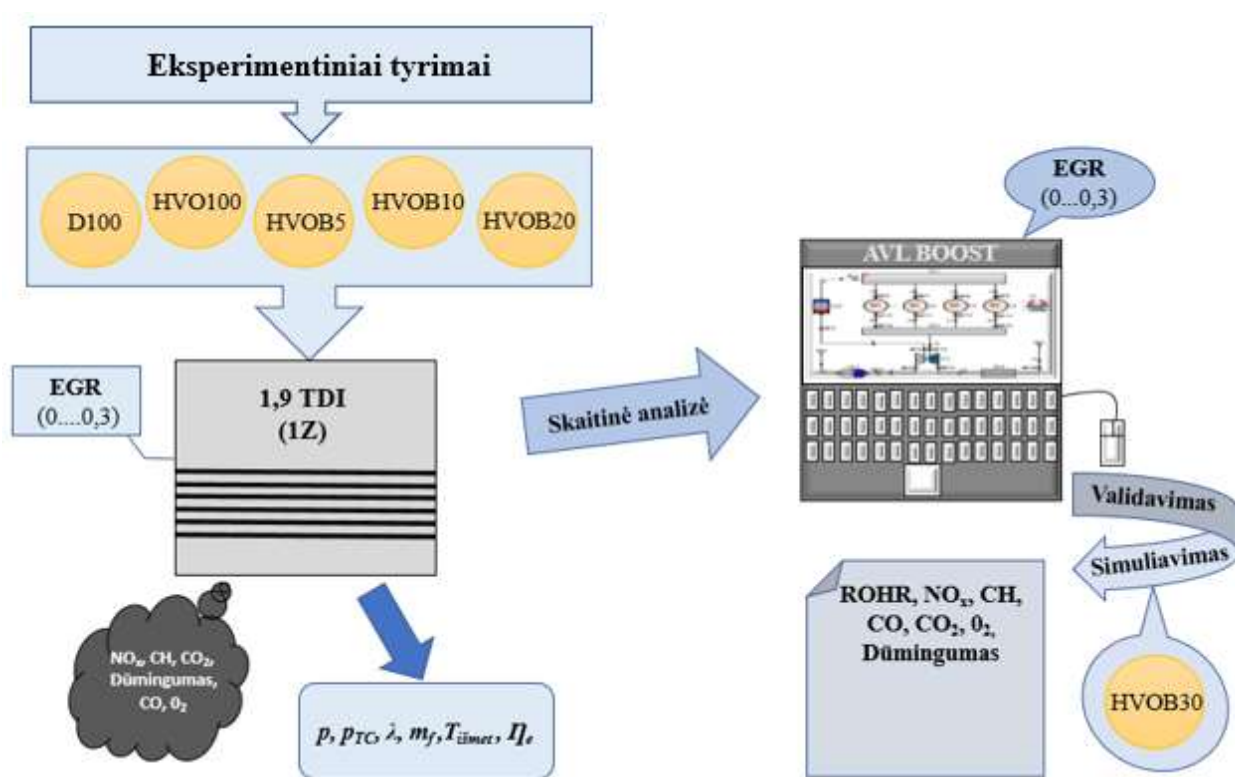
2.1 Tyrimo planavimas

Tyrimas atliekamas dviem etapais:

I – eksperimentiniai tyrimai ir energetinių bei ekologinių rezultatų analizė.

II – skaitinė degimo proceso analizė, matematinio modelio validavimas bei degimo proceso simuliacijos.

Detalesnė bandymo planavimo eiga pateikta 2.18 pav.



2.18 pav. Bandymo planavimo eiga (sudaryta darbo autoriaus)

Eksperimentu buvo siekiama išsiaiškinti, kaip naudojant HVO ir įvairius jo mišinius su biobutanoliu, kinta variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai, lyginant su iškastiniu dyzelinu keičiant EGR. Tyrimu bandyta rasti optimalų biodegalų mišinį, kurio savybės būtų artimos arba geresnės už iškastinį dyzeliną. Eksperimentinis tyrimas pirmiausia atliktas varikliui veikiant 2000 min^{-1} sukimosi greičiu, apkraunant 30, 60, 90 ir 120 Nm sukimo momentu esant išjungtam EGR. Degalų įpurškimo pradžią reguliavo variklio elektroninis valdymo blokas. Vėliau tuo pačiu režimu tyrimas pakartotas naudojant EGR sistemą į cilindrą gražinant 10 %, 20 % ir 30 % išmetamųjų dujų masės.

EGR koeficientas nustatomas pagal formulę (Rimkus, 2022):

$$k_{EGR} = \frac{G_{EGR}}{G_{EGR} + G_{oro_EGR}}; \quad (2.1)$$

čia: G_{EGR} – pro EGR vožtuvą grąžinamų deginių masė, kg/min,

G_{oro_EGR} – įsiurbiamo oro masė, kai EGR vožtuvas atidarytas, kg/min (matuojama eksperimento metu).

Išmetamųjų dujų recirkuliacijos vožtuvo pralaidumas apytiksliai nustatomas išmatuojant įsiurbimo oro masės sumažėjimą, kai EGR vožtuvas atidarytas (Rimkus, 2022):

$$G_{EGR} = G_{oro} - G_{oro_EGR}; \quad (2.2)$$

čia: G_{oro} – įsiurbiamo oro masė, kai EGR vožtuvas uždarytas, kg/min.

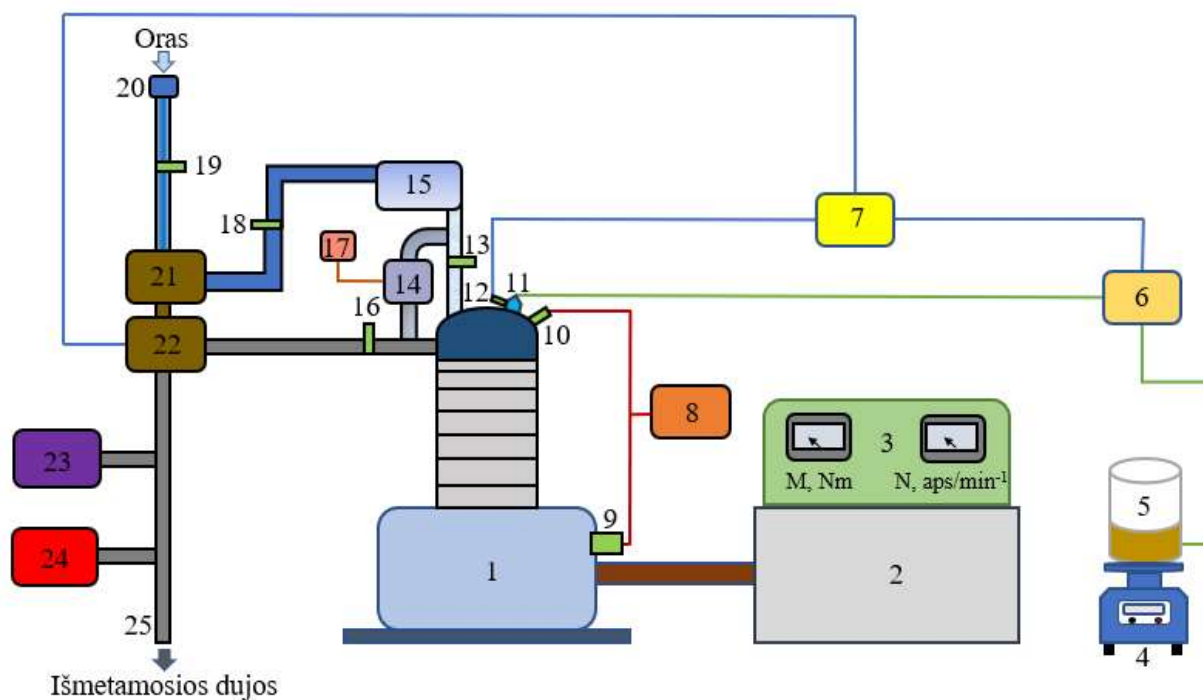
EGR vožtuvas valdomas jį atjungus nuo variklio elektroninio valdymo bloko ir naudojant EGR valdymo moduliatorių, kuris formuoja kintamo užpildos koeficiento valdymo signalą (šis signalas reguliuoja vakuumo, kuris valdo EGR, slėgį). Keičiant EGR, keičiasi įsiurbiamo oro masė G_{oro_EGR} . Reikiamas EGR atidarymas pasiekiamas reguliuojant EGR valdymo slėgį ir nustatant apskaičiuotą įsiurbiamo oro masę (Rimkus, 2022):

$$G_{oro_EGR} = G_{oro} - k_{EGR} \cdot G_{oro_EGR}; \quad (2.3)$$

Atliekant matavimus pastebėta, kad EGR koeficientui esant 0,3, variklis negalėjo išvystyti 90 ir 120 Nm apkrovos, o esant 30 Nm apkrovai dirbo nestabiliai. Todėl, tolesniam duomenų analizavimui buvo pasirinkta 60 Nm variklio apkrova, kuri atitinka miesto režimą, kai automobilio važiavimo greitis siekia apie 50 km/h.

2.2 Tyrimo įranga

Bandymai buvo atlikti VILNIUS TECH Transporto inžinerijos ir logistikos laboratorijos Vidaus degimo variklių skyriuje, naudojant 1,9 l darbinio tūrio, tiesioginio įpurškimo, slėginio uždegimo variklį, kartu turintį turbokompresorių ir aukšto slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistemą (2.19 pav.).



2.19 pav. Bandymo schemos sudedamosios dalys: 1 – variklis; 2 – variklio apkrovos stendas; 3 – išėjimo matuokliai; 4 – elektroninės svarstyklės; 5 – degalų bakas; 6 – aukšto slėgio degalų siurblys; 7 – elektroninis valdymo blokas; 8 – variklio sukimo momento ir sukimosi greičio registravimo įranga; 9 – alkūninio veleno padėties jutiklis; 10 – cilindro slėgio jutiklis; 11 – purkštuvas; 12 – purkštovo adatos jutiklis; 13 – temperatūros jutiklis; 14 – EGR vožtuvas; 15 – tarpinis aušintuvas; 16 – išmetamųjų dujų temperatūros jutiklis; 17 – EGR valdymo moduliatorius; 18 – slėgio jutiklis; 19 – išsiurbiamo oro temperatūros jutiklis; 20 – oro masės matuoklis; 21 – kompresorius; 22 – turbokompresorius; 23 – išmetamųjų dujų analizatorius; 24 – dūmų analizatorius; 25 – išmetamųjų dujų vamzdis (sudaryta darbo autoriaus)

Bandyme naudoto slėginio uždegimo variklio detalūs pagrindiniai techniniai duomenys pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Variklio 1,9 TDI (1Z) pagrindiniai techniniai duomenys (sudaryta darbo autoriaus)

Parametras	Reikšmė
Cilindrų darbo tūris, cm ³	1896
Nominalus galingumas, kW	66
Maksimalus sukimo momentas, Nm (esant $n = 2200 \text{ min}^{-1}$)	180
Cilindrų skaičius	4
Suspaudimo laipsnis	19,5
Stūmoklio eiga, mm	95,5
Cilindro skersmuo, mm	79,5
Darbo eiliškumas	1-3-4-2

Bandymo metu buvo registruojami energetiniai ir ekologiniai rodikliai, gauti iš įvairių jutiklių, matavimo įrangos, kuri pateikta 2.2 lentelėje.

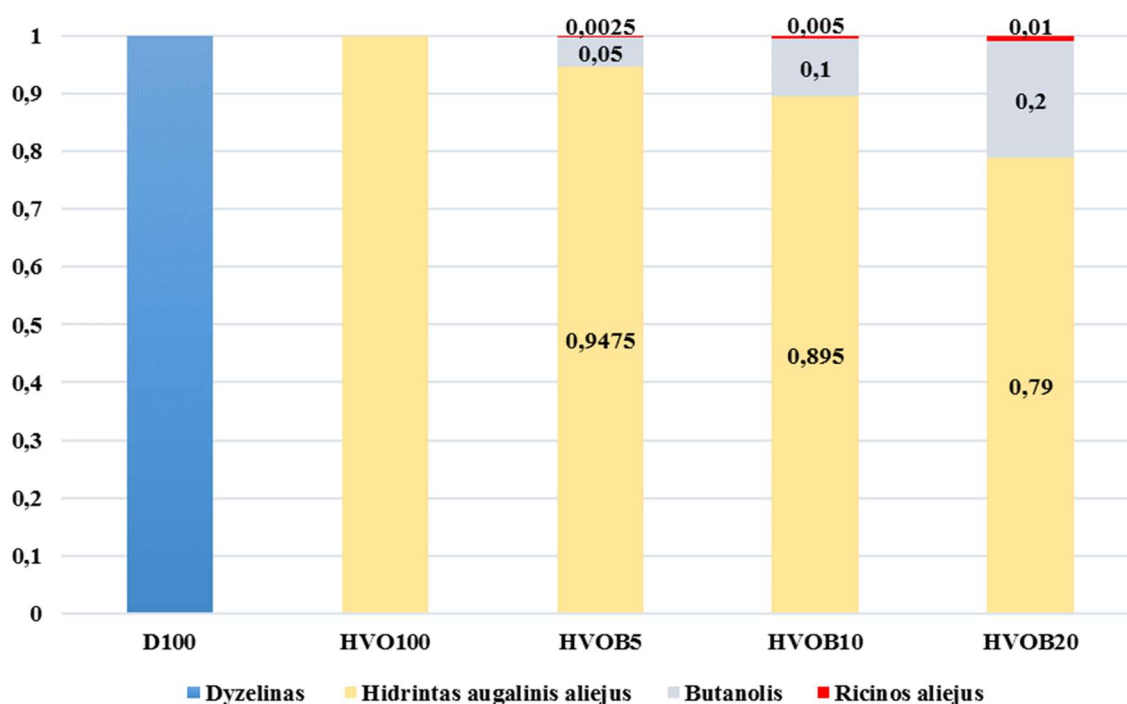
2.2 lentelė. Bandymo metu naudojama įranga ir jos tikslumas (sudaryta darbo autoriaus)

Matavimo įranga Matuojamas rodiklis	Pavadinimas Techninė charakteristika	Tikslumas
Oro masės matuoklis Temperatūros diapazonas Matavimo diapazonas	BOSCH HFM 5 -40 °C – (+120 °C) 8–370 kg/h	≤ 3 %
Variklio apkrovos stendas Maksimali stabdymo galia Apsisukimų kontroliuojamos ribos Maksimalios išmatuotos apkrovos	KI – 5543 185 kW 1500–3000 aps/min ⁻¹ 440 Nm	± 1,23 Nm
Elektroninės svarstyklės Matavimo ribos	SK – 5001 0–5000 g	± 0,5 g
Termopora Temperatūros matavimo režimas	K – tipo 0 – (+1250 °C)	± 0,5 %
Cilindro slėgio jutiklis Jautrumas	AVL GH13P 15,84 ± 0,09 pC/bar	≤ 0,3 %
Slėgio cilindre įrašymo įranga Signalų santykis Įvesties diapazonas Matavimo diapazonas	AVL DITEST DPM 800 1 Mv/pC 6000 pC 0–200 bar	1 %
Įsiurbiamo oro slėgio matuoklis Slėgio jutiklis TP 704-2BAI	DELTA OHM HD 2304.0 1–2 bar	± 0,0002 MPa
Diagnostikos prietaisas Degalų įpurškimo pradžia	VCDS v11.2	0,1 °AV
Išmetamųjų dujų analizatorius / dūmomatis λ CO CO ₂ O ₂ CH NO _x Dūmingumas	AVL DICOM 4000 0–9,999 0–10 % 0–20 % 0–25 % 0–20 000 ppm. 0–5 000 ppm. 0–99,99 m ⁻¹	 0,001 0,01 % 0,1 % 0,01 % 1 ppm 1 ppm 0,01 m ⁻¹

2.3 Tiriamieji degalai

Bandyme buvo naudojamas hidrintas augalinis aliejus, butanolis bei iškastinis dyzelinas. Papildomai pagal anksčiau apskaičiuotą santykį buvo suruošti trys skirtingi biodegalų mišiniai: į hidrintą augalinį aliejų įmaišyta 5, 10 ir 20 tūrio % butanolio. Siekiant užtikrinti tepimo savybes,

papildomai į mišinius, atitinkamai nuo butanolio tūrio, buvo įmaišyta 5 % ricinos aliejaus dalis (2.20 pav.).



2.20 pav. Tiriųjų degalų ir jų mišinių tūrio dalis 1 litre

Bandyme naudotų degalų ir jų mišinių savybės pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Naudotų degalų ir jų mišinių savybės

Parametras	D100	HVO100	HVOB5	HVOB10	HVOB20
Anglis (C)	86,20	84,55	83,50	82,46	80,40
Vandenilis (H)	13,80	15,45	15,34	15,22	15,00
Deguonis (O)	-	-	1,16	2,31	4,60
C/H santykis	6,25	5,47	5,44	5,42	5,36
Oro masė (kg), reikalinga 1 kg degalų (l_0)	14,79	15,18	14,97	14,76	14,34
Žemutinis degalų šilumingumas (LHV) MJ/kg	43,10	44,10	43,52	42,94	41,78

2.4 Skaitinio modeliavimo metodika

Gauti duomenys buvo naudojami skaitinėje analizėje, kuri atliekama pasitelkus AVL BOOST paprogramę BURN. Joje, pagal sudarytą matematinį modelį, buvo tiriamas šilumos išsiskyrimas, degimo trukmė bei kiti parametrai, leidžiantys pamatyti tai, kas vyko degimo kameroje, priešingai negu eksperimento metu.

Norint apytiksliai apskaičiuoti tikrąją šilumos išsiskyrimo charakteristiką, naudojama Vibe funkcija.

Vibe funkcijos formulė (Vibe, 1970):

$$\frac{d_x}{d_\alpha} = \frac{\alpha}{\Delta_{\alpha_c}} \cdot (m+1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}}; \quad (2.4)$$

$$dx = \frac{dQ}{Q}; \quad (2.5)$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_o}{\Delta_{\alpha_c}}; \quad (2.6)$$

čia: Q – bendras degalų šilumingumas,
 α – alkūninio veleno pasisukimo kampas, °AV,
 α_o – degimo pradžia, °AV,
 Δ_{α_c} – degimo trukmė, °AV,
 m – intensyvumo rodiklis,
 a – Vibe rodiklis, $a = 6,9$.

Vibe funkcijos integralas įvertina sudegusią degalų masės dalį (Vibe, 1970):

$$x = \int \frac{d_x}{d_\alpha} \cdot d_\alpha = 1 - e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (2.7)$$

čia: x – sudegusi masės dalis.

Analizės metodika

Naudojant eksperimentinius duomenis (degalų sąnaudos, oro sąnaudos, slėgis cilindre, variklio sukimosi greitis, EGR ir kt.) AVL programa atliekama degimo proceso analizė nustatant degimo rodiklius: degimo pradžią SOC, užsiliepsnojimo gaisrą, degimo trukmę ir degimo intensyvumą (m). Taip pat nustatomas šilumos išsiskyrimo intensyvumas, sudegusi masės dalis (MBF), temperatūros ir slėgio prieauglis, temperatūra ir slėgis cilindre.

Sintezės metodika

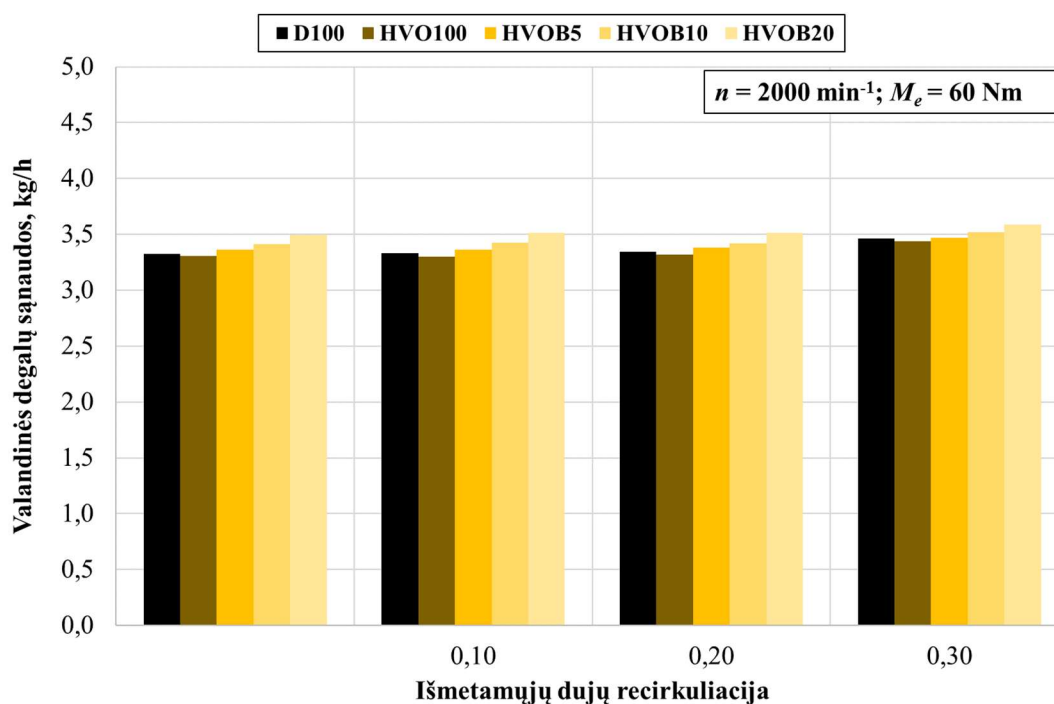
Žinant arba numatant degimo proceso rodiklius (degimo pradžią, degimo trukmę ir intensyvumą, degiojo mišinio sudėtį) yra modeliuojamas degimo ciklas ir apskaičiuojami variklio rodikliai (galia, sukimo momentas, degalų sąnaudos, ekologiniai rodikliai, degimo slėgis, temperatūra ir kiti). Degimo proceso modeliavimas leidžia nustatyti variklio rodiklius tiems režimams, kuriems nebuvo atliekami eksperimentai. Būtina sąlyga – skaitinio modelio validavimas realiam variklio veikimui (palyginama variklio galia, slėgis cilindre, šilumos išsiskyrimo intensyvumas ir kiti).

3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Energetiniai rodikliai

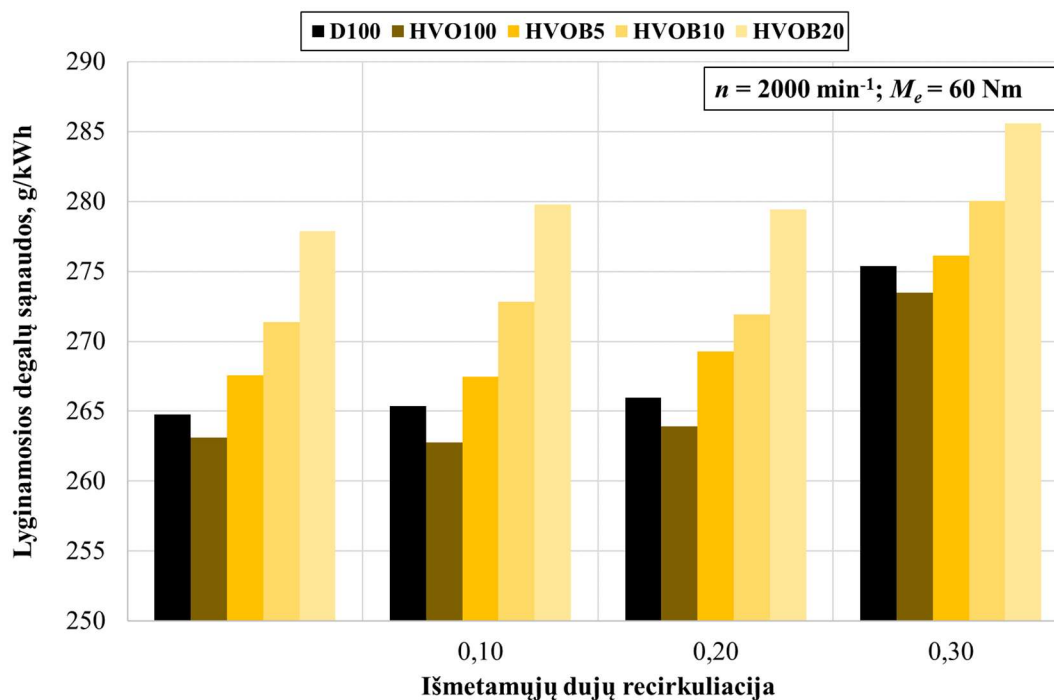
Bandymo sąlygos apėmė 60 Nm variklio apkrovą, t. y. vidutinis efektyvusis slėgis siekė 0,4 MPa. Atlikus eksperimentinius tyrimus, buvo gauti pirminiai ekologinių ir energetinių rodiklių rezultatai, kurie pateikiami 3.21–3.31 pav.

