

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē
Inženierzinātņu un informācijas tehnoloģiju fakultātē
Inženiertehnikas un enerģētikas institūts



Mg.sc.ing. **Kristaps Sondors**

promocijas darbs

**HIDROGENĒTAS AUGU EĻĻAS IZMANTOŠANA
DĪZELMOTOROS**

***HYDROTREATED VEGETABLE OIL APPLICATION
IN DIESEL ENGINES***

zinātnes doktora grāda

zinātnes doktors (Ph.D.) inženierzinātnēs un tehnoloģijās

iegūšanai

Promocijas darba vadītājs
profesors, Dr.sc.ing. **Ilmārs Dukulis**

Promocijas darba autors

Jelgava

2023

VISPĀRĪGĀ INFORMĀCIJA

Darba izpildes vieta: pētījumi veikti laika posmā no 2013. gada līdz 2023. gada 31. augustam Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (LBTU) Tehniskās fakultātes (TF) Spēkratu institūta (SI) Alternatīvo degvielu zinātniskajā laboratorijā (ADZL) un TF Datorprojektēšanas laboratorijā (DPL).

Publikācijas vispāratzītos recenzējamos izdevumos

1. **Sondors K.**, Birkavs A., Dukulis I., Pirs V., Jesko Z. (2014) Investigation in tractor *Claas Ares 557ATX* operating parameters using hydrotreated vegetable oil fuel. **In:** *13th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings, Volume 13*, May 29 – 30, 2014. Jelgava: LLU, p. 63 – 68. ISSN 1691-5976. (Scopus, Web of Science, EBSCOhost Academic Search Complete, CAB Abstracts, AGRIS, http://tf.llu.lv/conference/proceedings2014/Papers/10_Sondors_K.pdf)
2. **Sondors K.**, Dukulis I. (2014) Theoretical Evaluation of Hydrotreated Vegetable Oil Application in Diesel Engines. **In:** *Proceedings of the 20th International Scientific Conference “Research for Rural Development”, Volume 1*, ISSN 1691-4031. May 21 – 23, 2014. Jelgava: LLU, p. 205 – 211. ISSN 1691-4031. (Scopus, Web of Science, EBSCOhost Acad. Search Complete, AGRIS, CABI, http://llufb.llu.lv/conference/Research-for-Rural-Development/2014/LatviaResearchRuralDevel20th_volume1-205-211.pdf)
3. **Sondors K.**, Birkavs A., Pirs V., Birzietis G., Dukulis I. (2019) Comparison of vehicle performance using fossil diesel fuel blends with biodiesel and HVO fuel. **In:** *18th International scientific conference “Engineering for rural development”: Proceedings, Volume 18*, May 22 – 24, 2019. Jelgava: LLU. ISSN 1691-5976. p. 964 – 970. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N052 (Scopus, Web of Science, Crossref, EBSCOhost Academic Search Complete, EBSCOhost Academic Search Ultimate, AGRIS, CAB Abstracts, CABI Full text, <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N052.pdf>)
4. **Sondors K.**, Dukulis I., Pirs V., Birkavs A., Birzietis G., Gailis M. (2021) Comparison of car performance using HVO fuel and diesel fuel. **In:** *20th International scientific conference “Engineering for rural development”: Proceedings, Volume 20*, May 26 – 28, 2021. Jelgava: LLU. p. 1548 – 1557. ISSN 1691-5976. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF331 (Scopus, Web of Science, Crossref, CAB Abstracts, CABI Full text, EBSCOhost Academic Search Complete, EBSCOhost Academic Search Ultimate, EBSCOhost Central & Eastern European Academic Source, EBSCOhost Belt & Road Init. Ref. Source, <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF331.pdf>)
5. Smigins R., **Sondors K.**, Pirs V., Dukulis I., Birzietis G. (2023). Studies of engine performance and emissions at full-load mode using HVO, diesel fuel, and HVO5. *Energies*, 16(2), article number 4785. DOI: 10.3390/en16124785 (Scopus, Web of Science, AGRIS, CAB Abstracts, Chemical Abstracts, Current Contents – Engineering, Computing & Technology (Clarivate Analytics), DOAJ – Directory of Open Access Journals, EconPapers (RePEc), Ei Compendex / Engineering Village (Elsevier), ETDE – Energy Technology Data Exchange (IEA), Inspec (IET), <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/12/4785>).