Mažiausios valandinės degalų masės sąnaudos yra HVO100, nes šių degalų žemutinis šilumingumas didžiausias, tačiau biobutanolis degalų sąnaudas didina dėl mažesnio šilumingumo (2.1 lentelė) (3.21 pav.). Kai EGR 0, 0,10 ir 0,20, degalų sąnaudos išlieka mažai pakitusios. EGR pasiekus 0,30, degalų sąnaudos šiek tiek padidėja, nes lėtėja ir blogėja degimo procesas.



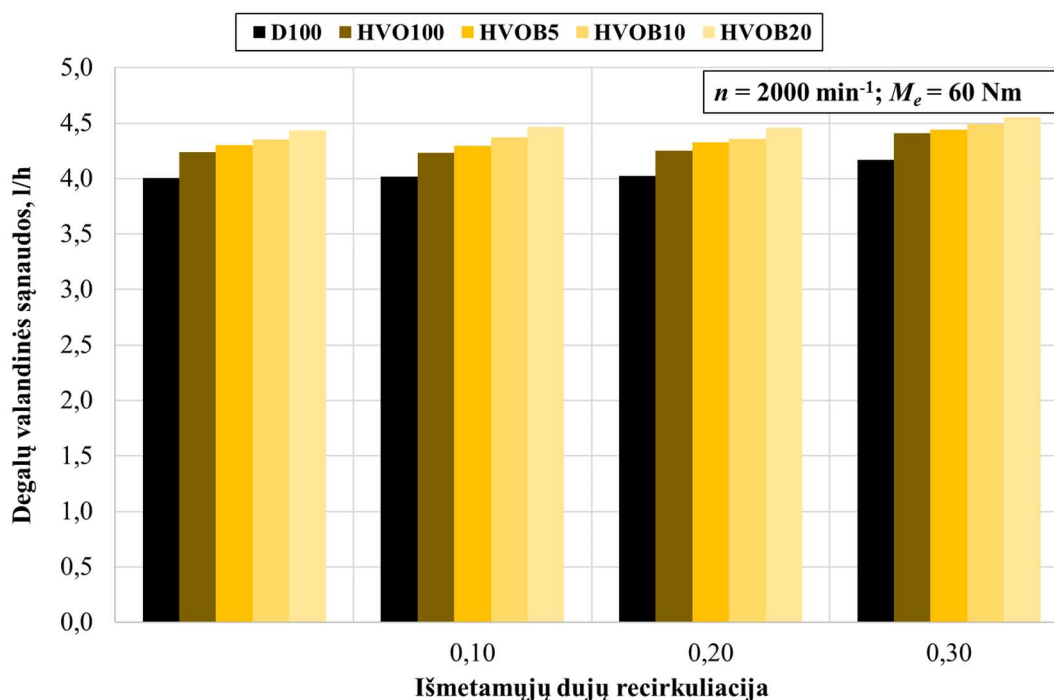
3.21 pav. Valandinių degalų masės sąnaudų priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

Lyginamosios degalų masės sąnaudos (3.22 pav.) kinta proporcingai degalų masės sąnaudoms, nes tyrimas buvo atliktas esant vienodai apkrovai ir variklio sūkiams.



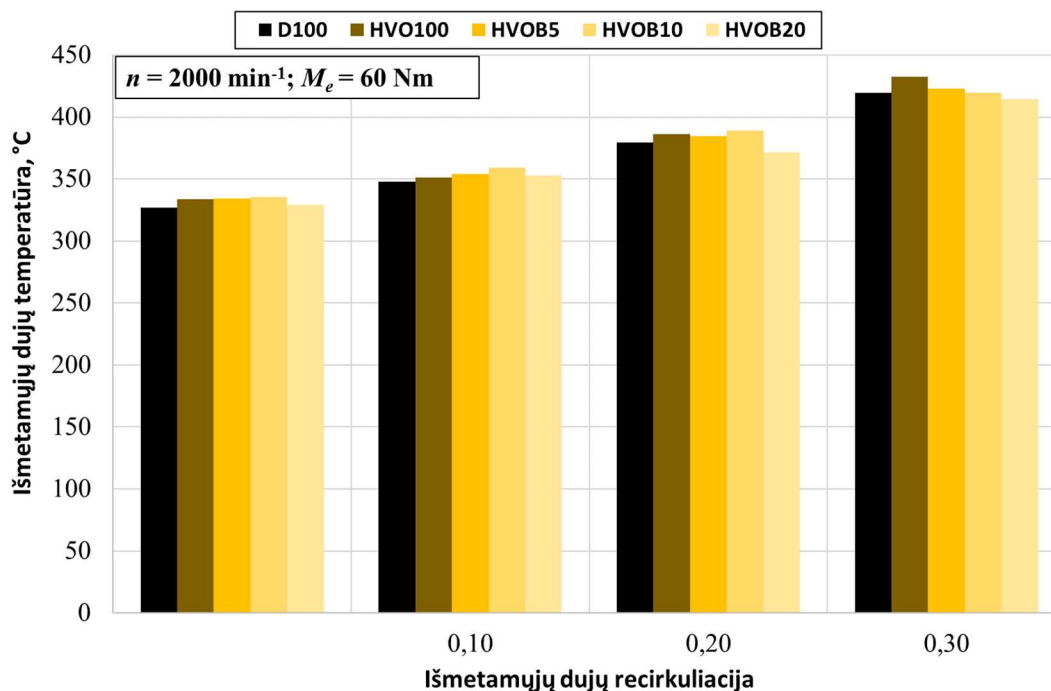
3.22 pav. Lyginamųjų degalų sąnaudų priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

Degalų tūrio sąnaudos skiriasi nuo masės sąnaudų, nes HVO100 tankis yra ~6 % mažesnis ir HVO100 tūrio sąnaudos yra 5 % didesnės, palyginti su D100 (2.1 lentelė). Biobutanolio priedas HVO dėl didesnio deguonies kiekio, kuris mažina žemutinį šilumingumą, padidina degalų valandines tūrio sąnaudas (3.23 pav.). HVOB20 valandinės degalų tūrio sąnaudos dėl sumažėjusio šilumingumo yra ~8 % didesnės, palyginti su D100. Degalų sąnaudos auga ir didėjant EGR, ypač pasiekus 30 % ribą.



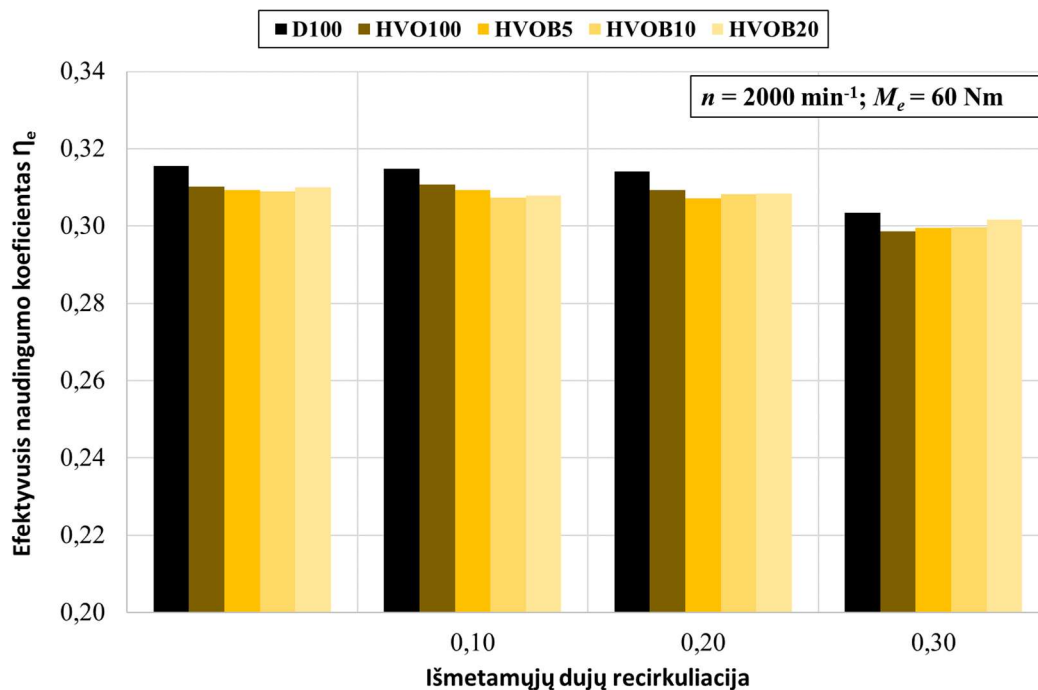
3.23 pav. Valandinių degalų tūrio sąnaudų priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

Išmetamųjų dujų temperatūra priklauso nuo degimo proceso. Be EGR aukščiausia išmetamųjų dujų temperatūra buvo HVO100, HVOB5, HVOB10 ir siekė $\sim 334^\circ\text{C}$ (3.24 pav.). D100 išmetamųjų dujų temperatūra buvo mažesnė $\sim 8^\circ\text{C}$. Didinant EGR išmetamųjų dujų temperatūra didėjo, ypač HVO100 kuri siekė $\sim 432^\circ\text{C}$, EGR esant 0,30. Tačiau galima pastebėti, kad padidinus biobutanolio koncentraciją iki HVOB20, temperatūra pradeda mažėti, o naudingumo koeficientas (3.25 pav.) didėti todėl, kad biobutanolis turi daugiau deguonies, kuris spartina degimą.



3.24 pav. Išmetamųjų dujų temperatūros priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

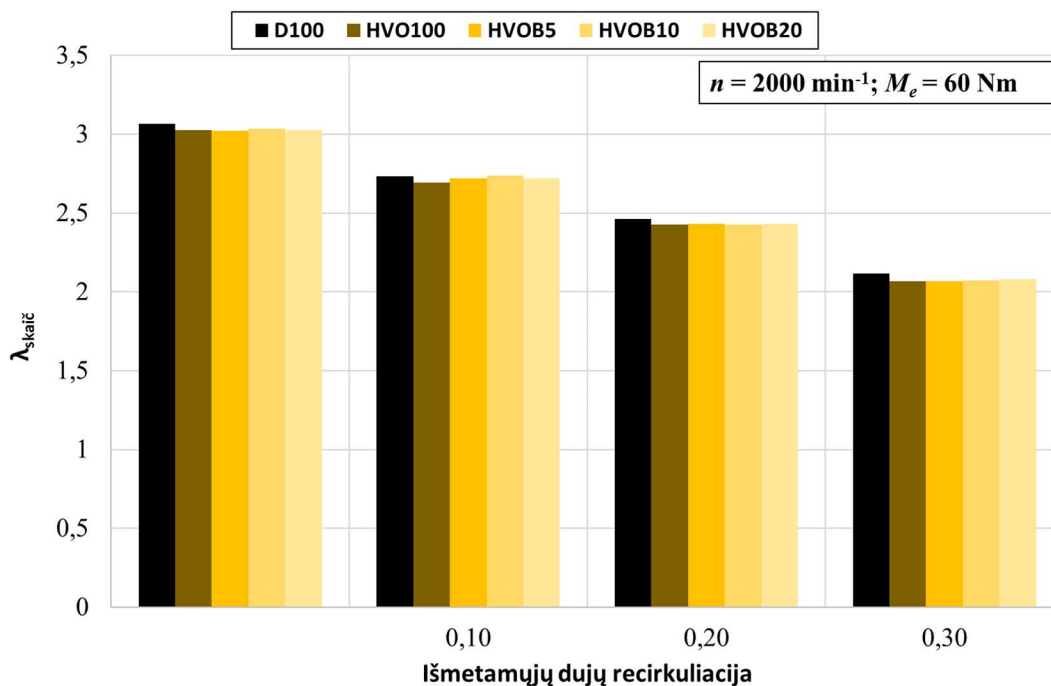
Didžiausias efektyvusis naudingumo koeficientas (η_e) visais EGR atvejais pasiekiamas, kai variklis veikia D100. Naudojant HVO100, η_e sumažėja, nors šių degalų masės sąnaudos yra mažiausios, bet jų šilumingumas didžiausias. Visų tirtų degalų η_e mažai kinta, EGR didinant nuo 0 iki 0,20 (3.25 pav.). Kai EGR 0,20, biobutanolio koncentraciją didinant iki 20 %, η_e rezultatas gerėja. Kai EGR 0,30, dėl mažesnio deguonies kiekio degimo proceso metu efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėja D100 $\sim 4\%$, HVO 100 $\sim 4\%$, HVOB20 $\sim 3\%$. Dėl didesnio deguonies kiekio biobutanolyje, HVOB20, kai EGR 0,30, efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėjo mažiausiai.



3.25 pav. Efektyviojo naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

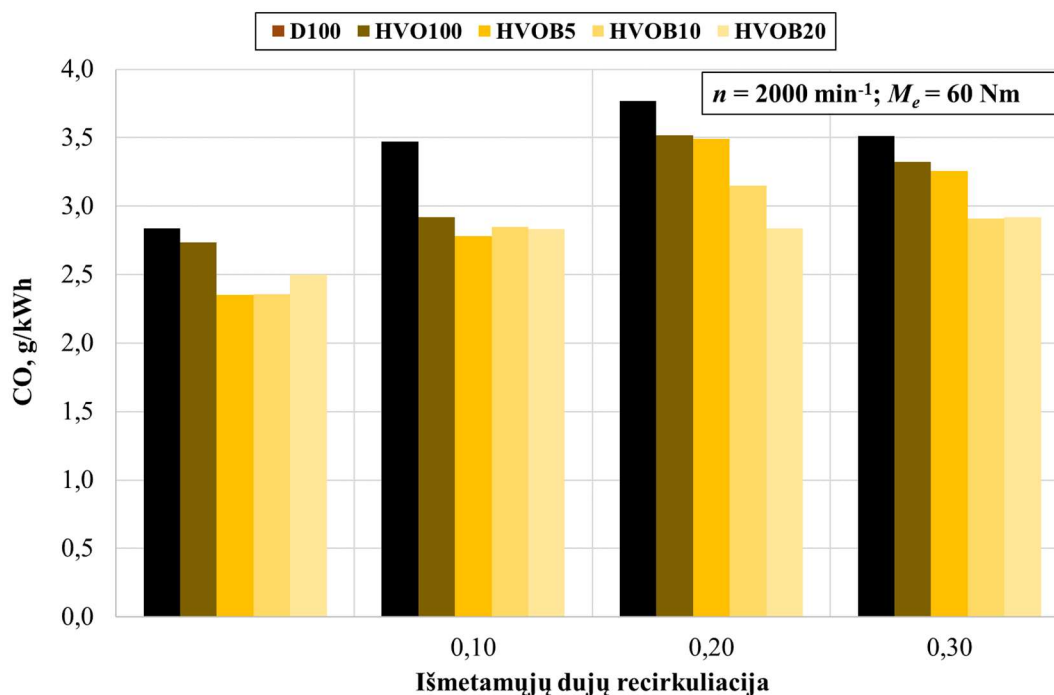
Ekologiniai rodikliai

Didinant EGR atidarymą galima pastebėti, kad oro perteklius (skaičiuotas, atsižvelgiant į degalų sudėtį) mažėja, nes įsiurbiamas mažiau šviežio oro (3.26 pav.). HVO100 oro perteklius sumažėja lyginant su D100 todėl, kad dėl savo sudėties HVO turi daugiau vandenilio (2.1 lentelė), negu D100, o vandeniliui sudegti reikia daugiau deguonies. HVO priedai su biobutanoliu didina oro perteklių, nes biobutanolio sudėtyje yra deguonies.



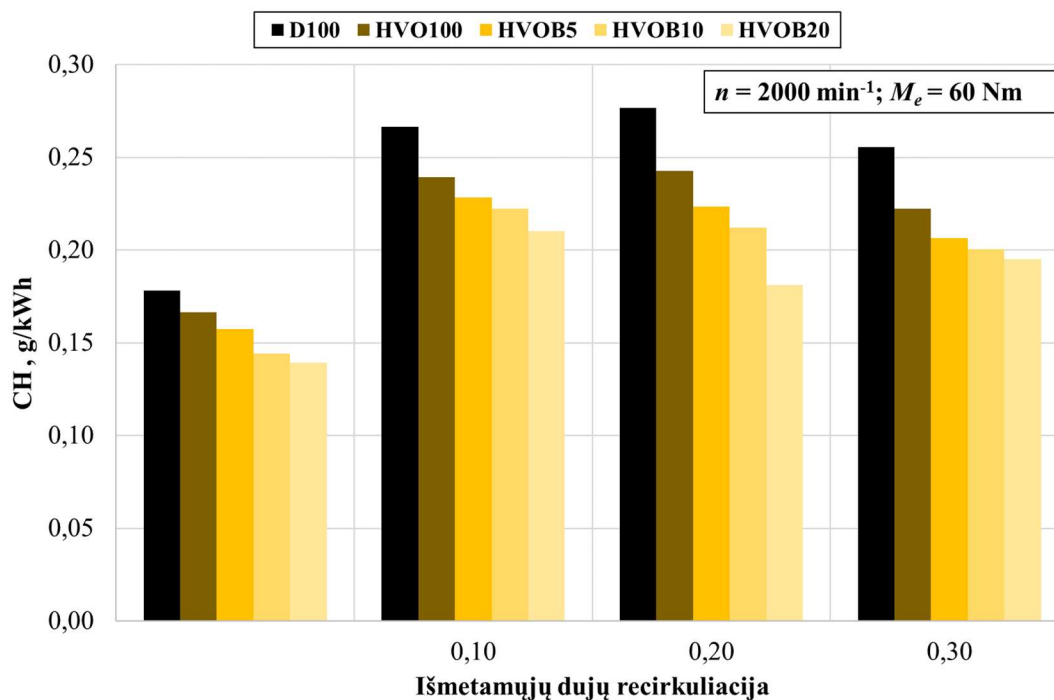
3.26 pav. Apskaičiuoto oro pertekliaus koeficiento priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

D100 daugiausiai išskiria anglies monoksido išmetamosiose dujose (3.27 pav.). Kai EGR išjungtas, D100 CO koncentracija siekia 2,84 g/kWh, HVO100 – 2,74 g/kWh, o HVOB5 ir HVOB10 CO koncentracija yra ~17 % mažesnė, palyginti su D100, dėl C/H santykio, nes šiuose degaluose bei mišiniuose yra mažiau anglies, daugiau vandenilio (2.1 lentelė). Ryškesnis skirtumas, kuris siekia ~25 % stebimas tarp D100 ir HVOB20, EGR esant 0,20. Didinant EGR, CO koncentracija padidėja dėl blogesnio degimo, nes sumažėjusi deguonies koncentracija ir CO₂ slopina degimą, kuris vyksta žemesnėje temperatūroje.



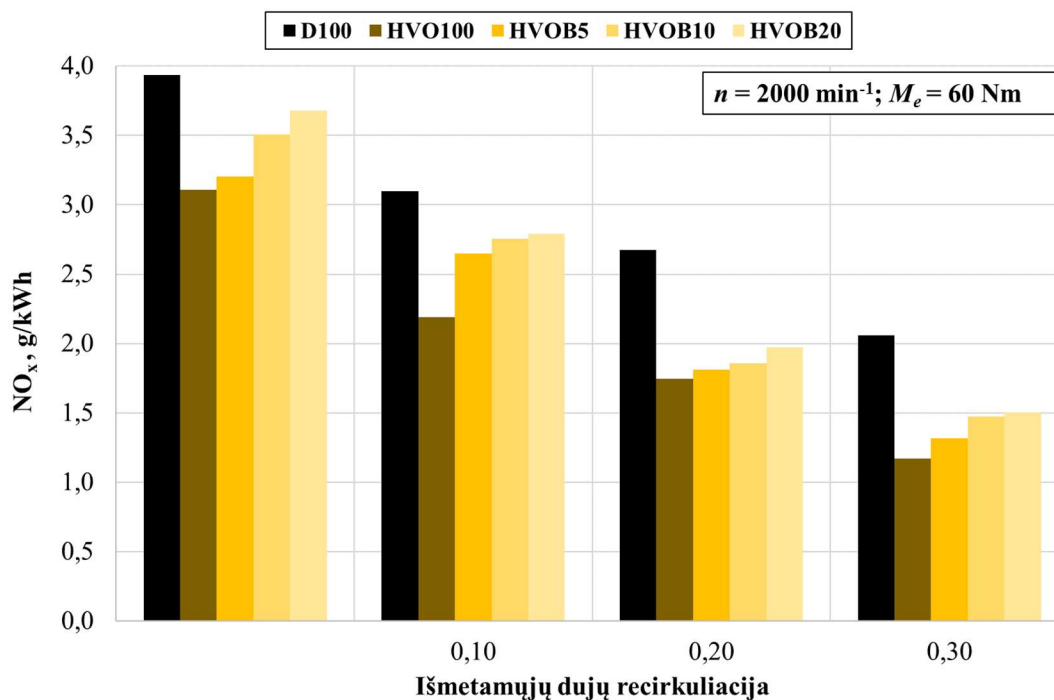
3.27 pav. Anglies monoksido išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

Be EGR didžiausia CH koncentracija yra D100, ji siekia 0,18 g/kWh. Naudojant HVO ir biobutanolio mišinius, CH koncentracija mažėja dėl paprastesnės biodegalų molekulinės struktūros. EGR naudojimas gerokai didina CH koncentraciją visuose tirtuose degaluose (3.28 pav.). EGR padidinus iki 0,20, CH koncentracija D100 padidėja ~35 %, HVO100 ~29 %, HVOB5 ~27 %, HVOB10 ~33 %, HVOB20 ~22 %, nes dėl sumažėjusios deguonies koncentracijos mažėja degimo temperatūra. Biobutanolyje esantis deguonis gerina degimą, mažina CH ir geriausias efektas pastebimas, kai EGR 0,20, o biobutanolio koncentracija siekia 20 %. EGR padidinus iki 0,30, pastebimas CH nežymus skirtumas D100 ir kituose biodegaluose, nes intensyvėja degimas difuzinėje degimo fazėje ir angliavandenilių oksidacija neblogėja.



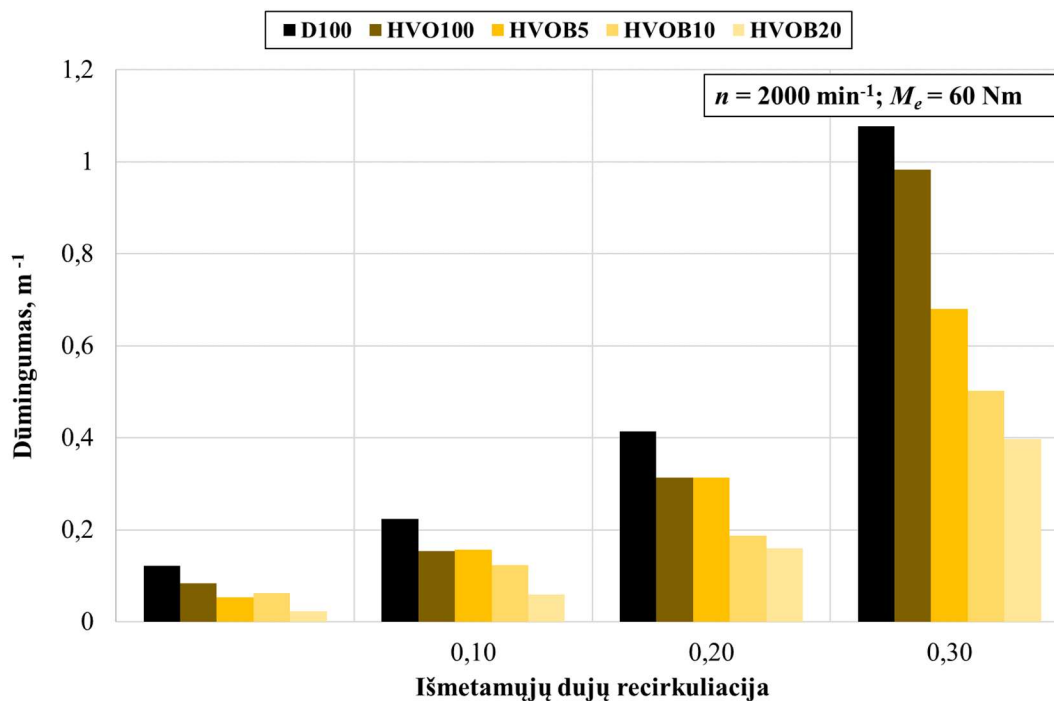
3.28 pav. Angliavandenilių kiekio išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

Be EGR didžiausia NO_x koncentracija yra D100 ir siekia 3,9 g/kWh. NO_x koncentraciją lemia degimo temperatūra ir laisvos deguonies kiekis degimo metu. Naudojant HVO, NO_x koncentracija sumažėja ~20 % (3.29 pav.), nes HVO turi aukštesnį cetaninį skaičių. Tai sutrumpina HVO užsiliepsnojimo gaišties fazę ir sumažina šilumos išsiskyrimo intensyvumą kinetinėje degimo fazėje (3.35 pav.). Didėjant biobutanolio koncentracijai HVO, NO_x koncentracija didėja dėl mažėjančio cetaninio skaičiaus ir deguonies, kurie gerina degimą. EGR mažina NO_x koncentraciją, ypač naudojant HVO. Tikėtina, kad dėl išaugusios degimo trukmės (B priedas) padidėja išmetamųjų dujų temperatūra (3.23 pav.) ir tai padidina temperatūrą suspaudimo takto pabaigoje, kas trumpina gaišties fazę. Padidinus EGR nuo 0 iki 0,30, D100 NO_x koncentracija sumažėja ~48 %, HVO100 - ~62 %, HVOB20 - ~59 %. Mažiausia NO_x koncentracija yra HVO100 - 1,17 g/kWh, kai EGR 0,30.



3.29 pav. Azoto oksidų kiekio išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

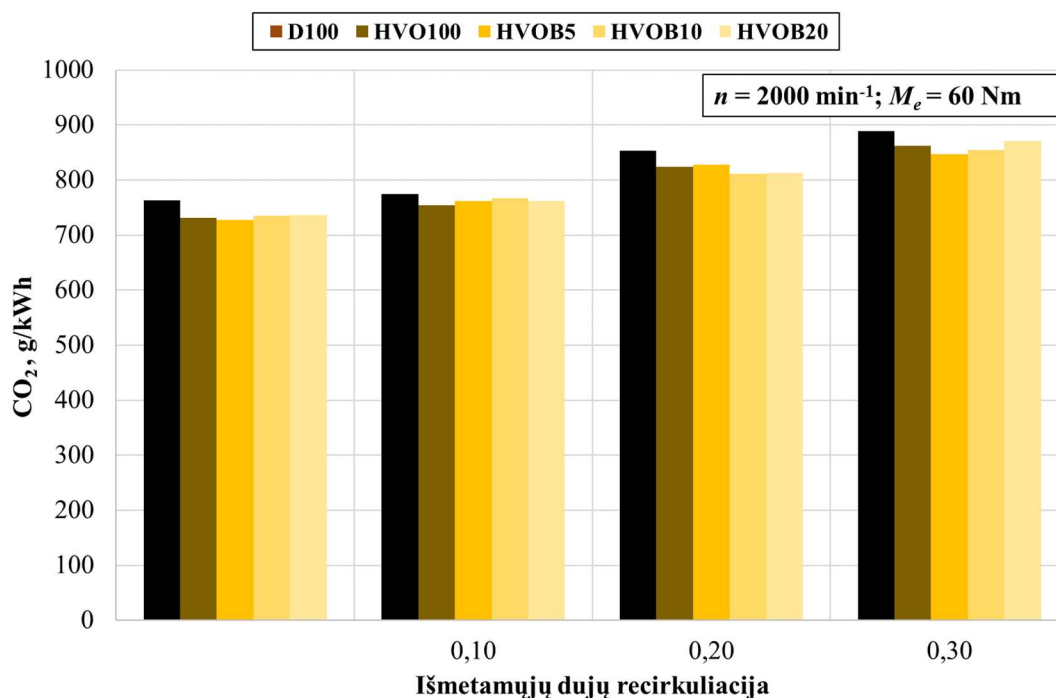
Naudojant D100, pasiekiamas gausiausias dūmingumas dėl didžiausio C/H santykio ir sudėtingesnės molekulinės struktūros. Pasirinkus HVO100 be EGR, dūmingumas mažėja ~30 %, naudojant HVOB20 – ~80 % lyginant su D100 (3.30 pav.).



3.30 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

EGR 0,30 naudojimas 8 kartus padidina D100 dūmingumą, HVO – 12 kartų, HVOB20 – 13 kartų, nes degimas vyksta žemesnėje temperatūroje, esant mažesnei deguonies koncentracijai. Biobutanolio priedas sumažina dūmingumą, nes padidina O_2 koncentraciją. Naudojant HVOB20, kai EGR 0,20, dūmingumas padidėja nedaug, palyginti su D100, kai EGR 0.

D100 išskiria didžiausią CO_2 emisiją dėl didžiausio C/H santykio, palyginti su biodegalais. Degimo proceso metu, įjungus EGR, į cilindrą grįžta nemaža dalis CO_2 , kuri nedega, tačiau padidina CO_2 koncentraciją išmetamosiose dujose (3.31 pav.).



3.31 pav. Anglies dioksido išmetamosiose dujose priklausomybė nuo išmetamųjų dujų recirkuliacijos

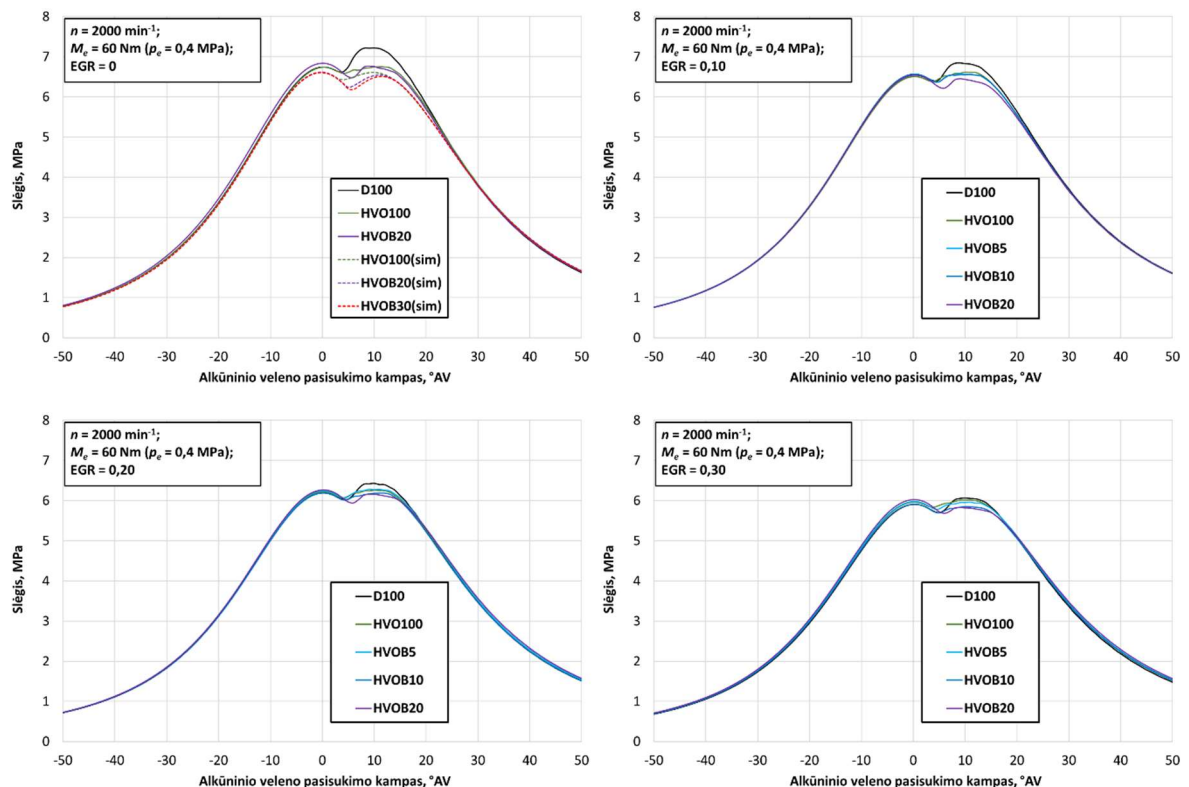
Įjungus EGR 0,30, varikliui veikiant, CO_2 koncentracija padidėja ~15 %. Kai EGR 0,30, HVOB20 didina CO_2 koncentraciją dėl geresnio degimo, tačiau, kai EGR 0,20, biobutanolis CO_2 koncentraciją mažina.

4. DEGIMO PROCESO MATEMATINIS MODELIAVIMAS

Šiame skyriuje pateikiami degimo proceso skaitinės analizės rezultatai, skaitinio modelio validavimas ir skaitinio tyrimo didinant biobutanolio koncentraciją rezultatai.

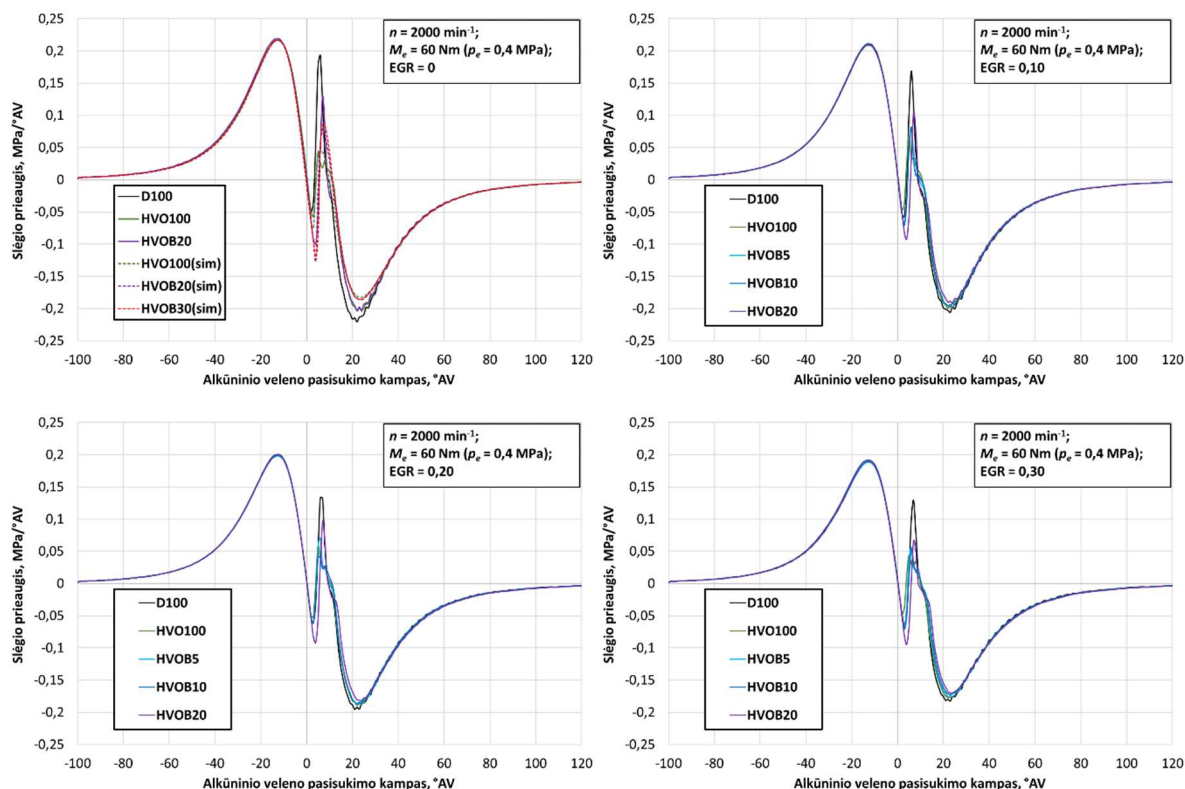
4.1 Degimo proceso skaitinė analizė

Atlikus degimo proceso skaitinę analizę buvo gauti variklio rodiklių rezultatai, kurie pateikiami 4.32–4.35 pav. Čia pateikiami ir skaitinio simuliacijos rezultatai, kurie patvirtina (validuoja) variklio skaitinio modelio patikimumą.



4.32 pav. Slėgio priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, °AV

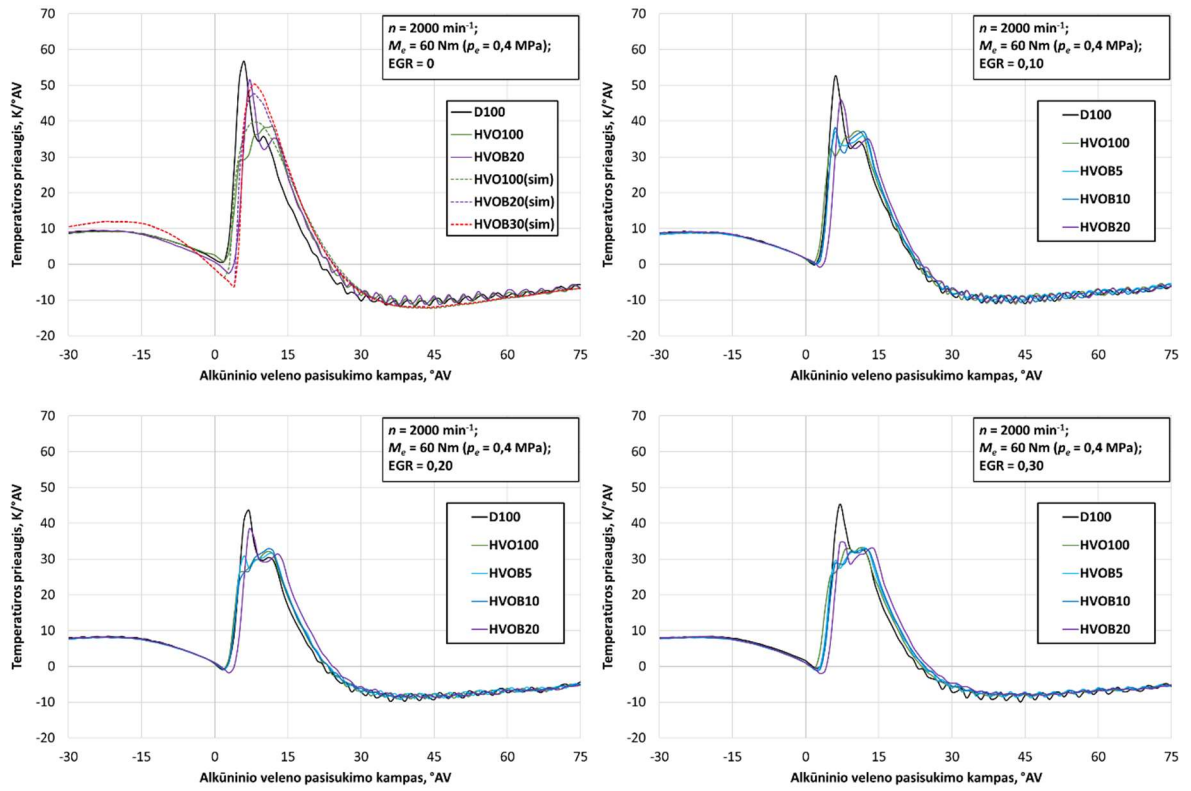
Visų tirtų degalų degimo gaisties fazė be EGR išliko artima (4.32 pav.). Didžiausias slėgis, EGR esant 0, yra 7,2 MPa. D100. Didėjant EGR, mažėja slėgis cilindre tiek D100, tiek ir kitų tirtų degalų. Esant EGR 0,30 D100 slėgis pasiekia 6 MPa. Skirtumas slėgio cilindre D100 nuo EGR 0 iki EGR 0,30 yra 1,2 MPa., nes grąžintose išmetamosiose dujose yra per mažas deguonies kiekis, o tai turi įtakos degimo procesui. HVO100 esant EGR 0 slėgis cilindre siekia 6,7 MPa, o esant EGR 0,30, HVO100 slėgis 6 MPa. Biobutanolio priedas hidrintame augaliniame aliejuje slėgį cilindre nežymiai didino esant EGR 0, o didėjant EGR slėgį cilindre mažino.



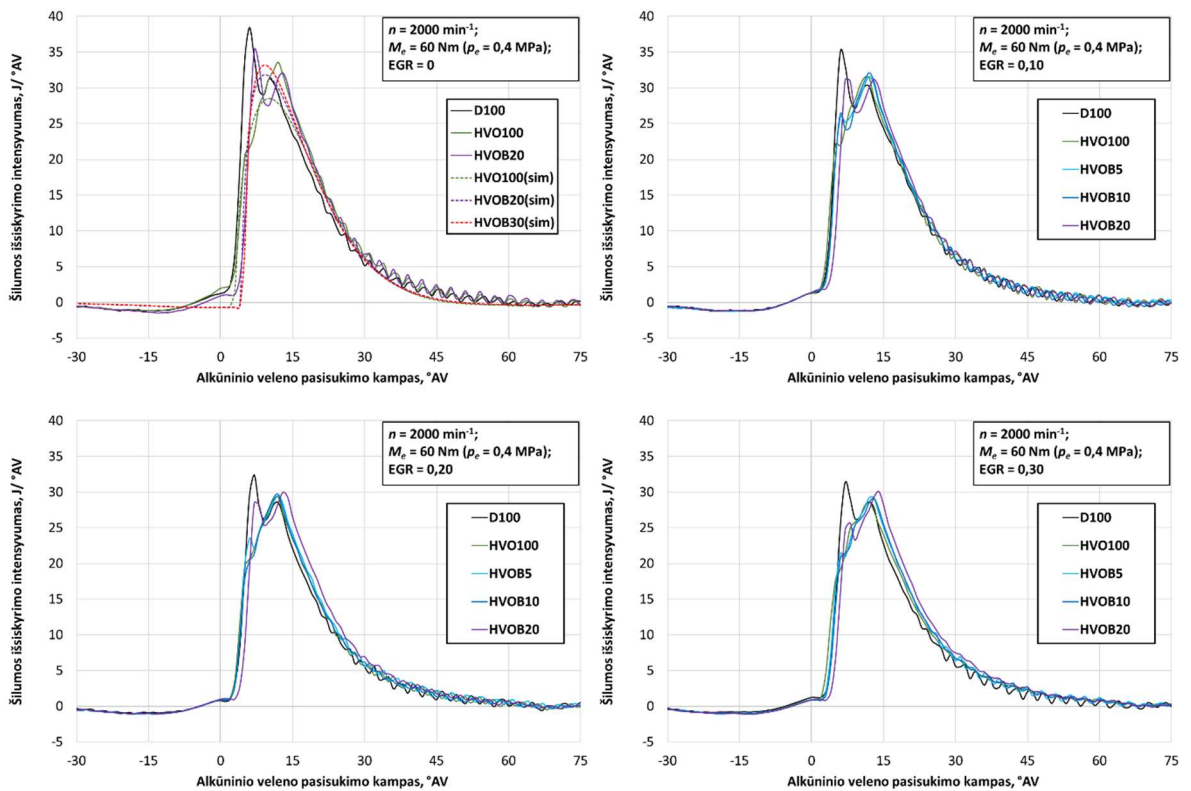
4.33 pav. Slėgio augimo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV

Esant EGR 0, slėgis sparčiausiai didėjo D100, o tuo pat metu HVO100 slėgis didėjo mažiausiai (4.33 pav.). Biobutanolio priedai hidrintame augaliniame aliejuje didino slėgio kilimą t. y. kuo didesnė butanolio koncentracija mišinyje, tuo labiau slėgis augo. Didėjant EGR, slėgio kilimo tendencija išlieka ta pati, o slėgio kilimas pasiekia mažesnes reikšmes.

Didžiausias temperatūros augimas stebimas D100, o mažiausias HVO100 (4.34 pav.). Biobutanolio priedas didina temperatūros augimą: kuo didesnė biobutanolio koncentracija, tuo ilgesnė degimo vėlavimo fazė, o temperatūra kinetinėje degimo fazėje dėl susikaupusių degalų kyla labiau, ypač esant EGR 0 – 0,20. Didėjant EGR, mažėja visų tirtų degalų rūšių temperatūros augimas, o ypač HVOB20 mišinyje. Aukštas temperatūros išsiskyrimas kinetinėje degimo fazėje D100 ir HVOB20 lemia didelę NO_x emisiją. HVO100 kinetinėje degimo fazėje išskiriama temperatūra yra mažesnė už išskirtą difuzinėje degimo fazėje, veikiant skirtingiems EGR. Tokiu atveju susidaro mažesni kenksmingų medžiagų kiekiai.



4.34 pav. Temperatūros augimo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV



4.35 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo, ° AV

HVO100 degimo vėlavimo fazė, be EGR, yra trumpiausia, lyginant su kitais degalais, o šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje mažiausias, bet difuzinėje degimo fazėje pasiekia $33 \text{ J/}^\circ\text{AV}$ (4.35 pav.). Panaši tendencija stebima ir kitų tyrėjų atliktame tyrime (Shepel et al., 2021). Toks šilumos išsiskyrimo intensyvumas difuzinėje degimo fazėje geriau išdegina susidariusius suodžius degimo metu. D100 kinetinėje degimo fazėje be EGR pasiekia aukščiausią reikšmę iš visų tirtų degalų $38 \text{ J/}^\circ\text{AV}$, o difuzinėje degimo fazėje pasiekia $31 \text{ J/}^\circ\text{AV}$. Tokio degimo proceso metu susidaro didesnė azoto oksidų emisija. HVO su biobutanolio priedu ilgina degimo vėlavimo fazę, dėl to šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje yra didesnis nei gryno HVO. Kuo didesnė biobutanolio koncentracija hidrintame augaliniame aliejuje, tuo didesnis šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje pvz., HVOB20 pasiekia $35 \text{ J/}^\circ\text{AV}$. Difuzinėje degimo fazėje HVOB20 šilumos išsiskyrimo intensyvumas nepasiekė kinetinės degimo fazės reikšmės, be EGR, nes dėl sumažėjusio degalų šilumingumo (2.1 lentelė) reikalingas didesnis degalų kiekis, kuris purškiamas ilgiau.

Didėjant EGR mažėja šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje tiek D100, tiek ir kitų degalų. Esant EGR 0,30 labai išryškėja degimo vėlavimo fazė: HVOB5 mišinys dėl didesnio šilumingumo šilumos išsiskyrimas vyksta anksčiau ir intensyviau nei kitų degalų, o ypač HVOB20. Vėlyvo degimo fazėje biodegalų šilumos išsiskyrimo intensyvumas vyksta tolygiau negu D100.