Pārējās publikācijas

1. **Sondors K.**, Dukulis I. (2012) Microalgae oil as biodiesel source. **In:** *7th International scientific conference “Students on their way to science” (undergraduate, graduate, post-graduate students): collection of abstracts*, May 25, 2012. Jelgava: LLU, Faculty of Social Sciences, Faculty of Engineering, Forest Faculty. p. 43 (AGRIIS, CAB Abstracts, http://llufb.llu.lv/conference/Students_their_Way_Science/7th_Conf_Students_their_Way_Science_2012.pdf)
2. **Sondors K.**, Dukulis I. (2013) Microalgae cultivation in raceway pond. **In:** *8th International scientific conference “Students on their way to science” (undergraduate,*

graduate, post-graduate students): collection of abstracts, May 24, 2013. Jelgava: LLU, Faculty of Social Sciences, Faculty of Engineering, Forest Faculty. p. 49 (CAB Abstracts, http://llufb.llu.lv/conference/Students_their_Way_Science/Latvia_8th_Conf_Students_their_Way_Science_2013.pdf).

Uzstāšanās starptautiskās zinātniskās konferencēs ar ziņojumiem

1. Microalgae oil as biodiesel source. 7th International scientific conference “Students on their way to science” (undergraduate, graduate, post-graduate students). Jelgava: LLU, Latvia, May 25, 2012.
2. Microalgae cultivation in raceway pond. 8th International scientific conference “Students on their way to science” (undergraduate, graduate, post-graduate students). Jelgava: LLU, Latvia, May 24, 2013.
3. Investigation in tractor Claas Ares 557ATX operating parameters using hydrotreated vegetable oil fuel. 13th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. Jelgava: LLU, Latvia, May 29 – 30, 2014.
4. Theoretical Evaluation of Hydrotreated Vegetable Oil Application in Diesel Engines. 20th International Scientific Conference “Research for Rural Development”. Jelgava: LLU, Latvia, May 21 – 23, 2014.
5. Comparison of vehicle performance using fossil diesel fuel blends with biodiesel and HVO fuel. 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. Jelgava: LLU, Latvia, May 22 – 24, 2019.
6. Comparison of car performance using HVO fuel and diesel fuel. 20th International scientific conference “Engineering for rural development”. Jelgava: LLU, Latvia, May 26 – 28, 2021.

Citas uzstāšanās

1. Sondors K. Hidroģenētas augu eļļas izmantošana dīzeļmotoros: ziņojums par promocijas darbu LLMZA organizētajā lauka izmēģinājumā un laboratoriju skatē, 4. augusts, 2023.

Dalība ar promocijas darbu saistītos projektos

1. 2013. g. marts – maijs. – Automašīna ekspluatācijas rādītāju salīdzinājums, to darbinot ar NExBTL un standarta dīzeļdegvielu. Līguma Nr. L198. Pasūtītājs: SIA Neste Latvija.
2. 2013. g. septembris – oktobris. – Biodīzeļdegvielas un NExBTL degvielas piejaukuma ietekmes pētījumi uz automašīna ekspluatācijas parametriem. Līguma Nr. L205. Pasūtītājs: SIA Neste Latvija.

Darbs izskatīts un akceptēts Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Tehniskās fakultātes Spēkratu institūta paplašinātajā akadēmiskā personāla sēdē 2023. gada 20. jūnijā (protokols Nr. 7.3.4.-4/4).

ANOTĀCIJA

Sondors K. Hidrogenētas augu eļļas izmantošana dīzeļmotoros: promocijas darbs zinātnes doktora (Ph.D.) grāda iegūšanai. Jelgava: Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, 2023. 154 lpp., 77 att., 24 tab., 159 bibl. nos., 25 pielikumi.

Atslēgas vārdi: biodegviela, hidrogenēta augu eļļa, dīzeļmotors, jauda, griezes moments, degvielas patēriņš, izmeši.

Darba hipotēze: izmantojot hidrogenētu augu eļļu vai tās maisījumus ar fosilo dīzeļdegvielu, iespējams iegūt labākus vai līdzvērtīgus tehniskos, ekonomiskos un ekoloģiskos rādītājus, salīdzinot ar fosilo degvielu vai pirmās paaudzes biodegvielu.