4.2 Degimo proceso skaitinio modelio validavimas ir skaitinis tyrimas didinant biobutanolio koncentraciją

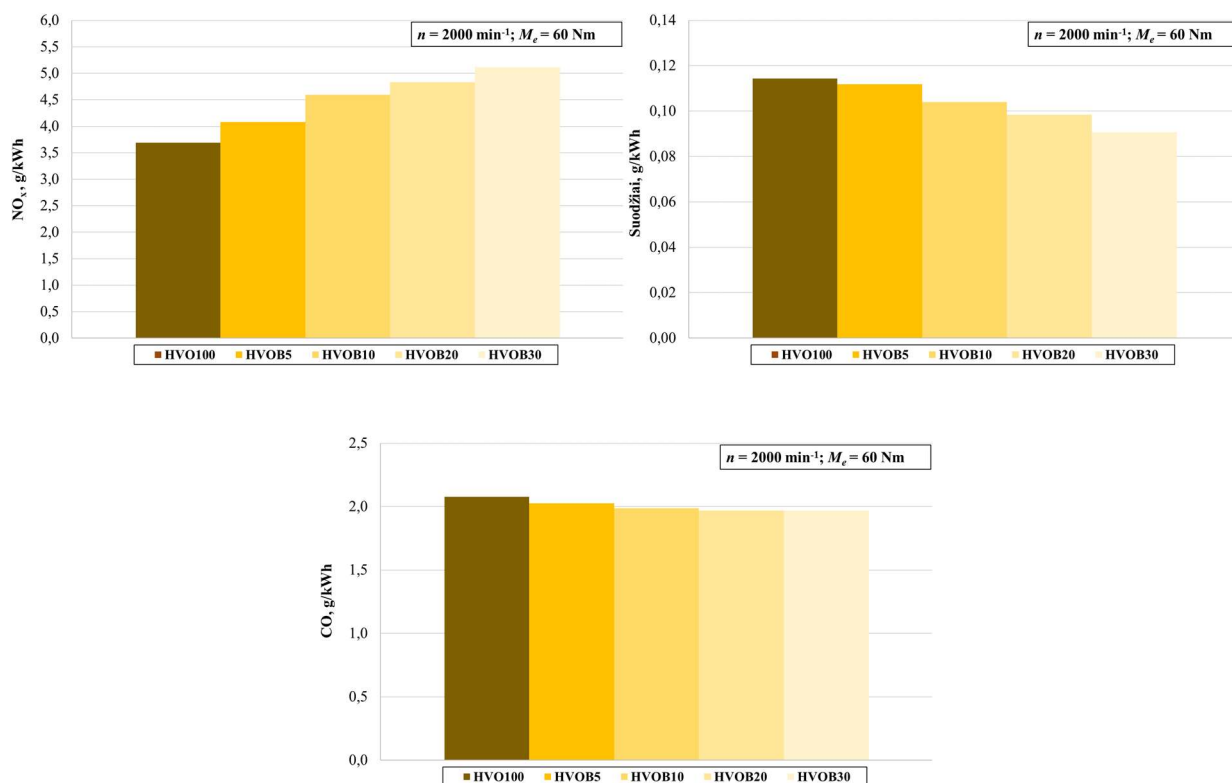
Pirmoje degimo proceso skaitinio tyrimo dalyje, validuojamas AVL programa sukurtas variklio skaitinis modelis. Naudojant *AVL Burn* paprogramę nustatytus degimo proceso rodiklius (B priedas) simuliuotas degimas naudojant degalus HVO100 ir HVOB20. 4.32–4.35 pav. pateikti simuliuoti rodikliai variklio cilindre (slėgis, slėgio prieaugis, temperatūros prieaugis, šilumos išsiskyrimas), kurių kitimo tendencijos yra artimos eksperimentiniams duomenims. Galima pastebėti tendenciją, kad naudojant hidrintą augalinį aliejų anksčiau prasideda degimas (4.35 pav.), o slėgis kyla ne taip intensyviai (4.32 pav.), kaip su biobutanolio priedu. Tačiau biobutanolio koncentracijai siekiant 30 %, degimas prasideda vėliau, o slėgio (4.33 pav.), ir temperatūros augimas (4.34 pav.) yra intensyvesni. Panašūs eksperimentinio ir skaitinio tyrimo rezultatai leidžia daryti išvadą, kad naudojamas skaitinis modelis yra korektiškas.

B priede pateiktos degimo proceso rodiklių kitimo tendencijos ir formulės skaičiuoti šiuos rodiklius praplečiant tyrimo ribas – didinant biobutanolio koncentraciją. Simuliacijos būdu gauti ekologiniai rodikliai pateikti 4.36 pav. Šios tendencijos yra analogiškos gautoms, tiriant iki 20 % biobutanolio eksperimentiškai (3.29, 3.30, 3.31 pav.). Didėjant biobutanolio koncentracijai

hidrintame augaliniaame aliejuje, ilgėja degalų vėlavimo fazė (4.35 pav.), kurios metu prisikaupia didesnis kiekis degalų, o šiems užsiliepsnojus, ir dėl biobutanolyje esamo papildomo deguonies kiekio, staigiai kyla šilumos išsiskyrimo intensyvumas, ir temperatūra kinetinėje degimo fazėje, dėl to išsiskiria didesnės azoto oksidų emisijos.

Aukštesnė degimo temperatūra, dėl didesnio deguonies kiekio degaluose ir mažesnio C/H santykio, mažina suodžių ir CO emisiją (4.36 pav.). Taip pat, pastebima tendencija, kad padidinus biobutanolio koncentraciją nuo 20 iki 30 % mišinyje, CO pokytis yra mažas, nes iš eksperimento žinoma, kad didėja degalų sąnaudos.

Remiantis eksperimento duomenimis, pastebėta, kad didinant EGR, mažėja azoto oksidų emisija, kuri didėjo dėl biobutanolio koncentracijos didėjimo, tačiau suodžių emisija padidėja gerokai daugiau. Atsižvelgiant į ekologinius rodiklius ir naudojant EGR, būtų išaugusi azoto oksidų emisija, bet ji mažėjo dėl biobutanolio priedo. Dėl EGR dūmingumas auga, bet biobutanolis jį mažina.



4.36 pav. Skaitinio tyrimo būdu nustatyta ekologinių rodiklių priklausomybė nuo biobutanolio koncentracijos mišinyje su HVO

Biobutanolio koncentraciją didinant iki 30 %, reikia papildomai tirti biobutanolio įtaką degalų tepumo savybėms, dėl kurių blogėjimo gali sutrumpėti variklio veikimo resursas. Bet kokių atveju, naudojant biobutanolio priedą, rekomenduotina papildomai naudoti tepumą didinančius priedus.

IŠVADOS

Slėginio uždegimo varikliui veikiant vidutine apkrova ir dyzeliną pakeitus įvairiais biodegalų mišiniais, keičiant EGR intensyvumą, gauti eksperimentinio ir skaitinio tyrimo rezultatai, kurie pateikti apibendrinančiose išvadose:

1. Dyzeliną pakeitus HVO ir biobutanolio (iki 20 % tūrio) mišiniais, sumažėja C/H santykis, žemutinis šilumingumas, tankis, tačiau padidėja deguonies koncentracija mišinyje. Tai lemia biodegalų mišinių išpurškimo ir degimo skirtumus. Aukštesnis HVO cetaninis skaičius mažina užsiliepsnojimo gaisrą, tačiau biobutanolis gaisrą didina, o tai didina šilumos išsiskyrimą kinetinėje degimo fazėje.
2. EGR sistemos naudojimas mažina šilumos išsiskyrimo greitį kinetinėje degimo fazėje, bet padidina difuzinėje degimo fazėje, o tai mažina NO_x koncentraciją išmetamosiose dujose. Didėjant EGR, dėl žemesnės degimo temperatūros ir mažesnės O₂ koncentracijos cilindre, gausėja dūmingumas. Tačiau HVOB20 degalų mišiniu veikiančio variklio, kai EGR 0,20 dūmingumas padidėja nežymiai, nes padidėja H₂ ir O₂ koncentracija degaluose. Kai EGR 0,30, dūmingumas gerokai padidėja, o NO_x emisijos sumažėjimas lyginant su D100 yra reikšmingas (~62 %).
3. EGR naudojimas blogina degimą ir didina CO, CH emisiją, kai variklis veikia tiriamais degalais, tačiau HVO degaluose esantis biobutanolio priedas, gerindamas oksidacijos procesą, mažina šių teršalų kiekį.
4. Didinant EGR intensyvumą, CO₂ emisija auga, nes dėl blogesnio degimo mažėja efektyvusis naudingumo koeficientas ir didėja degalų sąnaudos. Tačiau, naudojant HVO ir biobutanolio mišinį, CO₂ dujų emisiją reikia vertinti atsižvelgiant į biodegalų gyvavimo ciklą, kurio metu didelė dalis CO₂ absorbuojama biomasės augimo metu.
5. Kompleksiškai vertinant eksperimentinį ir degimo proceso skaitinio modeliavimo tyrimą, nustatyta, kad analizuojamam variklio veikimo režimui (sukimosi greitis 2000 min⁻¹, apkrova 60 Nm, vidutinis efektyvusis slėgis 0,4 MPa), naudojant biodegalų mišinį HVOB20, kai EGR 0,20, NO_x emisija sumažinama reikšmingai, o dūmingumas padidėja nežymiai lyginant su D100, kai EGR išjungtas. Šiuo atveju variklio energetinis efektyvumas yra ~2,5 % mažesnis, lyginant su D100. Biobutanolio koncentraciją hidrintame augaliniame aliejuje didinti daugiau kaip 20 %, ir deginių recirkuliacijos koeficientą didinti daugiau nei 0,20, nerekomenduojama dėl mažėjančio naudingumo koeficiento ir augančio dūmingumo.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Europos aplinkos agentūra. (s.a.). [Puslapis]. Gauta 2021 m. gruodžio 29 d., <https://www.eea.europa.eu/lt/themes/transport/intro>
- Europos žaliasis kursas*. (s.a.). [Puslapis]. Europos Komisija - European Commission. Gauta 2021 m. lapkričio 3 d., https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_lt
- Felneris, M., Raslavičius, L., Pukalskas, S., & Rimkus, A. (2021). Assessment of Microalgae Oil as a Carbon-Neutral Transport Fuel: Engine Performance, Energy Balance Changes, and Exhaust Gas Emissions. *Sustainability*, 13(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/su13147878>
- Goga, G., Chauhan, B. S., Mahla, S. K., & Cho, H. M. (2019). Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. *Energy Reports*, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.12.002>
- Hartikka, T., Kuronen, M., & Kiiski, U. (2012). *Technical Performance of HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) in Diesel Engines*. 2012-01–1585. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1585>
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (Second edition). McGraw-Hill Education.
- Killol, A., Reddy, N., Paruvada, S., & Murugan, S. (2019). Experimental studies of a diesel engine run on biodiesel n-butanol blends. *Renewable Energy*, 135, 687–700. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.011>
- Liang, J., Zhang, Q., Chen, Z., & Zheng, Z. (2021). The effects of EGR rates and ternary blends of biodiesel/n-pentanol/diesel on the combustion and emission characteristics of a CRDI diesel engine. *Fuel*, 286, 119297. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119297>
- Mohiuddin, K., Kwon, H., Choi, M., & Park, S. (2021). Effect of engine compression ratio, injection timing, and exhaust gas recirculation on gaseous and particle number emissions in a light-duty diesel engine. *Fuel*, 294, 120547. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120547>
- Mourad, M., Mahmoud, K. R. M., & NourEldeen, E.-S. H. (2021). Improving diesel engine performance and emissions characteristics fuelled with biodiesel. *Fuel*, 302, 121097. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121097>
- Nour, M., Attia, A. M. A., & Nada, S. A. (2019). Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 185, 313–329. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.105>

Parravicini, M., Barro, C., & Boulouchos, K. (2021). Experimental characterization of GTL, HVO, and OME based alternative fuels for diesel engines. *Fuel*, 292, 120177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120177>

Puricelli, S., Cardellini, G., Casadei, S., Faedo, D., van den Oever, A. E. M., & Grosso, M. (2021). A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110398>

Reif, K. (2014). *Diesel engine management: Systems and components* (1st edition). Springer Berlin Heidelberg.

Rimkus A. 2022. Vidaus degimo variklių paskaitų konspektas. Vilniaus Gedimino Technikos universitetas.

Rimkus, A., Stravinskas, S., & Matijošius, J. (2020). Comparative Study on the Energetic and Ecologic Parameters of Dual Fuels (Diesel–NG and HVO–Biogas) and Conventional Diesel Fuel in a CI Engine. *Applied Sciences*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/app10010359>

Rimkus, A., Vipartas, T., Matijošius, J., Stravinskas, S., & Kriauciūnas, D. (2021). Study of Indicators of CI Engine Running on Conventional Diesel and Chicken Fat Mixtures Changing EGR. *Applied Sciences*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/app11041411>

Shepel, O., Matijošius, J., Rimkus, A., Duda, K., & Mikulski, M. (2021). Research of Parameters of a Compression Ignition Engine Using Various Fuel Mixtures of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Fatty Acid Esters (FAE). *Energies*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/en14113077>

Shi, X., Liu, B., Zhang, C., Hu, J., & Zeng, Q. (2017). A study on combined effect of high EGR rate and biodiesel on combustion and emission performance of a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1272–1279. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.083>

Trindade, W. R. da S., & Santos, R. G. dos. (2017). Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 642–651. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.213>

Tutak, W., Jamrozik, A., & Grab-Rogaliński, K. (2021). The Effect of RME-1-Butanol Blends on Combustion, Performance and Emission of a Direct Injection Diesel Engine. *Energies*, 14(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/en14102941>

Valeika, G., Matijošius, J., Górski, K., Rimkus, A., & Smigins, R. (2021). A Study of Energy and Environmental Parameters of a Diesel Engine Running on Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) with Addition of Biobutanol and Castor Oil. *Energies*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en14133939>

PRIEDAI

A priedas

A1 lentelė. Gryno dyzelino, HVO, biobutanolio savybės (Valeika et al., 2021)

Parametras	Dyzelinas	HVO	Biobutanolis
Tankis esant 15 °C, kg/m ³	830,4	780	810
Anglies kiekis, % m/m	86,20	84,55	65
Vandenilio kiekis, % m/m	13,80 val.	15,45 val.	13,50 val.
Deguonies kiekis, % m/m	0	0	21,50 val.
Cetaninis skaičius	51	70	18
Mažesnė šildymo vertė, MJ/kg	43,1	44,1	33
Mažesnė šiluminė vertė, MJ/l	36,09	34,17	26,73
Grynumas, %	-	-	99,5

B priedas

B1 lentelė. Degimo proceso analizės rodikliai (sudaryta darbo autoriaus)

EGR	Rodikliai	D100	HVO100	HVOB5	HVOB10	HVOB20	Rodiklio skaičiavimo formulė	HVOB30
EGR 0	Degalų sąnaudos, kg/h	3,33	3,31	3,36	3,41	3,49	$y = -0,0001x^2 + 0,0116x + 3,307$	3,57
	Oro sąnaudos, kg/h	151,06	151,95	152,14	152,30	152,19	$y = -0,0021x^2 + 0,055x + 151,94$	151,70
	Įpurškimo pradžia, °AV	3,43	1,57	1,55	1,52	1,49	$y = 9E-05x^2 - 0,0057x + 1,5692$	1,48
	Gaištis, ° AV	6,55	4,61	5,12	5,50	6,20	$y = -0,0011x^2 + 0,1008x + 4,6166$	6,65
	Degimo pradžia, °AV	3,12	3,04	3,57	3,98	4,71	$y = -0,0012x^2 + 0,1065x + 3,0474$	5,16
	m	0,271	0,501	0,414	0,407	0,33	$y = 0,0002x^2 - 0,0125x + 0,4927$	0,30
	100 %SMD	61,2	55,8	57,1	57,8	57,6	$y = -0,0111x^2 + 0,3115x + 55,805$	55,16
EGR 0,10	Degalų sąnaudos, kg/h	3,33	3,30	3,36	3,43	3,52	$y = -0,0002x^2 + 0,0141x + 3,3003$	3,54
	Oro sąnaudos, kg/h	134,80	136,72	137,10	137,35	137,19	$y = -0,0039x^2 + 0,1012x + 136,71$	136,24
	Įpurškimo pradžia, °AV	3,33	1,90	1,77	1,70	1,68	$y = 0,0009x^2 - 0,0296x + 1,8976$	1,82
	Gaištis, °AV	6,77	5,56	5,73	5,80	6,02	$y = -0,0003x^2 + 0,0276x + 5,5696$	6,13
	Degimo pradžia, °AV	3,44	3,66	3,96	4,1	4,34	$y = -0,0012x^2 + 0,0572x + 3,672$	4,31
	m	0,305	0,471	0,458	0,432	0,37	$y = -0,0001x^2 - 0,0025x + 0,4718$	0,31
	100 %SMD	62,1	59	60	59,9	59	$y = -0,0102x^2 + 0,1989x + 59,071$	55,86
EGR 0,20	Degalų sąnaudos, kg/h	3,34	3,32	3,38	3,42	3,51	$y = -9E-05x^2 + 0,0113x + 3,3202$	3,58
	Oro sąnaudos, kg/h	121,91	122,15	122,40	122,43	122,38	$y = -0,0019x^2 + 0,0482x + 122,16$	121,90
	Įpurškimo pradžia, °AV	3,23	1,70	1,70	1,67	1,67	$y = 9E-05x^2 - 0,0038x + 1,7045$	1,67
	Gaištis, °AV	7,23	5,16	5,34	5,48	6,19	$y = 0,0017x^2 + 0,0161x + 5,1755$	7,19
	Degimo pradžia, °AV	4	3,46	3,64	3,81	4,52	$y = 0,0016x^2 + 0,0199x + 3,4709$	5,51
	m	0,24	0,386	0,366	0,376	0,365	$y = 5E-05x^2 - 0,0018x + 0,3827$	0,37
	100 %SMD	63,7	59	60,8	60	59,5	$y = -0,0115x^2 + 0,2397x + 59,243$	56,08

B1 lentelės pabaiga

EGR	Rodikliai	D100	HVO100	HVOB5	HVOB10	HVOB20	Rodiklio skaičiavimo formulė	HVOB30
EGR 0,30	Degalų sąnaudos, kg/h	3,46	3,44	3,47	3,52	3,59	$y = -3E-05x^2 + 0,0083x + 3,4348$	3,66
	Oro sąnaudos, kg/h	108,30	107,34	107,50	107,52	107,03	$y = -0,0033x^2 + 0,0503x + 107,34$	105,88
	Įpurškimo pradžia, °AV	3,33	1,65	1,60	1,57	1,47	$y = -5E-05x^2 - 0,0081x + 1,6477$	1,36
	Gaištis, °AV	7,52	5,24	5,66	5,90	6,48	$y = -0,0007x^2 + 0,0743x + 5,2579$	6,86
	Degimo pradžia, °AV	4,19	3,59	4,06	4,33	5,01	$y = -0,0006x^2 + 0,0824x + 3,6102$	5,54
	m	0,239	0,333	0,345	0,33	0,332	$y = -3E-05x^2 + 0,0003x + 0,3361$	0,32
	100 %SMD	65,7	64	65,8	64,8	64	$y = -0,0124x^2 + 0,2298x + 64,262$	59,99

SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIO RODIKLIŲ ANALIZĖ NAUDOJANT ĮVAIRIŲ BIODEGALŲ MIŠINIUS IR KEIČIANT IŠMETAMŲJŲ DUJŲ RECIRKULIACIJOS INTENSIVUMĄ

Dovydas Mačiulis¹, Alfredas Rimkus^{1,2}, Jonas Matijošius^{1,2}

¹Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius

²Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, Antakalnio g. 54, LT-10303 Vilnius

Anotacija. Straipsnyje analizuojamas vidaus degimo variklio veikimas, naudojant įvairius hidrinto augalinio aliejaus (angl. *Hydrotreated Vegetable Oils* – HVO) ir biobutanolio mišinius, išmetamųjų dujų recirkuliacijos (angl. *Exhaust Gas Recirculation* – EGR) poveikis nepilno degimo produktų (CO , CH), azoto oksidų (NO_x), šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO_2) ir dūmingumo emisijai. Eksperimentinio tyrimo metu, keičiant EGR intensyvumą, ieškota optimalaus biodegalų mišinio, kuris išlaikytų aukštą variklio veikimo šiluminį efektyvumą ir sumažintų kenksmingų medžiagų išsiskyrimą. Nustatyta, kad varikliui veikiant 80 proc. HVO ir 20 proc. biobutanolio mišiniu, kai EGR 0,20, pasiekiamas reikšmingas NO_x koncentracijos mažėjimas, nedaug kinta dūmingumas ir kitų teršalų emisija. Pasirinkus biodegalų mišinį ir įvertinus degalų gyvavimo ciklą, galima teigti, kad CO_2 emisija mažėja.

Reikšminiai žodžiai: hidrintas augalinis aliejus, biobutanolis, išmetamųjų dujų recirkuliacija, iškastinis dyzelinas, slėginio uždegimo variklis.

Įvadas

Nuo XIX a., kai buvo išrastas vidaus degimo variklis, iki šių dienų transporto priemonių skaičius pasaulyje išaugo apytikriai iki milijardo vienetų. Opiausia problema yra tai, kad automobilių išmetamųjų dujų ir kietųjų dalelių emisija tiesiogiai kenkia žmonių sveikatai, sukelia šiltnamio efektą. Mokslininkai dirba siekdami sumažinti transporto taršą.

Atliekant mokslinius tyrimus, sukurtos įvairios biodegalų rūšys. Degalai gaminami ne tik iš iškastinių žaliavų, bet ir iš atsinaujinančių išteklių. Degalų kūrimo proceso metu mokslininkai kartu tobulina ir degimo procesą, norėdami pasiekti efektyvų variklio darbą mažiausiomis degalų sąnaudomis, pritaiko EGR technologiją, kuri ypač mažina NO_x emisiją.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti biodegalų savybes ir EGR įtaką degimo procesui, siekiant išsiaiškinti, kurie degalai yra ne tokie taršūs, palyginti su iškastiniu dyzelinu.

Darbo tyrimų objektas: slėginio uždegimo variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti slėginio uždegimo variklio degimo proceso, ekologinių ir energetinių rodiklių, naudojant įvairius biodegalus, mokslinių tyrimų apžvalgą.
2. Sudaryti tyrimo metodiką, aprašyti tyrimams reikalingą įrangą ir naudojamus degalus.
3. Atlikti CO , CH , NO_x , CO_2 ir dūmingumo tyrimą, naudojant skirtingų rūšių biodegalų mišinius, keičiant EGR intensyvumą.

1. Literatūros apžvalga

HVO (hidrinto augalinio aliejaus) naudojimo slėginio uždegimo variklyje analizė

Degalai, pagaminti iš hidrinto augalinio aliejaus (angl. *Hydrotreated Vegetable Oils*), gaunami žaliavą

apdorojant vandeniliu ir izomeruojant. Jie gaminami iš atliekų: žuvų, gyvulinės kilmės riebalų (Parravicini ir kiti, 2021).

Atlikus tyrimą su tiesioginio įpurškimo 1,9 TDI slėginio uždegimo varikliu, naudojant iškastinį dyzeliną ir HVO, nustatyta, kad degimo pradžioje (angl. *Start of combustion SOC*), palyginti su iškastiniu dyzelinu, hidrinto augalinio aliejaus trumpesnė užsiliepsnojimo gaisties fazė, nes šie biodegalai turi didesnę cetaninį skaičių, ir šilumos išsiskyrimo intensyvumas iš anksto sumaišyto degimo (kinetinėje) fazėje mažėja. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo skirtumas tarp hidrinto augalinio aliejaus ir dyzelino yra $\sim 10 \text{ J}^\circ\text{AV}$. Greitas šilumos išsiskyrimas lemia didesnę temperatūros kilimą ir azoto oksidų išsiskyrimą į aplinką, naudojant dyzeliną. Hidrinto augalinio aliejaus šilumos išsiskyrimo greitis difuzinėje degimo fazėje yra didesnis, palyginti su dyzelinu, o tai padeda geriau išdeginti suodžius. Abiejų degalų šilumos išsiskyrimo reikšmės susilygina tik vėlyvo degimo fazėje (Rimkus ir kiti, 2020).

Shepel ir kitų autorių atliktame tyrime, naudojant hidrintą augalinį aliejų, riebalų rūgščių esterius ir iškastinį dyzeliną, 1,9 litro darbinio tūrio tiesioginio įpurškimo slėginio uždegimo variklyje nustatyta, kad HVO klampumas mažesnis nei dyzelino, jis intensyviau išgaruoja, geriau susimaišo su aplinkos oru. Šios savybės sudaro palankias sąlygas mažesniai išmetamųjų teršalų kiekiui susidaryti degimo proceso metu (Shepel ir kiti, 2021).

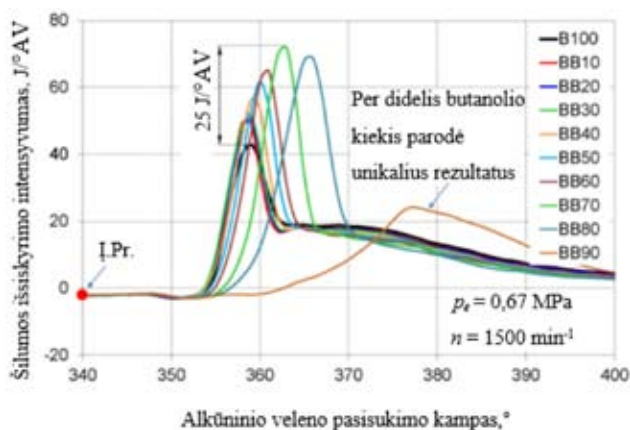
Biobutanolio, kaip slėginio uždegimo variklio, degalų priedo naudojimas

Aukštesnieji alkoholiai, tokie, kaip biobutanolis, yra degalų priedo rūšis, gaunama biologiškai fermentuojant biomasę: miežius, šiaudus, cukranendres (Trindade ir kiti, 2017). Biobutanolis laikomas perspektyviu degalų priedu slėginio uždegimo varikliuose dėl klampumo, didesnio šilumingumo, palyginti su mažesniais alkoholiais, ir sudaro stabilius mišinius (Goga ir kiti,

2019). Todėl jis dažnai maišomas su kitomis degalų rūšimis, pagerina jų energetines ir aplinkosaugines savybes.

Buvo atliktas tyrimas, kai į tiesioginio įpurškimo 1,9 TDI slėginio uždegimo variklį, veikiantį HVO ir biobutanolio mišiniais, įmaišyta 5, 10 ir 20 proc. tūrio biobutanolio. Apibendrinus rezultatus matyti, kad kinetinėje degimo fazėje didėjant biobutanolio koncentracijai iki 20 proc., hidrintame augaliniame aliejuje šilumos išsiskyrimo intensyvumo reikšmė tampa didesnė už gryno augalinio aliejaus, bet ne tokia didelė, kaip iškastinio dyzelino. Augantis šilumos išsiskyrimo intensyvumas didina NO_x emisiją. Difuzinėje degimo fazėje hidrinto augalinio aliejaus su didesne biobutanolio koncentracija šilumos išsiskyrimas taip pat intensyvėja, tai lemia biobutanolio sudėtyje esantis deguonis. Dėl šios priežasties geriau išdega kinetinės degimo fazės metu susidarę suodžiai. Dyzelinas difuzinėje degimo fazėje nepasiekia hidrinto augalinio aliejaus su butanolio priedais šilumos išsiskyrimo intensyvumo reikšmių, todėl variklyje blogiau išdega suodžiai. Difuzinės degimo fazės pabaigoje ir vėlyvo degimo fazėje visų degalų rūšių šilumos išsiskyrimo greitis susilygina (Valeika ir kiti, 2021).

Atliktas tyrimas, naudojant biodyzeliną (rapsų metilo esterį – RME), kuris maišomas įvairiomis proporcijomis su biobutanoliu, pridedant po 10 proc. tūrio, kol pasiekia 90 proc. butanolio. Naudojant vieno cilindro slėginio uždegimo variklį, nustatyta, kad kuo didesnė butanolio koncentracija rapsų metilo esteryje, tuo degimo gaisties fazė yra ilgesnė (1 pav.).



1 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo priklausomybė nuo butanolio kiekio rapsų metilo esteryje

Šaltinis: Tutak ir kiti, 2021.

Kinetinėje degimo fazėje rapsų metilo esteris pasiekia $\sim 42 \text{ J/°AV}$ šilumos išsiskyrimo intensyvumą, o didėjant butanolio koncentracijai, tendencingai didėja šilumos išsiskyrimas ir susidaro daugiau azoto oksidų. RME mišiniai su 70 ir 80 proc. biobutanolio didžiausias šilumos išsiskyrimo intensyvumo reikšmes ($\sim 70 \text{ J/°AV}$) pasiekia kinetinėje degimo fazėje. Tarp gryno RME ir mišinio su 70 proc. butanolio šilumos išsiskyrimo intensyvumo skirtumas siekia 25 J/°AV . Grynas rapsų metilo esteris difuzinėje degimo fazėje

šilumą išskiria intensyviau, ir jo greitis siekia 19 J/°AV . Didėjant biobutanolio koncentracijai rapsų metilo esteryje, tolygiai mažėja šilumos išsiskyrimo intensyvumas difuzinėje degimo fazėje. Biobutanolio koncentracijai didėjant, ilgėja vėlyvo degimo fazė. Pasiekus 90 proc. biobutanolio koncentraciją mišinyje, degimo procesas iš esmės keičiasi (yra unikalūs) dėl sumažėjusio degalų mišinio cetaninio skaičiaus ir išaugusios degimo gaisties. Tai sumažina šilumos išsiskyrimo intensyvumą ir degimo temperatūrą, bet labai sumažėja ir terminis ciklo efektyvumas. Taigi, tokia aukšta biobutanolio koncentracija nėra efektyvi, nes dėl užsitęsusio degimo didelė dalis degimo energijos buvo išleista pro išmetimo vožtuvus, sukuriama mažesnis sukimo momentas (Tutak ir kiti, 2021).

Apibendrinant šiuos tyrimus, pastebėta, kad biobutanolis yra tinkamas priedas slėginio uždegimo variklio degalams. Jis gerai maišosi su iškastiniu dyzelinu ir su įvairiais biodyzelinais, yra klampus, šilumingas. Deguonis, esantis biobutanolyje, sumažina CO ir suodžių emisijas, pagerina degimo stabilumą. Biobutanolio koncentracijai degaluose siekiant 20 proc., mišinio tūrio degimo procesas nepablogėja, o koncentracijai didėjant, akivaizdus kai kurių rodiklių pablogėjimas. Grynas biobutanolis, kaip degalai, negali būti naudojamas slėginio uždegimo varikliui, nes jo cetaninis skaičius nėra pakankamas, blogesnės tepimo savybės. Biobutanolio gamybai naudojamos atsinaujinančios biologinės atliekos, taip mažinamas iškastinio dyzelino naudojimas.

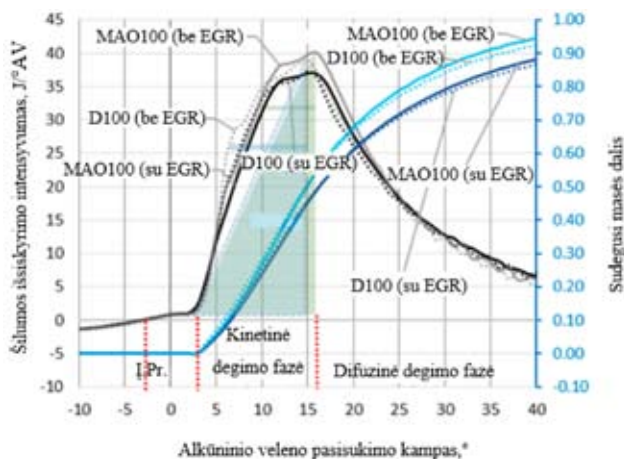
Išmetamųjų dujų recirkuliacijos (EGR) įtaka degimo procesui ir variklio rodikliams

Šiuo metu automobiliuose naudojamos dviejų rūšių – aukšto ir žemo slėgio – išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistemos. Aukšto slėgio (vidinė) išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema išsiskiria tuo, kad dalis išmetamųjų dujų, susidariusių po degimo proceso, sumaišoma su naujai įsiurbtu oru ir grąžinama į variklį degimo procesui vykdyti. Šis procesas vyksta, kol išmetamosios dujos turi didelį slėgį, kurio dar nepanaudojo turbokompresorius. Esant mažiausioms apkrovoms ir nepakankamam išmetamųjų dujų ir įsiurbiamo oro slėgio skirtumui šioje sistemoje, droseliu tenka priverstinai sumažinti įtekančio oro srautą (slėgį).

Žemo slėgio (išorinė) EGR sistema taip pat dalį išmetamųjų dujų kartu su naujai įsiurbtu oru grąžina į variklį vykdyti naują degimo procesą. Tačiau pagrindinis šios sistemos ypatumas yra tai, kad išmetamosios dujos yra grąžinamos, kai prateka turbokompresorių bei oksidacijos tipo katalizinį konverterį. Tokiu būdu grąžintose išmetamosiose dujose yra gerokai sumažintas kenksmingų aplinkai dalelių skaičius. Taip pat šios dujos yra grąžinamos dar prieš turbokompresorių, t. y. kai yra žemas įsiurbiamo oro slėgis, taip siekiant kuo vienodžiau paskirstyti atskiriems cilindrams tenkantį išmetamųjų dujų bei oro mišinį.

Naudojant 1,9 litro darbinio tūrio tiesioginio įpuršk-

kimo slėginio uždegimo variklį su turbokompresoriumi ir aukšto slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema, palyginti variklio, veikiančio iškastiniu dyzelinu (D100), mikrodumblių aliejaus esteriu (MAO100) ir skirtingos koncentracijos dyzelino ir mikrodumblių 30 ir 70 proc. tūrio bei 70 ir 30 proc. tūrio mišiniais, rodikliai. Kai EGR 18 proc., iškastinio dyzelino NO_x emisija sumažėja apie 35 proc., o kitų degalų mišinių NO_x reikšmės skiriasi nedaug – nuo 35 iki 31 proc. Azoto oksidų susidarymą lemia variklio apkrova, nes nuo to priklauso degimo temperatūra ir EGR dydis (Mohiuddin ir kiti, 2021). Šilumos išsiskyrimo intensyvumo skirtumas, kai EGR 0 ir 18 proc., yra $4 \text{ J}^\circ\text{AV}$ (2 pav.). Naudojant EGR, šilumos išsiskyrimo greitis kinetinėje degimo fazėje yra mažesnis ir lemia mažesnę azoto oksidų susidarymą, priešingai negu be EGR. Difuzinėje degimo fazėje šilumos išsiskyrimo greitis, naudojant visas tirtas degalų rūšis, nepaisant EGR, tolygiai mažėja (Felneris ir kiti, 2021).



2 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo priklausomybė nuo EGR
Šaltinis: Felneris ir kiti, 2021.

EGR stipriai padidina visų tirtų degalų rūšių dūmingumą, ypač gryno iškastinio dyzelino, tačiau mišiniuose didėjant mikrodumblių aliejaus esterio koncentracijai, mažėja ir dūmingumas (Felneris ir kiti, 2021).

Atliktas tyrimas naudojant vištienos taukų mišinį, kuris buvo kaitinamas iki 50°C , kad sumažėtų degalų klampumas ir pagerėtų įpurškimas. Degalai buvo šildomi prijungti prie variklio aušinimo sistemos šildytuvo. Grynas dyzelinas ir vištienos taukų mišiniai be EGR pasiekė didesnę šilumos išsiskyrimo intensyvumą kinetinėje degimo fazėje. Didėjant dyzelino koncentracijai vištienos riebaluose, atitinkamai didėja ir šilumos išsiskyrimo greitis, ypač be EGR kinetinėje degimo fazėje. Grynų vištienos taukų dūmingumas, sudarius skirtingas variklio apkrovas, siekia $0,04 \text{ m}^{-1}$. Įjungtas EGR padidino grynų vištienos taukų dūmingumą, bet ne taip smarkiai, kaip iškastinio dyzelino (Rimkus ir kiti, 2021).

EGR didėjant nuo 0 iki 60 proc., NO_x emisija nuo 520 ppm akivaizdžiai mažėja ir, pasiekus EGR 60 proc., tampa artima nuliui. Tiriant suodžių emisijas, buvo gauti rezultatai, kad nuo EGR 0 proc. iki EGR 30 proc.

suodžių susidarymas yra nedidelis. Didėjant EGR iki 45 proc., suodžių emisija padidėja iki 2 filtro dūmingumo skaičiaus (angl. *Filter smoke number* – FSN). EGR pasiekus 55 proc., suodžių emisija akivaizdžiai padidėja ir siekia 5,5 FSN. Kai EGR 60 proc., matomas staigus suodžių emisijos kritimas iki 2,2 FSN. EGR didėjimas daro teigiamą poveikį NO_x mažėjimui, tačiau EGR didėjant nuo 30 proc. ir daugiau, susidaro gausenės suodžių kiekis. Suodžių ir NO_x emisijos optimalus variantas gaunamas, kai EGR yra apie 38 proc. (Shi ir kiti, 2017). Panašią suodžių ir NO_x emisijų susidarymo tendenciją atliktame tyrime pastebėjo ir Liang ir kiti mokslininkai (2021).

Apibendrinus tyrimus, kurių metu degimo procesuose buvo naudojama EGR, matyti, kad EGR sistema mažina NO_x emisijų susidarymą, bet didina dūmingumą, anglies monoksido, anglies dioksido, angliavandenilių emisijas. Priežastis yra tai, kad į cilindrą grąžinamos išmetamosios dujos yra CO_2 ir tai mažina degimo temperatūrą, taip pat deguonies koncentraciją. Didėjant EGR, mažėja NO_x emisija. EGR pasiekus 50 proc. ir daugiau, NO_x emisija artima nuliui, bet dūmingumas stipriai padidėja. Didėjant variklio apkrovai, turėtų būti mažinama išmetamųjų dujų recirkuliacija, nes yra riebinamas degusis mišinys ir neigiamas CO_2 poveikis tampa akivaizdesnis. EGR sistemos naudojamos dyzeliniuose varikliuose, ieškant kompromiso tarp EGR dydžio, degalų rūšių ir variklio apkrovos.

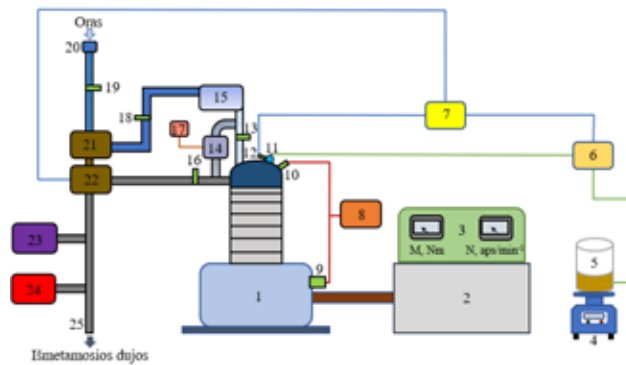
2. Tyrimo metodika ir priemonės

Tyrimo įranga

Bandymai buvo atlikti VILNIUS TECH Transporto inžinerijos ir logistikos laboratorijos Vidaus degimo variklių skyriuje, naudojant 1,9 l darbinio tūrio tiesioginio įpurškimo slėginio uždegimo variklį, turintį turbokompresorių ir aukšto slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistemą. Pagrindiniai variklio techniniai duomenys pateikti 1 lentelėje. Bandymo metu variklio apkrova sukurta elektromechaniniu apkrovos stendu, matuojamos degalų ir oro sąnaudos, įsiurbiamo oro ir išmetamųjų dujų temperatūra, turbokompresoriaus slėgis, išmetamųjų dujų sudėtis. Bendra įrangos išdėstymo schema pateikta 3 paveiksle.

Bandymo metu naudotos įrangos pagrindiniai techniniai duomenys pateikti 2 lentelėje.

Pradinis tyrimo režimas pasiektas, kai variklio apkrova yra 30, 60, 90, 120 Nm. Bandymai buvo atlikti, kai EGR išjungtas arba EGR intensyvumas buvo 0,10, 0,20, 0,30. EGR intensyvumas reguliuojamas vožtuvą atjungus nuo variklio valdymo bloko ir naudojant EGR valdymo moduliatorių. EGR intensyvumas vertinamas lyginant variklio oro įsiurbimo intensyvumą, atjungus EGR ir keičiant EGR vožtuvo atidarymą. Pastebėta, kad didinant EGR intensyvumą iki 30 proc., variklis tolygiausiai veikė 60 Nm apkrova. Šios apkrovos rezultatai ir yra analizuojami. ~60 Nm apkrova



3 pav. Bandymo schema, sudedamosios dalys: 1 – variklis; 2 – variklio apkrovos stendas; 3 – duomenų rodikliai; 4 – svarstyklės; 5 – degalų bakas; 6 – aukšto slėgio degalų siurblys; 7 – elektroninis valdymo blokas; 8 – slėgio cilindre registravimo įranga; 9 – alkūninio veleno padėties jutiklis; 10 – cilindro slėgio jutiklis; 11 – purkštuvas; 12 – purkštuvo adatos jutiklis; 13 – temperatūros jutiklis; 14 – EGR vožtuvas; 15 – tarpinis EGR aušintuvas; 16 – išmetamųjų dujų temperatūros jutiklis; 17 – EGR valdymo moduliatorius; 18 – pripūtimo slėgio jutiklis; 19 – įsiurbiamo oro temperatūros jutiklis; 20 – oro masės matuoklis; 21 – kompresorius; 22 – turbina; 23 – išmetamųjų dujų analizatorius; 24 – dūmų analizatorius; 25 – išmetamųjų dujų vamzdis

Šaltinis: sudaryta autorių.

1 lentelė. Variklio 1,9 TDI (1Z) pagrindiniai techniniai duomenys

Parametras	Reikšmė
Cilindrų darbo tūris, cm ³	1 896
Nominalus galingumas, kW	66
Maksimalus sukimo momentas, Nm (prie n = 2 200 min ⁻¹)	180
Cilindrų skaičius	4
Suspaudimo laipsnis	19,5
Stūmoklio eiga, mm	95,5
Cilindro skersmuo, mm	79,5
Darbo eiliškumas	1-3-4-2

Šaltinis: Felneris ir kiti, 2021.

susidaro, kai automobilis važiuoja mieste, o jo greitis siekia apie 50 km/h.

Tiriami degalai

Bandymo metu naudotas grynas iškastinis dyzelinas (D100), hidrintas augalinis aliejus (HVO100) ir HVO mišiniai su biobutanoliu. Buvo paruošti trys skirtingi biodegalų mišiniai, į HVO100 įmaišant tam tikrą tūrį



4 pav. Tiriamų degalų ir jų mišinių tūrio dalis 1 litre

Šaltinis: sudaryta autorių.

2 lentelė. Bandymo metu naudojama įranga ir jos tikslumas

Matavimo įranga Matuojamas rodiklis	Pavadinimas Techninė charakteristika	Tikslumas
Oro masės matuoklis Temperatūros diapazonas Matavimo diapazonas	BOSCH HFM 5 -40 °C – (+120 °C) 8–370 kg/h	≤ 3 %
Variklio apkrovos stendas Maksimali galima apkrova Maksimali stabdymo galia Apsisukimų kontroliuojamos ribos	KI – 5543 440 Nm 185 kW 1 500–3 000 aps/ min ⁻¹	± 1,23 Nm
Svarstyklės Matavimo ribos	SK – 5001 0–5 000 g	± 0,5 g
Termopora Temperatūros matavimo režimas	K – tipo 0–(+1 250 °C)	± 0,5 %
Cilindro slėgio jutiklis Jautrumas	AVL GH13P 15,84 ± 0,09 pC/bar	≤ 0,3 %
Slėgio cilindre įrašymo įranga Signalų santykis Įvesties diapazonas Matavimo diapazonas	AVL DITEST DPM 800 1 mV/pC 6 000 pC 0–200 bar	1 %
Degalų įpurškimo laiko nustatymo įtaisais	AVL DISYSTEM 845	± 1 °AV
Įsiurbiamo oro slėgio matuoklis Slėgio jutiklis TP 704-2BAI	DELTA OHM HD 2304.0 1–2 bar	± 0,002 bar
Diagnostikos prietaisais	VCDS v11.2	
Išmetamųjų dujų analizatorius / dūmomatis λ CO CO ₂ O ₂ CH NO _x Dūmingumas	AVL DICOM 4 000 0–9,999 0–10 % 0–20 % 0–25 % 0–20 000 ppm 0–5 000 ppm 0–99,99 m ⁻¹	0,001 0,01 % 0,1 % 0,01 % 1 ppm 1 ppm 0,01 m ⁻¹

Šaltinis: sudaryta autorių.

biobutanolio – 5 proc. (HVOB5), 10 proc. (HVOB10) ir 20 proc. (HVOB20). Siekiant užtikrinti tepimo savybes, papildomai į mišinius buvo įpilta ricinos aliejaus, kurio kiekis sudarė 5 proc. butanolio tūrio. Naudotų degalų sudėtis pateikta 4 paveiksle.

Apskaičiuotas įvairių degalų žemutinis šiluminis galingumas: D100 – 43,1 MJ/kg, HVO100 – 44,1 MJ/kg, HVOB5 – 43,5 MJ/kg, HVOB10 – 42,9 MJ/kg, HVOB20 – 41,7 MJ/kg. Nustatytas degalų tankis D100 – 830,4 kg/m³, HVO100 – 780 kg/m³, HVOB5 – 781,9 kg/m³, HVOB10 – 783,9 kg/m³, HVOB20 – 787,8 kg/m³.

3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė

Mažiausios valandinės degalų masės sąnaudos yra HVO100, nes šių degalų žemutinis šiluminis galingumas didžiausias, tačiau biobutanolis degalų sąnaudas didina dėl mažesnio šiluminio (5 pav.). Kai EGR 0, 0,10 ir 0,20, degalų sąnaudos išlieka mažai pakitusios. EGR pasiekus 0,30, degalų sąnaudos šiek tiek padidėja, nes lėtėja ir blogėja degimo procesas.

Degalų tūrio sąnaudos skiriasi nuo masės sąnaudų, nes HVO100 tankis yra ~6 proc. mažesnis ir HVO100 tūrio sąnaudos yra 5 proc. didesnės, palyginti su D100. Biobutanolio priedas HVO dėl didesnio deguonies kiekio, kuris mažina žemutinį šilumingumą, padidina degalų valandines tūrio sąnaudas (6 pav.). HVOB20 valandinės degalų tūrio sąnaudos dėl sumažėjusio šilumingumo yra ~8 proc. didesnės, palyginti su D100. Degalų sąnaudos auga ir didėjant EGR, ypač pasiekus 30 proc. ribą.

Didžiausias efektyvusis naudingumo koeficientas (η_e) visais EGR atvejais pasiekiamas, kai variklis veikia D100. Naudojant HVO100, η_e sumažėja, nors šių degalų masės sąnaudos yra mažiausios, bet jų šilumingumas didžiausias. Visų tirtų degalų η_e mažai kinta, EGR didinant nuo 0 iki 0,20 (7 pav.). Kai EGR 0,2, biobutanolio koncentraciją didinant iki 20 proc., η_e rezultatas gerėja. Kai EGR 0,30, dėl mažesnio deguonies kiekio degimo proceso metu efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėja D100 ~4 proc., HVO 100 ~4 proc., HVOB20 ~3 proc. Dėl didesnio deguonies kiekio biobutanolyje, HVOB20, kai EGR 0,30, efektyvusis naudingumo koeficientas sumažėjo mažiausiai.