Darba mērķis ir teorētiski un eksperimentāli novērtēt hidrogenētās augu eļļas izmantošanas iespējas dīzeļmotoros, tādējādi radot iespēju veicināt atjaunojamo energoresursu plašāku izmantošanu Latvijā un pasaulē.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi **uzdevumi**:

- izanalizēt līdz šim veiktos pētījumus hidrogenētas augu eļļas ražošanā, izmantošanā un ietekmē uz motoru un spēkratu ekspluatācijas parametriem;
- izstrādāt ar hidrogenētu augu eļļu darbināmu spēkratu izmēģinājumu metodiku;
- eksperimentāli izpētīt un novērtēt hidrogenētas augu eļļas izmantošanas iespējas un motoru ekspluatācijas parametrus dažāda tipa spēkratos;
- veikt matemātisko modelēšanu ar dīzeļmotoriem darbināmu spēkratu ekspluatācijas parametru noteikšanai, izmantojot dažādas degvielas un to maisījumus, kā arī novērtēt modeļa efektivitāti;
- novērtēt hidrogenētas augu eļļas izmantošanas ekonomisko un ekoloģisko lietderīgumu.

Pirmajā nodaļā sniegta biodegvielu klasifikācija un identificēta HVO vieta šajā topoloģijā, veikts HVO degvielas īpašību salīdzinājums ar citām dīzeļmotoros izmantojamajām degvielām, analizētas HVO ražošanā izmantotās tehnoloģijas un izejvielas, kā arī HVO degvielas izmantošana dīzeļmotoros un tās ietekme uz spēkratu ekspluatācijas parametriem.

Otrajā nodaļā aprakstītas eksperimentālajos pētījumos izmantotās iekārtas un materiāli, kā arī dota katras pētījumu programmas metodika. Tā kā eksperimentālie pētījumi, balstoties uz pētāmo objektu specifiku (tiek pētīts automobilis, traktors un motors), tiek veikti, izmantojot dažādus standus – šasijas dinamometru, jūgvārpstas jaudas standu un motorstandu, izstrādātas trīs atsevišķas eksperimentālo pētījumu metodikas. Dots teorētiskā modeļa apraksts.

Trešajā nodaļā doti katras pētījumu programmas rezultāti un secinājumi, salīdzinot tos ar citu valstu pētnieku konstatēto. Kopumā visās pētījumu programmas aptverti gan ar tīrām degvielām (HVO un fosilās dīzeļdegvielu) dažādos spēkratos un motoros iegūtie jaudas, griezes momenta, degvielas patēriņa un atgāzu sastāva rezultāti, gan arī to salīdzinājums ar dažādu maisījumu degvielu izmantošanu.

Ceturtajā nodaļā akcentēta tiešo siltumnīcefekta gāzu apjoma analīze, salīdzinot HVO un fosilās dīzeļdegvielas izmantošanu, vienlaikus vispārinot arī dažādās eksperimentālo pētījumu programmās iegūtos izmešu rezultātus. Dots arī HVO degvielas izmantošanas ekonomiskais novērtējums.

Pētījumu rezultātā pierādīts, ka hidrogenēta augu eļļa ir perspektīva jaunākās paaudzes degviela izmantošanai tīrā veidā vai maisījumos, lai aizstātu fosilo dīzeļdegvielu un tās maisījumus ar pirmās paaudzes biodegvielu, nodrošinot labākus vai līdzvērtīgus tehniskos rādītājus. HVO degvielas plašāks pielietojums dos ieguldījumu SEG emisiju samazināšanā un atjaunojamo resursu izmantošanas mērķrādītāju sasniegšanā.

ANNOTATION

Sondors K. Hydrotreated vegetable oil application in diesel engines: doctoral thesis for the Doctoral degree of Science (Ph.D.). Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2023. 154 p., 77 fig., 24 tab., 159 bibl. sources, 25 appendices.

Key words: biofuel, hydrotreated vegetable oil, diesel engine, power, torque, fuel consumption, emissions.

Working hypothesis of the thesis: using hydrotreated vegetable oil or its blends with fossil diesel fuel it is possible to obtain better or equivalent technical, economic and ecological results compared to fossil fuel or first generation biofuels.

The aim of the work is to evaluate theoretically and experimentally the possibilities of using hydrotreated vegetable oil in diesel engines, thus creating an opportunity to promote the wider use of renewable energy resources in Latvia and the world.