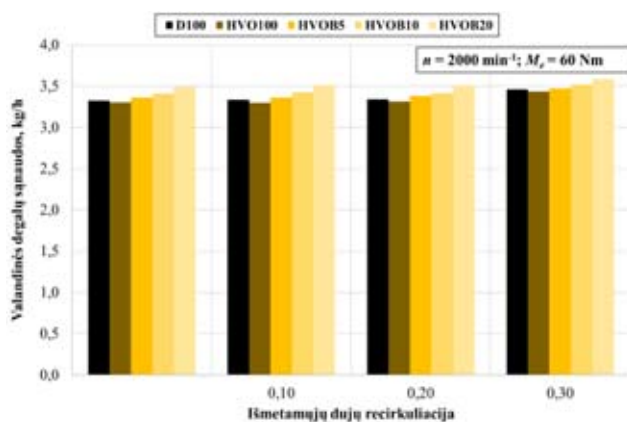
D100 daugiausiai išskiria anglies monoksido išmetamosiose dujose (8 pav.). Kai EGR išjungtas, D100 CO koncentracija siekia 0,025 proc., HVO100 – 0,024 proc., o HVOB5 ir HVOB10 CO koncentracija yra ~20 proc. mažesnė, palyginti su D100. Didinant EGR, CO kon-

centracija išauga dėl blogesnio degimo, nes sumažėjusi deguonies koncentracija ir CO₂ slopina degimą, kuris vyksta žemesnėje temperatūroje.

Didžiausia CO koncentracija yra iškastinio dyzelino, kai EGR 0,30, ir siekia 0,042 proc. HVO100, HVOB5 CO koncentracija siekia 0,04 proc., o HVOB10 ir HVOB20 – 0,036 proc. Iš to matome, kad 20 proc. biobutanolio priedas iki ~14 proc. mažina CO koncentraciją, palyginti su D100, kai EGR 0,3. Dar didesnę CO mažinimo efektą turi 20 proc. biobutanolio priedas, kai EGR – 0,2. Tai lemia didesnę deguonies koncentraciją biobutanolyje.

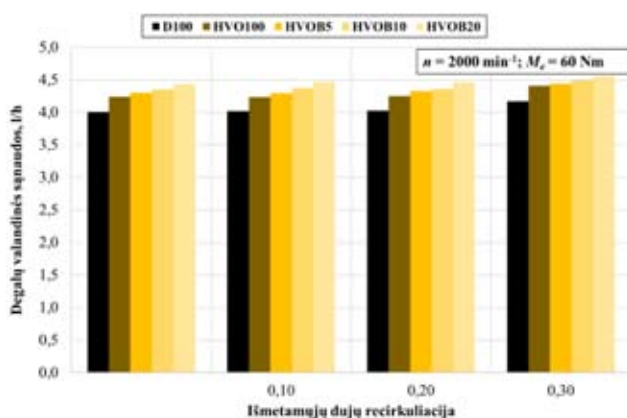
D100 išskiria didžiausią CO₂ emisiją dėl didžiausio C/H santykio, palyginti su biodegalais. Degimo proceso metu, įjungus EGR, į cilindrą grįžta nemaža dalis CO₂, kuri nedega, tačiau padidina CO₂ koncentraciją išmetamosiose dujose (9 pav.). Įjungus 0,30 EGR, varikliui veikiant, CO₂ koncentracija padidėja 38–40 proc. Kai EGR 0,30, 20 proc. biobutanolio didina CO₂ koncentraciją dėl geresnio degimo, tačiau, kai EGR 0,20, biobutanolis CO₂ koncentraciją mažina.

Be EGR didžiausia CH koncentracija yra D100, ji siekia 30 ppm. Naudojant HVO ir biobutanolio mišinius, CH koncentracija mažėja dėl paprastesnės biodegalų molekulinės struktūros. EGR naudojimas gerokai didina CH koncentraciją visuose tirtuose degaluose (10 pav.). Pasirinkus D100 ir kitus degalus, EGR padidinus iki



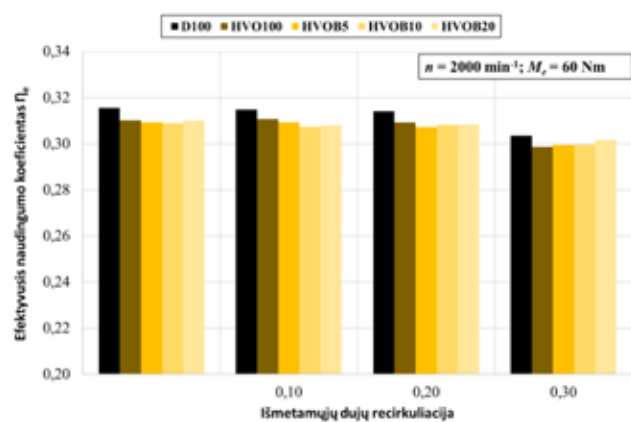
5 pav. Degalų valandinių masės sąnaudų priklausomybė nuo EGR

Šaltinis: sudaryta autorių.



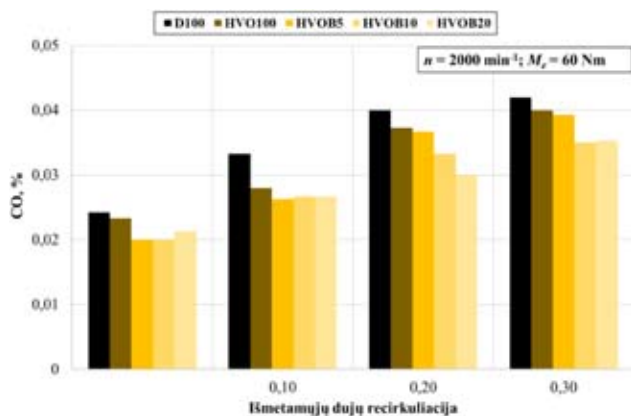
6 pav. Degalų valandinių tūrio sąnaudų priklausomybė nuo EGR

Šaltinis: sudaryta autorių.



7 pav. Efektyvaus naudingumo koeficiento priklausomybė nuo EGR

Šaltinis: sudaryta autorių.



8 pav. CO priklausomybė nuo EGR

Šaltinis: sudaryta autorių.

0,30, CH koncentracija padidėja beveik du kartus, nes dėl sumažėjusios deguonies koncentracijos mažėja degimo temperatūra. Biobutanolyje esantis deguonis gerina degimą, mažina CH ir geriausias efektas pastebimas, kai EGR 0,2, o biobutanolio koncentracija siekia 20 proc.

Be EGR didžiausia NO_x koncentracija yra D100 ir siekia 290 ppm. Naudojant HVO, NO_x koncentracija sumažėja ~20 proc. (11 pav.), nes HVO turi aukštesnį cetaninį skaičių. Tai sutrumpina HVO užsiliepsnojimo gaisties fazę ir sumažina šilumos išsiskyrimo intensyvumą kinetinėje degimo fazėje. Didėjant biobutanolio koncentracijai HVO, NO_x koncentracija didėja dėl mažėjančio cetaninio skaičiaus ir deguonies, kuris gerina degimą. EGR mažina NO_x koncentraciją, ypač HVO, tikėtina, kad dėl padidėjusios temperatūros suspaudimo takto pabaigoje, o tai dar labiau trumpina gaisties fazę. Padidinus EGR nuo 0 iki 0,30, D100 NO_x koncentracija sumažėja ~27 proc., HVO100 – ~47 proc., HVOB20 – ~42 proc. Mažiausia NO_x koncentracija yra HVO100 – 120 ppm, kai EGR 0,30. Tačiau ir kai EGR 0,2, NO_x sumažėjimas taip pat yra akivaizdus, bet 20 proc. biobutanolio koncentracija NO_x didina santykinai mažiau.

Naudojant D100, pasiekiamas gausiausias dūmingumas dėl didžiausio C/H santykio ir sudėtingesnės molekulinės struktūros. Pasirinkus HVO100 be EGR, dūmingumas mažėja ~30 proc., naudojant HVOB20 –

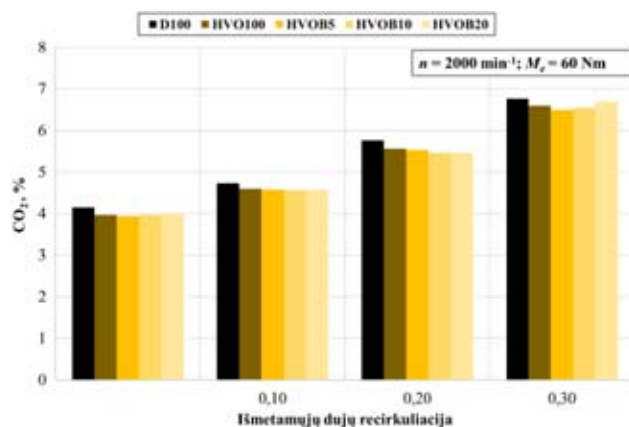
~80 proc. (12 pav.). EGR 0,30 naudojimas 8 kartus padidina D100 dūmingumą, HVO – 12 kartų, HVOB20 – 13 kartų, nes degimas vyksta žemesnėje temperatūroje, esant mažesnei deguonies koncentracijai. Biobutanolio priedas sumažina dūmingumą, nes padidina O_2 koncentraciją. Naudojant HVOB20, kai EGR 0,2, dūmingumas padidėja nedaug, palyginti su D100, kai EGR 0.

Apibendrinus tyrimo, kurio metu degimo procesuose buvo naudojama EGR, rezultatus, matoma, kad išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema mažina NO_x susidarymą, nes slopina degimo procesą, bet tai didina CO, CH, CO_2 koncentraciją ir dūmingumą. Dyzeliną pakeitus optimaliu HVO ir biobutanolio (~20 %) mišiniu, kai EGR 0,20, galima pasiekti reikšmingą NO_x koncentracijos sumažėjimą, dūmingumui mažai pakitus.

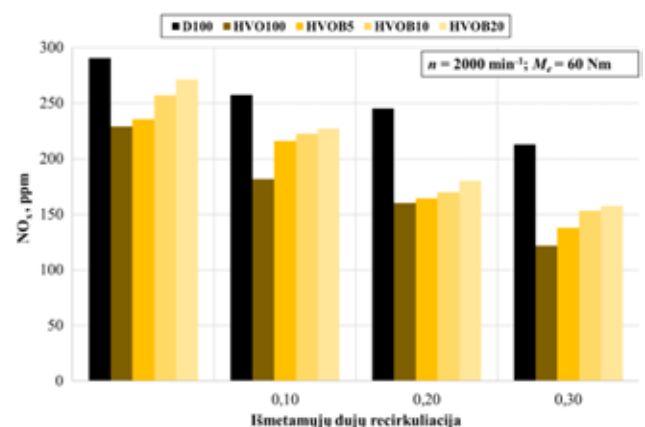
Išvados

Slėginio uždegimo varikliui veikiant vidutine apkrova ir dyzeliną pakeitus įvairiais biodegalų mišiniais, keičiant EGR intensyvumą, gauti eksperimentinio tyrimo rezultatai, kurie pateikti apibendrinančiose išvadose:

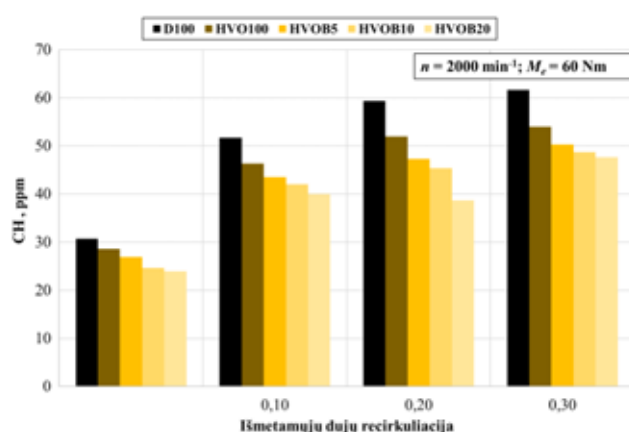
1. Dyzeliną pakeitus HVO ir biobutanolio (iki 20 % tūrio) mišiniais, C/H santykis, žemutinis šilumingumas, tankis ir cetaninis skaičius sumažėja, tačiau padidėja



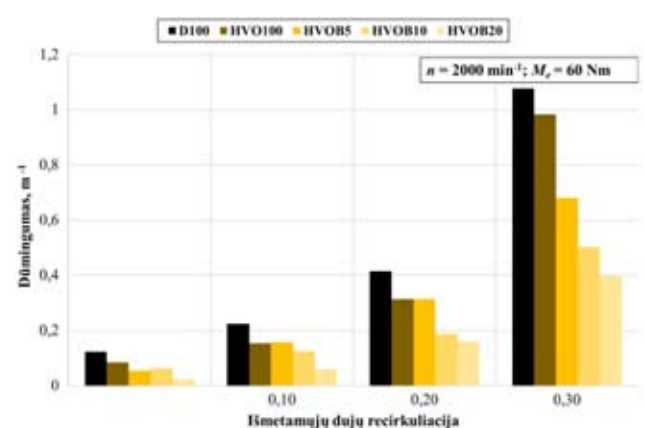
9 pav. CO_2 priklausomybė nuo EGR
Šaltinis: sudaryta autorių.



11 pav. NO_x priklausomybė nuo EGR
Šaltinis: sudaryta autorių.



10 pav. CH priklausomybė nuo EGR
Šaltinis: sudaryta autorių.



12 pav. Dūmingumo priklausomybė nuo EGR
Šaltinis: sudaryta autorių.

dėja deguonies koncentracija mišinyje. Tai lemia biodegalų mišinių išpurškimo ir degimo skirtumus.

2. EGR sistemos naudojimas mažina šilumos išsiskyrimo greitį kinetinėje degimo fazėje, bet padidina difuzinėje degimo fazėje, ir tai mažina NO_x koncentraciją išmetamosiose dujose. Didėjant EGR, dėl žemesnės degimo temperatūros ir mažesnės O_2 koncentracijos cilindre gausėja dūmingumas. Tačiau HVOB20 degalų mišiniu veikiančio variklio, kai EGR 0,20, dūmingumas nedaug padidėja, o NO_x koncentracijos sumažėjimas yra reikšmingas (~38 %).

3. EGR naudojimas didina CO , CH koncentraciją, kai variklis veikia tiriamais degalais, tačiau HVO degaluose esantis biobutanolio priedas, gerindamas oksidacijos procesą, mažina šių teršalų kieki.

4. Didinant EGR intensyvumą, CO_2 koncentracija auga, nes dėl blogesnio degimo mažėja efektyvusis naudingumo koeficientas ir didėja degalų sąnaudos. CO_2 koncentracija išauga ir dėl sumažėjusio išmetamųjų dujų srauto didinant EGR. Tačiau, naudojant HVO ir biobutanolio mišinį, CO_2 dujų emisiją reikia vertinti atsižvelgiant į biodegalų gyvavimo ciklą, kurio metu didelė dalis CO_2 absorbuojama biomasės augimo metu.

Literatūra

- Felneris, M., Raslavičius, L., Pukalskas, S. ir Rimkus, A. (2021). Assessment of Microalgae Oil as a Carbon-Neutral Transport Fuel: Engine Performance, Energy Balance Changes, and Exhaust Gas Emissions. *Sustainability*, 13(14), 7878. <https://doi.org/10.3390/su13147878>.
- Goga, G., Chauhan, B. S., Mahla, S. K. ir Cho, H. M. (2019). Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. *Energy Reports*, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.12.002>.
- Liang, J., Zhang, Q., Chen, Z., Zheng, Z. (2021). The effects of EGR rates and ternary blends of biodiesel/n-pentanol/diesel on the combustion and emission characteristics of a CRDI diesel engine. *Fuel*, 286, 119297. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119297>.
- Mohiuddin, K., Kwon, H., Choi, M. ir Park, S. (2021). Effect of engine compression ratio, injection timing, and exhaust gas recirculation on gaseous and particle number emissions in a light-duty diesel engine. *Fuel*, 294, 120547. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120547>.
- Parravicini, M., Barro, C. ir Boulouchos, K. (2021). Experimental characterization of GTL, HVO, and OME based alternative fuels for diesel engines. *Fuel*, 292, 120177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120177>.
- Rimkus, A., Vipartas, T., Matijošius, J., Stravinskas, S. ir Kriaučiūnas, D. (2021). Study of Indicators of CI Engine Running on Conventional Diesel and Chicken Fat Mixtures Changing EGR, *Applied Sciences*, 11(4), 1411. <https://doi.org/10.3390/app11041411>.
- Rimkus, A., Stravinskas, S. ir Matijošius, J. (2020). Comparative Study on the Energetic and Ecologic Parameters of Dual Fuels (Diesel-NG and HVO-Biogas) and Conventional Diesel Fuel in a CI Engine. *Applied Sciences*, 10(1), 359. <https://doi.org/10.3390/app10010359>.
- Shepel, O., Matijošius, J., Rimkus, A., Duda, K. ir Mikulski, M. (2021). Research of Parameters of a Compression Ignition Engine Using Various Fuel Mixtures of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Fatty Acid Esters (FAE). *Energies*, 14(11), 3077. <https://doi.org/10.3390/en14113077>.
- Shi, X., Liu, B., Zhang, C., Hu, J. ir Zeng, Q. (2017). A study on combined effect of high EGR rate and biodiesel on combustion and emission performance of a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1272–1279. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.083>.
- Trindade, W. R. da S. ir Santos, R. G. dos. (2017). Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 642–651. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.213>.
- Tutak, W., Jamrozik, A. ir Grab-Rogaliński, K. (2021). The Effect of RME-1-Butanol Blends on Combustion, Performance and Emission of a Direct Injection Diesel Engine. *Energies*, 14(10), 2941. <https://doi.org/10.3390/en14102941>.
- Valeika, G., Matijošius, J., Górski, K., Rimkus, A. ir Smigins, R. (2021). A Study of Energy and Environmental Parameters of a Diesel Engine Running on Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) with Addition of Biobutanol and Castor Oil. *Energies*, 14(13), 3939. <https://doi.org/10.3390/en14133939>.

ANALYSIS OF PERFORMANCE OF A COMPRESSION IGNITION ENGINE OPERATING ON DIFFERENT BIOFUEL MIXTURES AND CHANGING THE INTENSITY OF EXHAUST GAS RECIRCULATION

Dovydas Mačiulis¹, Alfredas Rimkus^{1,2},
Jonas Matijošius^{1,2}

¹Vilnius Gediminas Technical University

²Vilnius College of Technologies and Design

Abstract. The paper analyzes the performance of an internal combustion engine using various blends of hydrotreated vegetable oil and biobutanol and the effect of exhaust gas recirculation on the emissions of incomplete combustion products (CO , CH), nitrogen oxides (NO_x), greenhouse gases (CO_2) and smoke. During the experimental study, by changing the intensity of EGR, the most optimal biofuel mixture was searched for, which would maintain high thermal efficiency of engine operation and reduce the emission of harmful substances. Running the engine on a mixture of 80% HVO and 20% biobutanol at an EGR of 0,20 was found to achieve significant reductions in NO_x with little change in smoke and other pollutant emissions. In the case of the biofuel mixture, after evaluating the life cycle of the fuel, it can be stated that the CO_2 emission decreases significantly.

Key words: Hydrotreated vegetable oil, biobutanol, exhaust gas recirculation, fossil diesel, compression ignition engine.



KAUNO TECHNIKOS KOLEGIJA
KAUNAS UNIVERSITY OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES

INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS TECHNOLOGIJOS

Mokslinių straipsnių žurnalas

ENGINEERING AND EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

Scientific journal

SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIO DEGIMO PROCESO SKAITINĖ ANALIZĖ NAUDOJANT ĮVAIRIUS BIODEGALŲ MIŠINIUS IR KEIČIANT EGR

Dovydas Mačiulis, Alfredas Rimkus

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija

Apžvelgtos slėginio uždegimo variklio degimo fazės, vertinant jų įtaką variklio energetiniams ir ekologiniams rodikliams. Įvertintos pagrindinės tyrime naudojamų degalų (dyzelino, hidrinto augalinio aliejaus (angl. *Hydrotreated Vegetable Oils* – HVO), HVO mišinių su biobutanoliu) savybės. Atlikti eksperimentiniai tyrimai naudojant įvairius biodegalų mišinius ir keičiant išmetamųjų dujų recirkuliacijos (angl. *Exhaust Gas Recirculation* – EGR) intensyvumą. Remiantis eksperimentiniais rezultatais, naudojant programos „AVL BOOST“ paprogramę „Burn“, atlikta degimo proceso skaitinė analizė. Nustatyti degimo rodiklių skirtumai ir tikėtinos priežastys leidžia geriau suprasti degimo metu vykstančius procesus, kai variklis veikia įvairiais degalais ir keičiamas EGR. Tai leidžia parinkti tinkamiausią degalų mišinį ir EGR siekiant geriausių variklio ekologinių ir energetinių rodiklių.

REIKŠMINIAI ŽODŽIAI. Slėginio uždegimo variklis, degimo vėlavimo fazė, kinetinė degimo fazė, difuzinė degimo fazė, difuzinė degimo fazė, biobutanolis, išmetamųjų dujų recirkuliacija.

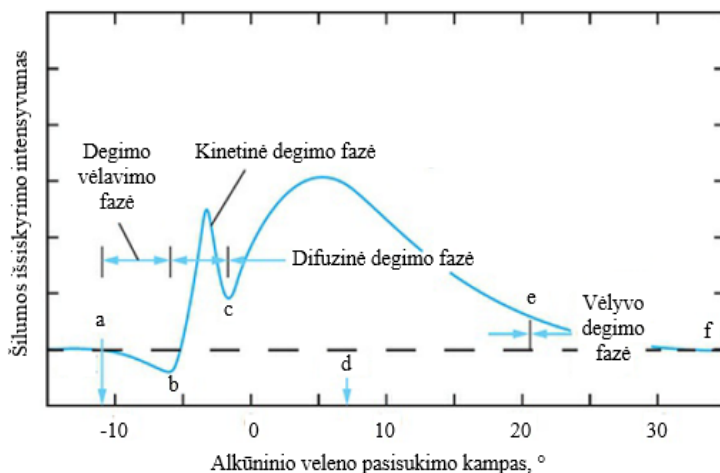
Įvadas

Sparčiai didėjant pasaulyje automobilių skaičiui, susirūpinta dėl aplinkos taršos, nes didžioji dauguma transporto priemonių yra varomos naftos produktais, o šie degdami į aplinką išskiria teršalus bei šiltnamio efektą sukeliančias dujas, spartinančias klimato kaitą. Problema yra ta, kad automobilių išmetamųjų dujų ir kietųjų dalelių emisija labai kenkia žmonių sveikatai.

Valstybių vadovai, aktyviai ragindami visuomenės, 2020 m. gruodžio mėn. Briuselyje patvirtino įsipareigojimą vykdyti ES Žaliąjį kursą, kuris reikalauja, kad iki 2030 m. grynasis ES viduje išmetamo šiltnamio efektą sukeliančiųjų dujų kiekis būtų sumažintas bent 55 % palyginti su 1990 m. Šiuo laikotarpiu transporto sektoriaus išmetamųjų teršalų kiekis sudaro daugiau, kaip 25 % visos taršos (Transportas — Europos aplinkos agentūra, n.d.). Mokslininkai daug dirba tobulindami degalų sudėtį, taip siekdami mažinti taršą. Pradedami gaminti degalai ne tik iš iškastinių žaliavų, bet ir iš atsinaujinančių: bioetanoliai, HVO, biodujos ir kiti.

1. Literatūros apžvalga

Degimo procesas slėginio uždegimo variklyje. Degalų degimo cilindre eiga reikšmingai lemia variklio energetinius ir ekologinius rodiklius. Degimo procesai slėginio ir kibirkštinio uždegimo varikliuose turi skirtumus: degimas kibirkštinio uždegimo variklyje vyksta sklindant liepsnos frontui nuo uždegimo žvakės, o slėginio uždegimo variklyje atskirai dega kiekvienas į degimo kamerą įpurškėtų degalų lašelis (Mollenhauer & Tschöke, 2010). 1 pav. pateikiamas tipinio šilumos išsiskyrimo intensyvumo grafikas slėginio uždegimo variklyje.



1 pav. Dyzelinio variklio šilumos išsiskyrimo sudedamosios dalys: a – degalų įpurškimo pradžia (I.Pr.); b – degimo pradžia (Deg.Pr.); c – kinetinės degimo fazės pabaiga; d – degalų įpurškimo pabaiga (I.Pab.); e – difuzinės degimo fazės pabaiga; f – degimo pabaiga

Šaltinis: (Heywood, 2018)

Degimo vėlavimo fazė – (angl. *Ignition delay period*) laikotarpis nuo degalų įpurškimo pradžios (I.Pr.) iki degalų degimo pradžios (Deg.Pr.). Esant ilgesnei degimo vėlavimo fazei susikaupia daug degalų, kuriems užsidegus intensyviau auga kinetinės degimo fazės metu slėgis ir temperatūra (Heywood, 2018). Vėlavimo fazės trukmę lemia degalų cetaninis skaičius, įpurškimo kokybė, temperatūra ir slėgis cilindre, oro sukuriavimas ir kita (Rakopoulos & Giakoumis, 2009).

Kinetinė degimo fazė – (angl. *Premixed combustion phase*) kurios metu cheminė energija išsiskiria iš degalų, kurie susimaišę su oru per degimo vėlavimo laikotarpį ir degalų, kurių purškimas tęsiamas. Degalų ir oro mišinys, degdamas šioje fazėje, lemia didelį šilumos išsiskyrimo intensyvumą. Šios fazės metu, esant dideliui slėgiui ir temperatūrai, intensyviai formuojasi azoto oksidai (NO_x) (Heywood, 2018).

Difuzinė degimo fazė – (angl. *Mixing - controlled combustion phase*) kurios metu degimo greitis (arba šilumos išsiskyrimo greitis) yra kontroliuojamas pagal degalų purškimo intensyvumą ir laiką. Vyksta degalų įpurškimas, garinimas, degalų garų maišymas su oru. Degimo greitis ir trukmė šioje difuzinės liepsnos fazėje yra daugiausiai kontroliuojamas degalų įpurškimo ir maišymosi su oru procesų. Esant didelei temperatūrai šioje fazėje yra geriau išdeginami suodžiai susidarę degimo metu (Heywood, 2018). Difuzinės degimo fazės metu išsiskyrusi energija lemia cilindre atliktą darbą ir variklio sukurtą sukimo momentą (Reif, 2014).

Vėlyvo degimo fazė – (angl. *Late combustion phase*) kurios metu šiluma išsiskiria mažesniu intensyvumu ir mažėja degimo slėgio banga. Šios fazės metu nedidelė dalis degalų dar yra nesudegusi, dalies degalų energija yra suodžiuose ir degimo produktuose, todėl jie gali užsiliepsnoti. Cilindre esantis slėgis yra pulsuojantis, ir per šį laikotarpį sudegusios dujos maišosi su oru, skatina visapusiškesnį degimą ir mažiau išsiskiria taršių išmetamųjų dujų. Degimas proceso pabaigoje tampa lėtesnis, nes išsiplėtimo takto metu cilindre krinta dujų temperatūra. Ilgai užsitęsęs šiai fazei, sukaupia energija tiesiog išmetama pro vožtuvus bei perduodama į cilindro sienelės, taip išekvojant įpurškčius degalus veltui, nesukuriant sukimo momento (Heywood, 2018).

Palyginus įvairių tyrimų rezultatus galime teigti, kad HVO palyginus su dyzelinu, turi aukštesnį cetaninį skaičių ir dėl to trumpėja vėlavimo fazė, mažėja degimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje (Puricelli ir kt. 2021; Shepel ir kt. 2021; Rimkus ir kt. 2020; (Rayapureddy et al., 2022). Biobutanolio cetaninis skaičius yra mažesnis už HVO ir gryno dyzelino, tačiau jame yra deguonies, turi mažesnę C/H santykį (Nour ir kt. 2019; Tutak ir kt. 2021; (Goga et al., 2019), todėl šių degalų priedas didina užsiliepsnojimo vėlavimą, tačiau gali intensyviau degti vėlesnėse degimo fazėse, sumažinti dūmingumą. Didinant EGR intensyvumą slopinamas degimas ir tai mažina NO_x emisiją, bet didėja dūmingumas (Rimkus et al., 2021).

Tyrimo tikslas – ištirti įvairius biobutanolio mišinius su HVO, keičiant EGR, siekiant nustatyti prie kokio EGR intensyvumo skirtingi biodegalų mišiniai, nepadidinus dūmingumo, sumažina degimo intensyvumą kinetinėje degimo fazėje ir NO_x emisiją.

2. Tyrimo metodika ir medžiagos

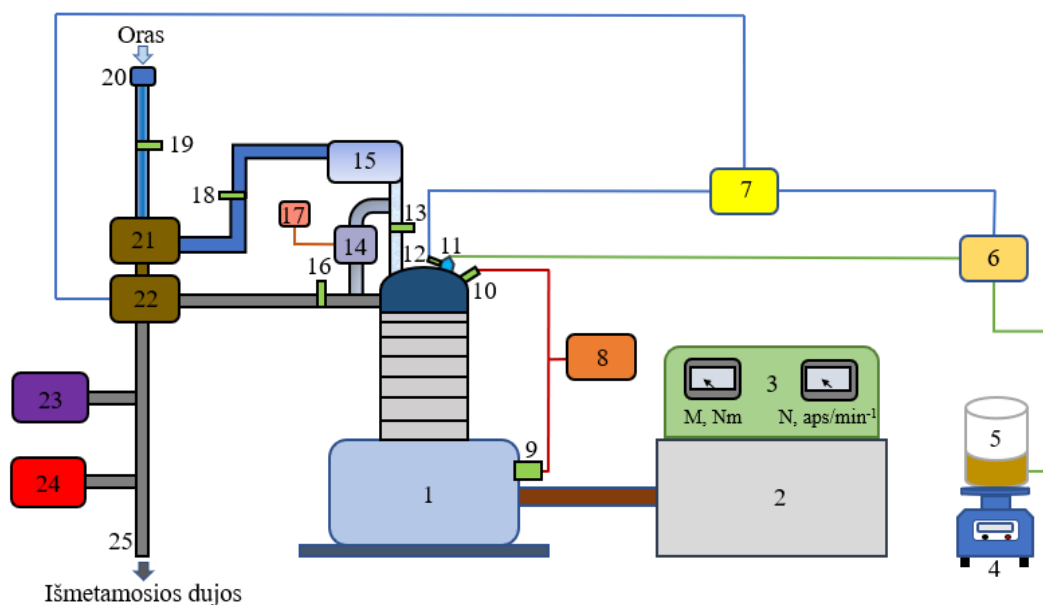
Tyrimo įranga. Bandymai buvo atlikti VILNIUS TECH Transporto inžinerijos ir logistikos laboratorijos Vidaus degimo variklių skyriuje, naudojant 1,9 l darbinio tūrio, tiesioginio įpurškimo, slėginio uždegimo variklį (1 lentelė), turintį turbokompresorių ir aukšto slėgio išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistemą (2 pav.). Bandymo metu naudotos įrangos pagrindiniai techniniai duomenys pateikti 2 lentelė.

1 lentelė

Slėginio uždegimo 1,9 l TDI (1Z) variklio pagrindiniai techniniai duomenys

Parametras	Reikšmė
Cilindrų skaičius ir darbo tūris	4 cil. / 1896 cm ³
Nominalus galingumas	66 kW
Maksimalus sukimo momentas	182 Nm (prie $n = 2300 \text{ min}^{-1}$)
Cilindrų skaičius	4
Suspaudimo laipsnis	19,5
Stūmoklio eiga / skersmuo	95,5 mm / 79,5 mm

Šaltinis: (Horsepower/Torque Curve 1991 Audi 80 1.9 TDI (Man. 5) (Model since Mid-Year 1991 for Europe). Detailed Engine Characteristics., n.d.)



2 pav. Bandymo schema, sudedamosios dalys: 1 – variklis; 2 – variklio apkrovos stendas; 3 – variklio greičio ir sukimo momento ir rodikliai; 4 – elektroninės svarstyklės; 5 – degalų bakas; 6 – aukšto slėgio degalų siurblys; 7 – elektroninis valdymo blokas; 8 – variklio sukimo momento ir sukimosi greičio registravimo įranga; 9 – alkūninio veleno padėties jutiklis; 10 – cilindro slėgio jutiklis; 11 – degalų purkštuvas; 12 – purkštuvu adatos jutiklis; 13 – temperatūros jutiklis; 14 – EGR vožtuvas; 15 – tarpinis aušintuvas; 16 – išmetamųjų dujų temperatūros jutiklis; 17 – EGR valdymo moduliatorius; 18 – slėgio jutiklis; 19 – įsiurbiamo oro temperatūros jutiklis; 20 – oro masės matuoklis; 21 – kompresorius; 22 – turbina; 23 – išmetamųjų dujų analizatorius; 24 – dūmų analizatorius; 25 – išmetamųjų dujų vamzdis.

Šaltinis: sudaryta autorių

2 lentelė

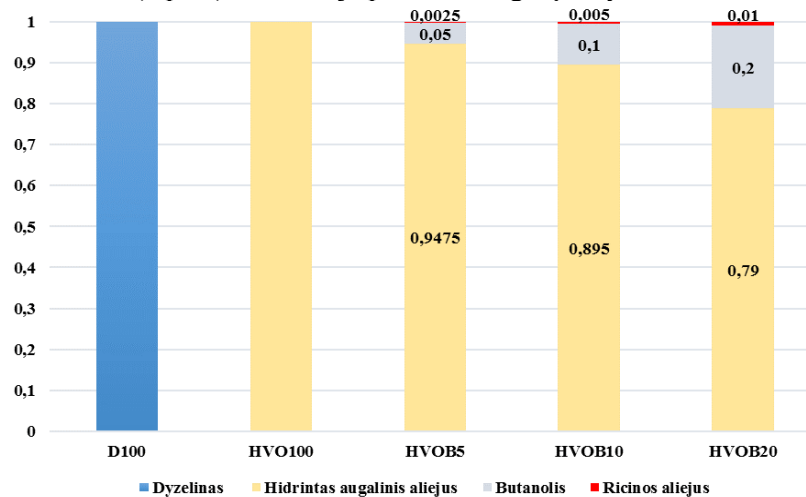
Bandymo metu naudojama įranga ir jos tikslumas

Matavimo įranga	Pavadinimas	Tikslumas
Matuojamas rodiklis	Techninė charakteristika	
Oro masės matuoklis	BOSCH HFM 5	
Temperatūros diapazonas	-40 °C – (+120 °C)	
Matavimo diapazonas	8 – 370 kg/h	≤ 3 %
Variklio apkrovos stendas	KI – 5543	
Maksimali stabdymo galia	185 kW	
Apsisukimų kontroliuojamos ribos	1500 – 3000 min ⁻¹	
Maksimalios išmatuotos apkrovos	440 Nm	± 1,23 Nm
Elektroninės svarstyklės	SK – 5001	
Matavimo ribos	0 – 5000 g	± 0,5 g
Termopora	K – tipo	
Temperatūros matavimo režimas	0 – (+1250 °C)	± 0,5 %
Cilindro slėgio jutiklis	AVL GH13P	
Jautrumas	15,84 ± 0,09 pC/bar	≤ 0,3 %
Slėgio cilindre įrašymo įranga	AVL DITEST DPM 800	
Signalų santykis	1 mV/pC	
Įvesties diapazonas	6000 pC	
Matavimo diapazonas	0 – 200 bar	1 %
Įsiurbiamo oro slėgio matuoklis	DELTA OHM HD 2304.0	
Slėgio jutiklis TP 704-2BAI	1 – 2 bar	± 0,0002 MPa
Diagnostikos prietaisas	VCDS v11.2	
Degalų įpurškimo pradžia	18° alkūninio veleno (AV) prieš viršutinį galinį tašką (PVGT) – 2° AV už viršutinio galinio taško (UVGT)	0,1° AV

Šaltinis: sudaryta autorių

Tiriami degalai. Bandyme buvo naudojamas hidrintas augalinis aliejus (HVO100), grynas iškastinis dyzelinas (D100) ir biobutanolis, kurio į hidrintą augalinį aliejų įmaišyta 5, 10 ir 20 tūrio % (HVOB5,

HVOB10 ir HVOB20). Papildomai į mišinius dėl tepimo savybių buvo įmaišyta 5 % ricinos aliejaus, kuris sudarė 5 % biobutanolio tūrio (3 pav.). 3 lentelėje pateiktos degalų savybės.



3 pav. Tiriamų degalų ir jų mišinių komponentų tūrio dalis 1 litre
Šaltinis: sudaryta autorių

3 lentelė

Tiriamų degalų savybės

Parametras	D100	HVO100	HVOB5	HVOB10	HVOB20
Anglis (C)	86,20	84,55	83,50	82,46	80,40
Vandenilis (H)	13,80	15,45	15,34	15,22	15,00
Deguonis (O)	-	-	1,16	2,31	4,60
C/H santykis	6,25	5,47	5,44	5,42	5,36
Oro masė (kg) reikalinga 1 kg degalų (l_0)	14,79	15,18	14,97	14,76	14,34
Žemutinis degalų šilumingumas MJ/kg	43,10	44,10	43,52	42,94	41,78
Cetatinis skaičius	51	70	67,3	64,6	59,3

Šaltinis: sudaryta autorių

Tyrimo metodika. Eksperimentu buvo siekiama išsiaiškinti, kaip naudojant HVO ir įvairius jo mišinius su biobutanolio, kinta variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai, lyginant su iškastiniu dyzelinu keičiant EGR. Ieškotas biodegalų mišinys, kurio rodikliai būtų artimi arba geresni lyginant su iškastiniu dyzelinu. Eksperimentinis tyrimas pirmiausia atliktas varikliui veikiant 2000 min^{-1} sukimosi greičiu, apkraunant 30, 60, 90 ir 120 Nm sukimo momentu esant išjungtam EGR. Degalų įpurškimo pradžią reguliavo variklio elektroninis valdymo blokas, o rezultatas buvo fiksuojamas. Vėliau tuo pačiu režimu tyrimas pakartotas EGR sistemos pagalba į cilindrą gražinant 10 %, 20 % ir 30 % išmetamųjų dujų masės.

EGR koeficientas nustatomas pagal formulę (Rimkus, 2022):

$$k_{EGR} = \frac{G_{EGR}}{G_{EGR} + G_{oro_EGR}}, \quad (1)$$

čia: G_{EGR} – pro EGR vožtuvą gražinamų deginių masė, kg/min, G_{oro_EGR} – įsiurbiamą oro masė, kai EGR vožtuvas atidarytas, kg/min (matuojama eksperimento metu).

Išmetamųjų dujų recirkuliacijos vožtuvo pralaidumas apytiksliai nustatomas išmatuojant įsiurbimo oro masės sumažėjimą, kai EGR vožtuvas atidarytas (Rimkus, 2022):

$$G_{EGR} = G_{oro} - G_{oro_EGR}, \quad (2)$$

čia: G_{oro} – įsiurbiamą oro masė, kai EGR vožtuvas uždarytas, kg/min (išmatuojama eksperimento metu).

EGR vožtuvas valdomas jį atjungus nuo variklio elektroninio valdymo bloko ir naudojant EGR valdymo moduliatorių, kuris formuoja kintamo užpildos koeficiento valdymo signalą (šis signalas reguliuoja vakuumo, kuris valdo EGR, slėgį). Keičiant EGR, keičiasi įsiurbiamo oro masė G_{oro_EGR} . Reikiamas EGR atidarymas pasiekiamas reguliuojant EGR valdymo slėgį ir nustatant apskaičiuotą įsiurbiamo oro masę:

$$G_{oro_EGR} = G_{oro} - k_{EGR} \cdot G_{oro}. \quad (3)$$

Atliekant eksperimentinius tyrimus pastebėta, kad EGR koeficientui esant 0,3, variklis negalėjo išvystyti 90 ir 120 Nm apkrovos, o esant 30 Nm apkrovai dirbo nestabiliai. Todėl, tolimesniam duomenų analizavimui buvo pasirinkta 60 Nm (vidutinis efektyvusis slėgis 0,4 MPa) variklio apkrova, kuri atitinka miesto režimą kai automobilio važiavimo greitis siekia apie 50 km/h.

Skaitinės analizės metodika. Degalų degimo skaitinė analizė leidžia geriau suprasti degimo metu vykstančius procesus, išsamiau analizuoti rodiklių skirtumų priežastis varikliui veikiant įvairiais degalais. Vienas iš svarbiausių degimo proceso rodiklių yra šilumos išsiskyrimo intensyvumas ($J/^\circ AV$), kuris nustatomas „AVL BOOST“ programa, naudojant „Burn“ paprogramę. Eksperimento metu užfiksuotas slėgis variklio cilindre yra pagrindinis rodiklis apskaičiuojant šilumos išsiskyrimą. Degimo procesą galima suskirstyti į užsiliepsnojimo vėlavimo, kinetinę, difuzinę ir vėlyvojo degimo fazes (Heywood, 2018), matomas šilumos išsiskyrimo grafike (4 pav.). Papildoma informacija apie degimo pradžią, užsiliepsnojimo vėlavimą, degimo trukmę, keičiant degalus, pateikta 4 lentelėje. Šie nustatyti rodikliai reikalingi norint apskaičiuoti šilumos išsiskyrimą naudojant Vibe funkciją (Vibe, 1970):

$$\frac{d_x}{d_\alpha} = \frac{\alpha}{\Delta\alpha_c} \cdot (m+1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}}, \quad (4)$$

$$dx = \frac{dQ}{Q}, \quad (5)$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_o}{\Delta\alpha_c}, \quad (6)$$

čia: Q – bendras degalų šiluminės energijos kiekis, J; α – alkūninio veleno pasisukimo kampas, $^\circ AV$; α_o – degimo pradžia $^\circ AV$; $\Delta\alpha_c$ – degimo trukmė, $^\circ AV$; m – intensyvumo rodiklis; a – Vibe rodiklis $a = 6,9$.

Vibe funkcijos integralas įvertina sudegusią degalų masės dalį (Vibe, 1970):

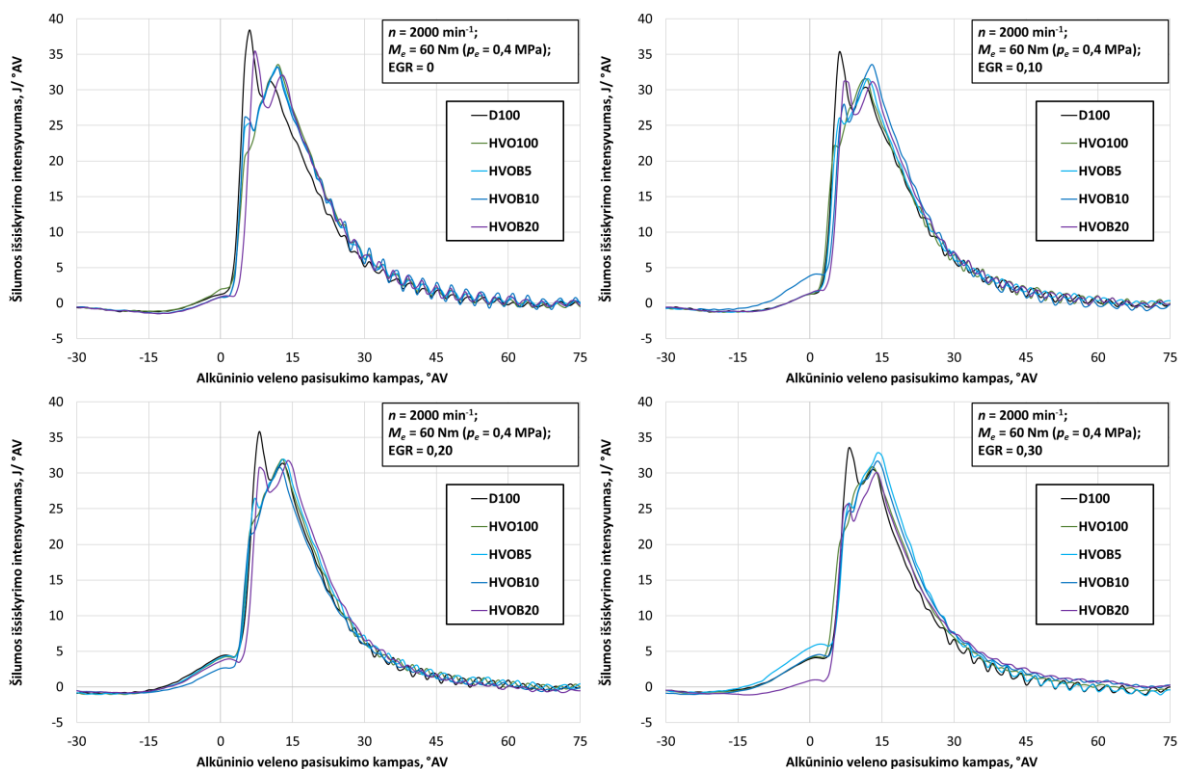
$$x = \int \frac{d_x}{d_\alpha} \cdot d_\alpha = 1 - e^{-a \cdot y^{(m+1)}}, \quad (7)$$

Apskaičiavus šilumos išsiskyrimą nustatomas temperatūros ir slėgio prieaugis cilindre, kurių rezultatai pateikiami tyrimų rezultatų skyriuje.

3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė

HVO100 ir be EGR ir naudojant EGR užsiliepsnojimo vėlavimas yra trumpiausias, lyginant su kitais degalais, dėl didžiausio cetaninio skaičiaus. Trumpesnis vėlavimas lemia mažesnę šilumos išsiskyrimo intensyvumą kinetinėje degimo fazėje ($\sim 22 J/^\circ AV$), kas mažina degimo temperatūrą ir NO_x emisiją. Difuzinėje degimo fazėje (kai EGR0) HVO100 pasiekia didžiausią šilumos išsiskyrimo intensyvumą ($\sim 33 J/^\circ AV$), kas geriau išdegina degimo metu susidariusius suodžius. Analogiškose sąlygose D100 kinetinėje degimo fazėje šilumos išsiskyrimo intensyvumas pasiekia aukščiausią reikšmę iš visų tirtų degalų ($\sim 38 J/^\circ AV$), kas lemia didžiausią azoto oksidų emisiją, o difuzinėje degimo fazėje šilumos išsiskyrimas pasiekia $\sim 31 J/^\circ AV$. Biobutanolio priedas HVO degaluose ilgina vėlavimo fazę, ko pasekoje šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje yra didesnis nei gryno HVO, bet nepasiekia D100 reikšmės. Difuzinėje degimo fazėje butanolio priedas į HVO turi tendenciją pavėlinti maksimalų šilumos išsiskyrimą, nes dėl sumažėjusio degalų šilumingumo (3 lentelė) reikalingas didesnis degalų kiekis, kuris purškiamas ilgiau.

Didėjant EGR iki 0,3 ir mažėjant degimo intensyvumui mažėja maksimalus šilumos išsiskyrimo intensyvumas kinetinėje degimo fazėje tiek D100 (iki $\sim 33 J/^\circ AV$), tiek HVO100 (iki $\sim 21 J/^\circ AV$) ir tai mažina NO_x emisiją. Maksimalus šilumos išsiskyrimo intensyvumas difuzinėje degimo fazėje mažai kinta, tačiau yra pasiekiamas $\sim 3^\circ AV$ vėliau (esant didesniai degimo tūriui), kas sumažina degimo temperatūrą ir didina dūmingumą (Mačiulis et al., 2022). EGR 0,2 ir 0,3 atveju išryškėja biobutanolio priedo įtaka didinant šilumos išsiskyrimo intensyvumą esant ilgesnei difuzinėje degimo fazei, kas mažina dūmingumą.