The following **tasks** have been set to achieve the goal of the work:

- to analyse the studies carried out in the production, use and influence of hydrotreated vegetable oil on the operating parameters of engines and vehicles;
- to develop a testing methodology for vehicles powered by hydrotreated vegetable oil;
- to investigate experimentally and to evaluate the possibilities of using hydrotreated vegetable oil and engine operating parameters in different types of diesel vehicles;
- to perform mathematical modeling for determining the operating parameters of diesel engine-powered vehicles using different fuels and their blends, and to evaluate the effectiveness of the model;
- to evaluate the economic and ecological feasibility of using hydrotreated vegetable oil.

The **first chapter** presents the classification of biofuels and identifies the place of HVO in this topology, compares the properties of HVO fuel with other fuels used in diesel engines, analyzes the technologies and raw materials used in the production of HVO, as well as the use of HVO fuel in diesel engines and its impact on vehicle operating parameters.

The **second chapter** describes the equipment and materials used in the experimental research, as well as the methodology of each research program. Since the experimental studies, based on the specifics of the researched objects (car, tractor and engine), are carried out using different equipment – chassis dynamometer, PTO dynamometer and motor AC dynamometer, three separate experimental research methodologies have been developed. A description of the theoretical model is given.

The **third chapter** presents the results and conclusions of each research program, comparing them with the findings of researchers from other countries. In general, all research programs cover both the results of power, torque, fuel consumption and composition of exhaust gases obtained with clean fuels (HVO and fossil diesel fuel) in various vehicles and engines, as well as their comparison with the use of various blended fuels.

The **fourth chapter** emphasizes the analysis of the amount of direct greenhouse gases, comparing the use of HVO and fossil diesel fuel, while also generalizing the emission results obtained in various experimental research programs. An economic assessment of the use of HVO fuel is also given.

As a **result of research**, it has been proven that hydrotreated vegetable oil is a promising new generation fuel for use in pure form or in blends to replace fossil diesel fuel and its blends with the first generation biofuels, providing better or equivalent technical characteristics. The wider use of HVO fuel will contribute to the reduction of GHG emissions and the achievement of the targets for the use of renewable resources.

SATURS

Tabulu saraksts	8
Attēlu saraksts	9
Pielikumu saraksts	12
Darbā lietotie simboli, saīsinājumi un apzīmējumi	13
Ievads.....	15
1. Hidrogenētās augu eļļas degvielas pētījumu apskats un analīze.....	19
1.1. Biodegvielu klasifikācija un HVO vieta šajā topoloģijā	19
1.2. HVO degvielas īpašību salīdzinājums ar citām dīzeļmotoros izmantojamajām degvielām	22
1.3. HVO ražošanā izmantotās tehnoloģijas un izejvielas.....	24
1.4. HVO izmantošana dīzeļmotoros un tās ietekme uz spēkratu ekspluatācijas parametriem	25
1.4.1. Degvielas sadegšanas process	25
1.4.2. Motoru/spēkratu veiktspēja un degvielas patēriņš	29
1.4.3. Izmešu sastāvs	34
1.4.4. Degvielas izmantošana dažādās apkārtējās vides temperatūrās un ietekme uz dažādu spēkratu sistēmu elementiem.....	39
1.5. Nodaļas kopsavilkums	41
2. Materiāli un metodes.....	43
2.1. Eksperimentālajos pētījumos izmantotās iekārtas un materiāli	44
2.1.1. Pētījumos izmantotās degvielas	44
2.1.2. Pētījumos izmantotais automobilis Opel Insignia.....	46
2.1.3. Pētījumos izmantotais traktors Class Ares 557ATX.....	46
2.1.4. Jaudas stends Mustang MD – 1750.....	47
2.1.5. Jūgvārpstas jaudas stends MAHA ZW-500	48
2.1.6. Jaudas stends SIERRA CP-Engineering un motors KOHLER KDI 1903... 48	
2.1.7. Degvielas patēriņa mēriekārta AVL KMA Mobile.....	49
2.1.8. Atgāzu analītiskā sistēma AVL SESAM FTIR.....	50
2.2. Eksperimentālo pētījumu programmu metodikas	51
2.2.1. Pētījumu programmu PP-2 un PP-3 eksperimentālo pētījumu metodika.....	51
2.2.2. Pētījumu programmas PP-4 eksperimentālo pētījumu metodika	55
2.2.3. Pētījumu programmas PP-5 eksperimentālo pētījumu metodika	57
2.3. Teorētiskā modeļa apraksts	59
2.4. Nodaļas kopsavilkums	65
3. Rezultāti un diskusija	66
3.1. Pētījumu programma PP-2 – vieglā automobiļa testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD un HVO	66
3.2. Pētījumu programmas PP-2 kopsavilkums.....	74
3.3. Pētījumu programma PP-3 – vieglā automobiļa testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD, HVO7 un BioDD7	75
3.4. Pētījumu programmas PP-3 kopsavilkums.....	82

3.5.	Pētījumu programma PP-4 – traktora testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD un HVO	83
3.6.	Pētījumu programmas PP-4 kopsavilkums	86
3.7.	Pētījumu programma PP-5 – motora testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD, HVO un HVO5	87
3.8.	Pētījumu programmas PP-5 kopsavilkums	92
3.9.	Pētījumu programma PP-1 – teorētiskie pētījumi un to rezultāti	92
3.10.	Pētījumu programmas PP-1 kopsavilkums	95
4.	Hidrogenētas augu eļļas izmantošanas ekoloģiskais un ekonomiskais novērtējums	96
4.1.	SEG emisiju kalkulatoru izmantošana	98
4.2.	LR MK noteikumos noteiktās SEG emisiju metodikas izmantošana	99
4.3.	SEG emisiju aprēķins, balstoties uz eksperimentos iegūtajiem datiem	101
4.4.	HVO degvielas izmantošanas ekonomiskais novērtējums	104
4.5.	Nodaļas kopsavilkums	105
	Secinājumi un priekšlikumi	107
	Informācijas avotu bibliogrāfiskais saraksts	110
	Pielikumi	120

TABULU SARAKSTS

1.1. tabula.	FDD, BioDD un HVO fizikālo īpašību salīdzinājums	23
1.2. tabula.	LBTU testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums	32
1.3. tabula.	Emisiju salīdzinājums Itālijā veiktajā pētījumā	37
1.4. tabula.	Somijā testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums	38
1.5. tabula.	Itālijā testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums	38
2.1. tabula.	Pētījumu programmās PP-2 un PP-4 izmantoto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums	44
2.2. tabula.	Pētījumu programmā PP-3 izmantoto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums	45
2.3. tabula.	Pētījumu programmā PP-5 izmantoto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums	45
2.4. tabula.	Eksperimentos izmantotais automobilis <i>Opel Insignia 2.0 CDTi</i>	46
3.1. tabula.	Degvielas patēriņš litros uz 100 km dažādos braukšanas režīmos, lietojot FDD un HVO degvielu.....	68
3.2. tabula.	FDD un HVO degvielas būtiskākās īpašības	69
3.3. tabula.	Degvielas patēriņa rezultātu kļūdas novērtēšanas aprēķinu piemērs.....	69
3.4. tabula.	Degvielas patēriņš kg uz 100 km dažādos braukšanas režīmos, lietojot FDD un HVO degvielu.....	70
3.5. tabula.	Atgāzu satura komponentu samazinājums dažādos braukšanas režīmos, lietojot HVO degvielu, salīdzinot pret FDD	72
3.6. tabula.	Degvielas patēriņš dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas.....	78
3.7. tabula.	NO _x satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas.....	80
3.8. tabula.	Nesadegušo ogļūdeņražu satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas	80
3.9. tabula.	SO ₂ satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas.....	81
3.10. tabula.	CO ₂ satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas.....	81
3.11. tabula.	CO satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas.....	81
3.12. tabula.	Jaudas un griezes momenta modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	93
3.13. tabula.	Zemākās siltumspējas, blīvuma un degvielas patēriņa modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām.....	94
3.14. tabula.	Modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar piecām dažādām degvielām	94
4.1. tabula.	Kopējo SEG emisiju aprēķins, darbinot automobili ar HVO un FDD	102