4 pav. Šilumos išsiskyrimo intensyvumo priklausomybė nuo alkūninio veleno padėties

Šaltinis: sudaryta autorių

4 lentelė

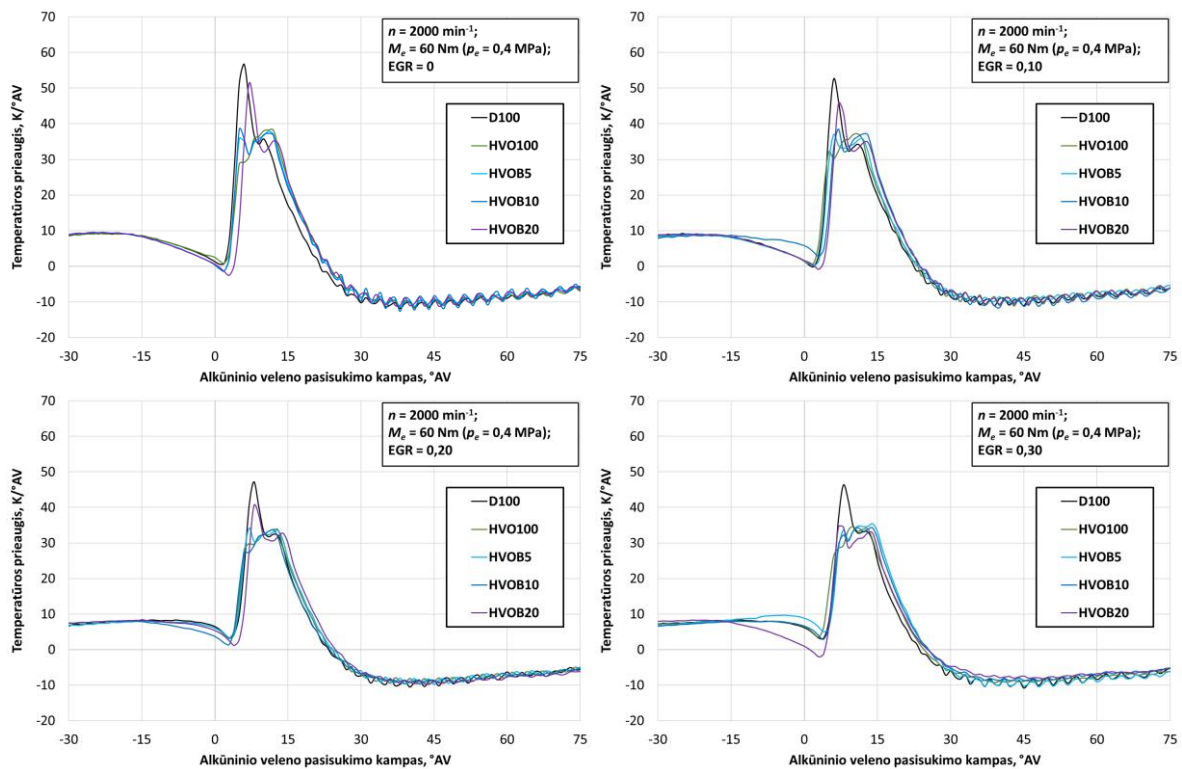
Degimo proceso rodikliai varikliui veikiant įvairiais degalais ir keičiant EGR

EGR	Rodikliai	D100	HVO100	HVOB5	HVOB10	HVOB20
EGR0	Į.Pr., °AV	5,4° AV PVGT	3,8° AV PVGT	3,7° AV PVGT	3,6° AV PVGT	3,2° AV PVGT
	Deg.Pr., °AV	1° AV UVGT	1,6° AV UVGT	1,9° AV UVGT	2° AV UVGT	3° AV UVGT
	Vėlavimas, °AV	6,4° AV	5,4° AV	5,6° AV UVGT	5,6° AV	6,2° AV
EGR0,1	Į.Pr., °AV	5,3° AV PVGT	4,1° AV PVGT	3,8° AV PVGT	3,6° AV PVGT	3,4° AV PVGT
	Deg.Pr., °AV	1,3° AV UVGT	1,3° AV UVGT	1,7° AV UVGT	2,2° AV UVGT	2,8° AV UVGT
	Vėlavimas, °AV	6,6° AV	5,4° AV	5,5° AV	5,8° AV	6,2° AV
EGR0,2	Į.Pr., °AV	5,2° AV PVGT	3,7° AV PVGT	3,8° AV PVGT	3,6° AV PVGT	3,2° AV PVGT
	Deg.Pr., °AV	2,6° AV UVGT	2,5° AV UVGT	2,7° AV UVGT	3,3° AV UVGT	3,8° AV UVGT
	Vėlavimas, °AV	7,8° AV	6,2° AV	6,5° AV	6,9° AV	7,0° AV
EGR0,3	Į.Pr., °AV	5,3° AV PVGT	3,6° AV PVGT	3,3° AV PVGT	3,2° AV PVGT	3,4° AV PVGT
	Deg.Pr., °AV	2,8° AV UVGT	3,1° AV UVGT	3,6° AV UVGT	3,8° AV UVGT	3,7° AV UVGT
	Vėlavimas, °AV	8,1° AV UVGT	6,7° AV UVGT	6,9° AV UVGT	7,0° AV UVGT	7,1° AV UVGT

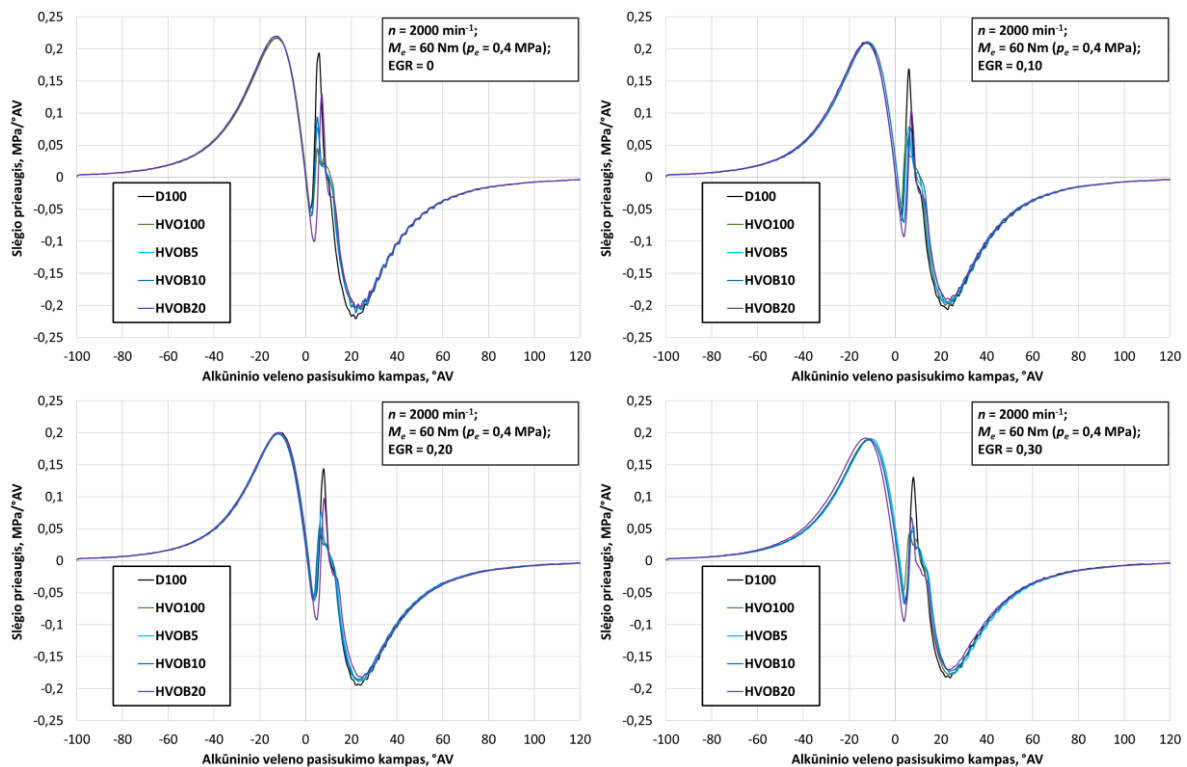
Šaltinis: sudaryta autorių

Lemiantys temperatūros pokyčio cilindre faktoriai yra degimo šilumos išsiskyrimas ir tūrio pokytis. Intensyvus degimo temperatūros prieaugis padidina stūmoklio ir degimo kameros terminį apkrovimą. Didžiausias maksimalus temperatūros prieaugis, kai EGR uždarytas pasiekiamas naudojant D100 degalus kinetinėje degimo fazėje (iki ~ 57 K/°AV), o mažiausias – naudojant HVO100 vėlesnėje difuzinėje degimo fazėje (iki ~ 38 K/°AV). Biobutanolio priedas didina temperatūros prieaugį kinetinėje degimo fazėje, tačiau degalų HVOB20 temperatūros augimas lieka mažesnis lyginant su D100 (5 pav.). Didėjant EGR, mažėja temperatūros prieaugis visų tirtų degalų rūšių ir tai mažina NO_x emisiją. Esant EGR 0,2 ir 0,3 ypač reikšmingai mažėja temperatūros prieaugis degalams, kuriuos naudojant temperatūra intensyviai augo kinetinėje degimo fazėje. Šiuo atveju degalams D100 maksimalus temperatūros prieaugis sumažėjo iki ~ 47 K/°AV, tačiau naudojant degalus HVO100 maksimalus temperatūros prieaugis sumažėjo mažiau (iki ~ 34 K/°AV). EGR0,2 atveju didinant biobutanolio koncentraciją nepastebimas reikšmingas temperatūros prieaugio didėjimas, tačiau matomas vėlyvesnis temperatūros prieaugis difuzinės fazės metu, kuris leidžia geriau išdeginti kietąsias daleles ir sumažinti dūmingumą. Taršos matavimo tyrimai rodo, kad varikliui veikiant degalų mišiniu HVOB20, kai EGR0,2, dūmingumas išauga neženkliai, o NO_x koncentracijos sumažėjimas yra reikšmingas (~ 38 %).

EGR0,2 atveju, biobutanolio koncentraciją didinant nu 5 % iki 20 %, variklio efektyvusis naudingumo koeficientas gerėja, nors lieka $\sim 2,5\%$ mažesnis lyginant su D100, kai EGR0. (Mačiulis et al., 2022).



5 pav. Temperatūros prieaugio priklausomybė nuo alkūninio veleno padėties
Šaltinis: sudaryta autorių

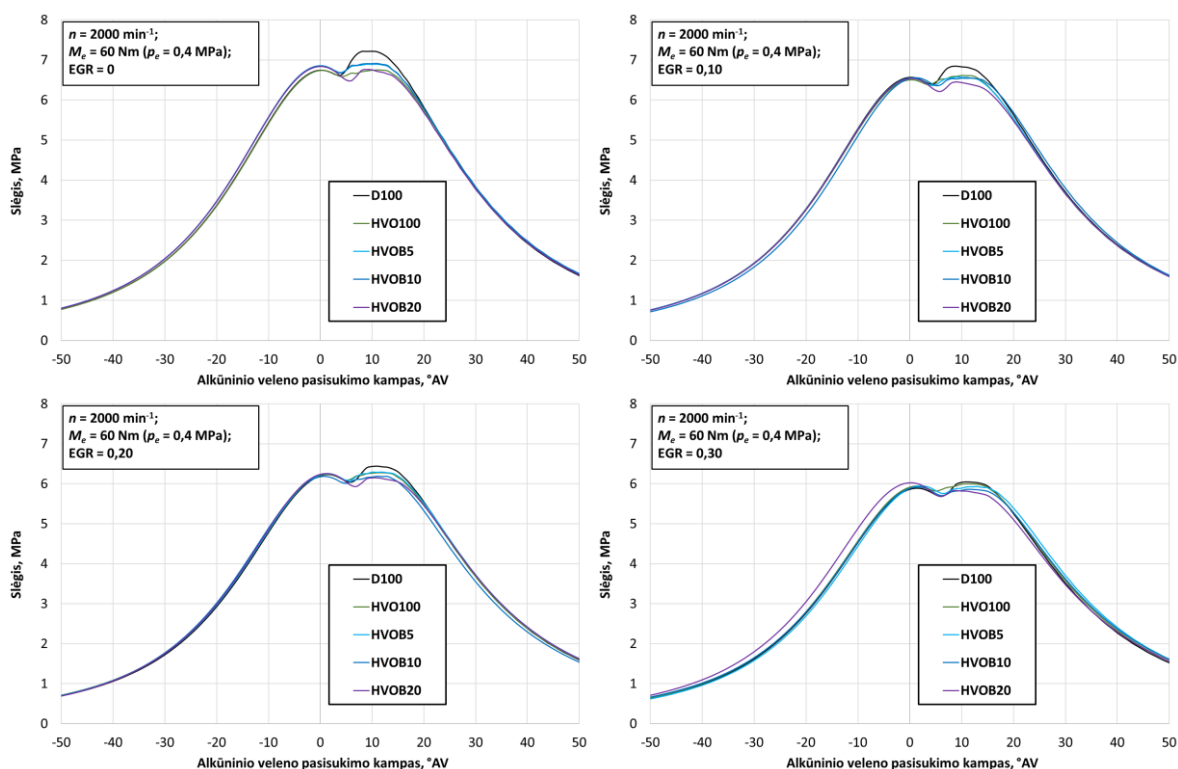


6 pav. Slėgio prieaugio priklausomybė nuo alkūninio veleno padėties
Šaltinis: sudaryta autorių

Slėgio prieaugis variklio cilindre daugiausia priklauso nuo tūrio virš stūmoklio ir temperatūros pokyčio. Intensyvus slėgio prieaugis sukelia didesnes alkūninio mechanizmo apkrovas ir triukšmą. Didžiausias slėgio prieaugis pasiekiamas kinetinėje degimo fazėje, stūmokliui esant netoli už VGT (6 pav.). Esant išjungtam

EGR, maksimalus slėgio prieaugis varikliui veikiant degalais D100 siekia $\sim 0,19$ MPa/ $^{\circ}$ AV, o didinant iki EGR0,3 sumažėja degimo intensyvumas ir slėgio prieaugis sumažėja iki $\sim 0,13$ MPa/ $^{\circ}$ AV. HVO100 atveju, kai EGR0 slėgio prieaugis yra žymiai mažesnis – tik $\sim 0,04$ MPa/ $^{\circ}$ AV, o padidinus EGR iki 0,3 slėgio prieaugis kinta nereikšmingai. Didinant biobutanolio koncentraciją mišinyje su HVO EGR0 atveju maksimalus slėgio prieaugis didėja, bet nepasiekia D100 lygio. Didėjant EGR iki 0,3, stebima mažėjanti slėgio prieaugio tendencija HVO ir biobutanolio mišiniams. Pvz. degalams HVOB20 kai EGR0 maksimalus slėgio prieaugis siekė $\sim 0,13$ MPa/ $^{\circ}$ AV (analogiškai kaip D100 esant EGR0,3), o pasiekus EGR0,2 – $\sim 1,0$ MPa/ $^{\circ}$ AV, EGR0,3 – $\sim 0,07$ MPa/ $^{\circ}$ AV.

Slėgis variklio cilindre (7 pav.) priklauso nuo kompresijos slėgio ir slėgio prieaugio degimo metu. Tai lemia, kad, esant pastoviam variklio apkrovimui ($M_e = 60$ Nm), kai EGR0 didžiausias slėgis pasiekiamas varikliui veikiant D100 degalais ($\sim 7,2$ MPa prie $\sim 8^{\circ}$ AV UVGT). Naudojant HVO100 maksimalus degimo slėgis yra mažesnis ir pasiekiamas vėliau ($\sim 6,8$ MPa prie $\sim 12^{\circ}$ AV UVGT). 5 % ir 10 % biobutanolio priedas padidina ir paankstina maksimalų degimo slėgį iki $\sim 6,9$ MPa prie $\sim 10^{\circ}$ AV UVGT, tačiau HVOB20 atveju slėgis vėl krenta iki $\sim 6,8$ MPa, nes degimas prasideda vėliau.



7 pav. Slėgio priklausomybė nuo alkūninio veleno padėties

Šaltinis: sudaryta autorių

Didinant EGR nuo 0 iki 0,3 dėl grąžinamų karštų deginių kompresijos slėgis sumažėja nuo $\sim 6,9$ MPa iki 5,9...6,0 MPa ir tai įtakoja mažesnę degimo slėgį. EGR0,3 atveju ir D100 ir HVO100 degalų maksimalus degimo slėgis pakyla iki $\sim 6,0$ MPa prie $\sim 11^{\circ}$ AV UVGT. Didinant EGR intensyvumą iki 0,3 ir didinant biobutanolio koncentraciją mišinyje su HVO iki 20 % maksimalus degimo slėgis palaipsniui mažėja iki $\sim 5,8$ MPa, nes degalai užsidega vėliau ir dega esant didesniai degimo tūriui.

Išvados

Slėginio uždegimo varikliui veikiant vidutine apkrova ir dyzeliną pakeitus HVO ir biobutanolio mišiniais bei keičiant EGR intensyvumą, gauti degimo proceso skaitinės analizės rezultatai, kurie pateikti apibendrinančiose išvadose:

1. Aukštesnis HVO ir biobutanolio mišinių cetaninis skaičius ir trumpesnė užsiliepsnojimo vėlavimo fazė leidžia sumažinti šilumos išsiskyrimo intensyvumą, temperatūros ir slėgio prieaugį kinetinėje degimo fazėje ir tai mažina NO_x emisijas bei alkūninio mechanizmo mechaninį ir šiluminį apkrovimą.
2. Didėjant biobutanolio koncentracijai mišinyje su HVO didėja degimo intensyvumas difuzinėje degimo fazėje, kas geriau išdegina kietąsias daleles ir mažina dūmingumą. Ilgesnė vėlyvo degimo trukmė mažina variklio šiluminį efektyvumą.

3. Didinant EGR intensyvumą degimas slopinamas ir tai mažina NO_x emisijas bet dėl žemesnės degimo temperatūros difuzinėje fazėje dūmingumas bus didinamas. Naudojant EGR ir pritaikius optimalią biobutanolio koncentraciją augantį dūmingumą galima sumažinti, nes biobutanolis turi mažesnę C/H santykį bei jo sudėtyje yra deguonies, kuris gerina degimą.

4. Kompleksiškai vertinant eksperimentinį ir degimo proceso skaitinio modeliavimo tyrimą nustatyta, kad analizuojamam variklio veikimo režimui (sukimosi greitis 2000 min⁻¹, apkrova 60 Nm – vidutinis efektyvusis slėgis 0,4 MPa) naudojant biodegalų mišinį HVOB20, kai EGR0,2, NO_x koncentracija sumažinama reikšmingai (~ 38%), o dūmingumas išauga nežymiai lyginant su D100, kai EGR išjungtas. Šiuo atveju variklio energetinis efektyvumas yra ~2,5% mažesnis.

Literatūra

1. Goga, G., Chauhan, B. S., Mahla, S. K., & Cho, H. M. (2019). Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. *Energy Reports*, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.12.002>.
2. Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (Second edition). McGraw-Hill Education.
3. *Horsepower/Torque Curve 1991 Audi 80 1.9 TDI (man. 5) (model since mid-year 1991 for Europe)*. Detailed engine characteristics. (n.d.). Retrieved December 31, 2022, from https://www.automobile-catalog.com/curve/1991/236630/audi_80_1_9_tdi.html#gsc.tab=0.
4. Mačiulis, D., Rimkus, A., & Matijošius, J. (2022). Slėginio uždegimo variklio rodiklių analizė naudojant įvairių biodegalų mišinius ir keičiant išmetamųjų dujų recirkuliacijos intensyvumą. *Technologijos ir menas*, 13, 10–16.
5. Mollenhauer, K., & Tschöke, H. (Eds.). (2010). *Handbook of diesel engines: With 86 tables*. Springer.
6. Nour, M., Attia, A. M. A., & Nada, S. A. (2019). Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 185, 313–329. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.105>.
7. Puricelli, S., Cardellini, G., Casadei, S., Faedo, D., van den Oever, A. E. M., & Grosso, M. (2021). A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110398>.
8. Rakopoulos, C. D., & Giakoumis, E. G. (2009). *Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-375-4>.
9. Rayapureddy, S. M., Matijošius, J., Rimkus, A., Caban, J., & Słowik, T. (2022). Comparative Study of Combustion, Performance and Emission Characteristics of Hydrotreated Vegetable Oil–Biobutanol Fuel Blends and Diesel Fuel on a CI Engine. *Sustainability*, 14(12), 7324. <https://doi.org/10.3390/su14127324>.
10. Reif, K. (Ed.). (2014). *Diesel Engine Management: Systems and Components* (2014th edition). Springer.
11. Rimkus, A., Stravinskas, S., & Matijošius, J. (2020). Comparative Study on the Energetic and Ecologic Parameters of Dual Fuels (Diesel–NG and HVO–Biogas) and Conventional Diesel Fuel in a CI Engine. *Applied Sciences*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/app10010359>.
12. Rimkus, A., Vipartas, T., Matijošius, J., Stravinskas, S., & Kriaučiūnas, D. (2021). Study of Indicators of CI Engine Running on Conventional Diesel and Chicken Fat Mixtures Changing EGR. *Applied Sciences*, 11(4), 1411. <https://doi.org/10.3390/app11041411>.
13. Shepel, O., Matijošius, J., Rimkus, A., Duda, K., & Mikulski, M. (2021). Research of Parameters of a Compression Ignition Engine Using Various Fuel Mixtures of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Fatty Acid Esters (FAE). *Energies*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/en14113077>.
14. Transportas — Europos aplinkos agentūra. (n.d.). [Puslapis]. Retrieved December 29, 2021, from <https://www.eea.europa.eu/lt/themes/transport/intro>.
15. Tutak, W., Jamrozik, A., & Grab-Rogaliński, K. (2021). The Effect of RME-1-Butanol Blends on Combustion, Performance and Emission of a Direct Injection Diesel Engine. *Energies*, 14(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/en14102941>.
16. Vibe, I. I. (1970). *Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren*. Verlag Technik, Berlin.

Padėka. Straipsnyje atlikti tyrimo rezultatai gauti naudojant AVL BOOST vidaus degimo variklių modeliavimo programą, įsigytą pasirašius bendradarbiavimo sutartį tarp AVL Advanced Simulation Technologies ir VGTU Transporto inžinerijos fakulteto.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE COMBUSTION PROCESS OF A COMPRESSION IGNITION ENGINE USING DIFFERENT BIOFUEL BLENDS AND CHANGING EGR

Summary

The combustion phases of a compression ignition engine are reviewed, assessing their impact on the engine's energetic and ecological indicators. The main properties of the fuels used in the study (diesel, hydrotreated vegetable oils – HVO, HVO mixtures with biobutanol) were evaluated. Experimental studies were carried out using various biofuel mixtures

and changing the intensity of Exhaust Gas Recirculation – EGR. Based on the experimental results, a numerical analysis of the combustion process was performed using the „Burn“ subroutine of the „AVL BOOST“ program. Identified differences in combustion rates and probable causes provide a better understanding of combustion processes when the engine is run on different fuels and EGR is changed. This allows you to choose the most suitable fuel mixture and EGR to achieve the best ecological and energy performance of the engine.

Key words. Compression ignition engine, ignition delay period, premixed combustion phase, mixing – controlled combustion phase, biobutanol, exhaust gas recirculation.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Dovydas Mačiulis.

Mokslo laipsnis ir vardas: studentas, magistrantas.

Darbo vietą ir poziciją: Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Transporto inžinerijos fakulteto Automobilių inžinerijos katedros magistrantas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.

Telefonas ir el. pašto adresas: +37068319202, dovydasmaciulis@stud.vilniustech.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Alfredas Rimkus.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas.

Darbo vieta ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Automobilių inžinerijos katedros docentas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 61571161, alfredas.rimkus@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Dovydas Mačiulis.

Science degree and name: student, postgraduate.

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering faculty, Automobile Engineering department department master student.

Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.

Telephone and e-mail address: +37068319202, dovydasmaciulis@stud.vilniustech.lt

Author name, surname: Alfredas Rimkus.

Science degree and name: associated professor.

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering faculty Automobile Engineering department associated professor.

Author's research interests: Internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.

Telephone and e-mail address: +370 61571161, alfredas.rimkus@vgtu.lt



VILNIUS
COLLEGE OF
TECHNOLOGIES
AND DESIGN

Certificate

Nº. TF-41

It is hereby certified that

Dovydas Mačiulis
participated

in Vilnius Technology and Design College

CONFERENCE TECHNICAL INNOVATIONS 2023:

TOWARDS EUROPE'S GREEN COURSE

and made the report

„COMBUSTION PROCESS ANALYSIS OF COMPRESSION IGNITION ENGINE RUNNING ON VARIOUS
BIOFUEL BLENDS AND CHANGING EGR”

Dean of Technica Faculty



PhD Gražina Strazdienė

The 22th of March 2023
Vilnius