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att.	Biodegvielu klasifikācija, pamatojoties uz tehnoloģiju attīstību.....	20
1.2. att.	Iekšdedzes motoros izmantojamo biodegvielu klasifikācijas un ieguves shēma	21
1.3. att.	Vienkāršota HVO ražošanas procesa shēma	24
1.4. att.	Degvielas izsmidzināšanas process	26
1.5. att.	Dažādas siltuma izdalīšanās fāzes tipiskā dīzeļdegvielas sadegšanas gadījumā.....	26
1.6. att.	Vienkāršots dīzeļdegvielas sadegšanas zonu modelis	26
1.7. att.	Portugālē veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma	30
1.8. att.	Lietuvā veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma	31
1.9. att.	LBTU veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma	32
1.10. att.	Automobiļa jaudas un griezes momenta raksturliķnes LBTU veiktajos testos	32
1.11. att.	Degvielas patēriņa izmaiņas LBTU veiktajos testos	33
1.12. att.	Čehijā veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma.....	34
1.13. att.	Integrētās visu režīmu izmešu sastāva izmaiņas Čehijā veiktajos testos.....	35
1.14. att.	NO _x , PM, HC un CO emisijas ASV veiktajā pētījumā	36
2.1. att.	Teorētisko un eksperimentālo pētījumu vispārīgā blokshēma	43
2.2. att.	NExBTL degviela tarā, degvielas paraugs un ierīce laboratorijas mikroklimata parametru noteikšanai.....	44
2.3. att.	Pētījumu programmā PP-3 izmantoto degvielu paraugi.....	45
2.4. att.	Eksperimentos izmantotais automobilis <i>Opel Insignia 2.0 CDTi</i>	46
2.5. att.	Eksperimentos izmantotais traktors <i>Class Ares 557ATX</i>	46
2.6. att.	Uz jaudas stenda <i>Mustang MD – 1750</i> nostiprināts testējamais automobilis	47
2.7. att.	<i>MAHA ZW500</i> jaudas stends	48
2.8. att.	Jaudas stends <i>SIERRA CP-Engineering</i> un motors <i>KOHLER KDI 1903</i>	49
2.9. att.	Degvielas patēriņa mēriekārta <i>AVL KMA Mobile</i>	49
2.10. att.	Atgāzu analītiskā sistēma <i>AVL SESAM FTIR</i>	50
2.11. att.	PP-2 un PP-3 izmēģinājumu programmas shēma.....	51
2.12. att.	Iekārtu un mērierīču izkārtojums pētījumu programmu PP-2 un PP-3 veikšanai ...	52
2.13. att.	Jelgavas cikla ātruma līkne un pārnese pārslēgšanas punkti	53
2.14. att.	Iekārtas un ierīces pētījumu programmas PP-4 veikšanai	55
2.15. att.	Pētījumu programmas PP-4 neapstrādātu datu piemēri.....	56
2.16. att.	Iekārtu un mērierīču izkārtojums pētījumu programmas PP-5 veikšanai.....	57
2.17. att.	Pētījumu programmas PP-5 neapstrādātu jaudas un griezes momenta datu piemērs.....	58
2.18. att.	Pētījumu programmas PP-5 neapstrādātu degvielas patēriņa datu piemērs	58
2.19. att.	Pētījumu programmas PP-5 neapstrādātu izmešu datu piemērs	58
2.20. att.	Modeļa blokshēma.....	59
2.21. att.	Modeļa bloki degvielas maisījuma satura un zemākās siltumspējas vērtības noteikšanai	60
2.22. att.	Modeļa bloku piemērs siltuma bilances vienādojuma parametru aprēķināšanai	61
2.23. att.	Motora jaudas, degvielas patēriņa un griezes momenta aprēķina bloki	61
2.24. att.	Modeļa bloku piemērs jaudas un griezes momenta raksturliķņu konstruēšanai	62
2.25. att.	Modeļa bloku piemērs aprēķinu kontrolei.....	62

2.26. att.	Modeļa mainīgo parametru ievades un simulācijas rezultātu aplūkošanas logs	63
2.27. att.	Modeļa mainīgo parametru ievades un simulācijas rezultātu aplūkošanas loga fragments, modelējot BioDD piejaukumu FDD	63
2.28. att.	Degvielas maisījuma blīvuma un degvielas patēriņa aprēķina bloki	64
2.29. att.	Konkrētas simulācijas jaudas un griezes momenta raksturliķņu un tās veidojošo datu punktu vērtību piemērs	64
3.1. att.	Jaudas un griezes momenta raksturliķņu datu tabulas fragments, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar FDD	66
3.2. att.	Jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu	67
3.3. att.	Degvielas patēriņš dažādos braukšanas režīmos, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD	70
3.4. att.	NO _x satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD	71
3.5. att.	Nesadegušo ogļūdeņražu satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD	71
3.6. att.	SO ₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD	71
3.7. att.	CO ₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD	72
3.8. att.	CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD	72
3.9. att.	Jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	75
3.10. att.	Maksimālās jaudas vērtības un tām atbilstošās kloķvārpstas rotācijas frekvences, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	76
3.11. att.	Maksimālā griezes momenta vērtības un tām atbilstošās kloķvārpstas rotācijas frekvences, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	76
3.12. att.	Degvielas patēriņš dažādos braukšanas režīmos, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	77
3.13. att.	NO _x satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	78
3.14. att.	Nesadegušo ogļūdeņražu satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	79
3.15. att.	SO ₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	79
3.16. att.	CO ₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	79
3.17. att.	CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar trīs dažādām degvielām	80
3.18. att.	Jūgvārpstas jaudas stenda rokas termināļa izdruku piemēri	84
3.19. att.	Motora efektīvās jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot traktoru <i>Class Ares 557ATX</i> ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu	84
3.20. att.	Degvielas patēriņš visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, darbinot traktoru <i>Class Ares 557ATX</i> ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu	85
3.21. att.	NO _x un CO ₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot traktoru <i>Class Ares 557ATX</i> ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu	85

3.22. att.	HC un CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot traktoru <i>Class Ares 557ATX</i> ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu.....	85
3.23. att.	Eksperimentālā motora jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar trīs dažādām degvielām	87
3.24. att.	Degvielas patēriņš visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, darbinot to ar trīs dažādām degvielām	88
3.25. att.	NO _x satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām	89
3.26. att.	Nesadegušo ogļūdeņražu satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām	90
3.27. att.	CO ₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām	90
3.28. att.	CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām	91
3.29. att.	Modeļa mainīgo parametru ievades logs un jaudas un griezes momenta raksturlīknes un tās veidojošo datu punktu vērtības tīras FDD izmantošanas gadījumā	93
4.1. att.	Tiešo siltumnīcefekta gāzu apjoms procentos pasaulē	96
4.2. att.	Siltumnīcefekta gāzu emisijas Latvijā 2021. gadā	97
4.3. att.	Slāpekļa oksīdu emisijas Latvijā 2021. gadā.....	97
4.4. att.	Divu SEG emisiju kalkulatoru viena scenārija modelēšanas rezultāti	99
4.5. att.	N ₂ O un CH ₄ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili <i>Opel Insignia</i> ar HVO un FDD kombinētā cikla IM-240 veikšanas laikā	102

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums.	PP-2 un PP-4 izmantotās <i>NExBTL</i> testēšanas pārskats.....	121
2. pielikums.	PP-2 un PP-4 izmantotās FFD atbilstības apliecinājums.....	123
3. pielikums.	PP-3 izmantotās FDD testēšanas pārskats	125
4. pielikums.	PP-3 izmantotās BioDD7 testēšanas pārskats.....	126
5. pielikums.	PP-3 izmantotās NExBTL7 testēšanas pārskats	127
6. pielikums.	PP-3 izmantoto degvielu siltumspēju testēšanas pārskati.....	128
7. pielikums.	PP-5 izmantotās FDD atbilstības apliecinājums un testēšanas pārskats.....	133
8. pielikums.	PP-5 izmantotās <i>Neste My</i> atbilstības apliecinājums un testēšanas pārskats	135
9. pielikums.	PP-5 izmantotās <i>Pro Diesel</i> atbilstības apliecinājums un testēšanas pārskats	137
10. pielikums.	Neapstrādātas automobiļa <i>Opel Insignia</i> jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot to ar FDD pētījumu programmā PP-2.....	139
11. pielikums.	Neapstrādātas automobiļa <i>Opel Insignia</i> jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot to ar HVO degvielu pētījumu programmā PP-2	140
12. pielikums.	Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar FDD pētījumu programmā PP-2	141
13. pielikums.	Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar HVO degvielu pētījumu programmā PP-2.....	142
14. pielikums.	Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar FDD pētījumu programmā PP-2	143
15. pielikums.	Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar HVO degvielu pētījumu programmā PP-2.....	144
16. pielikums.	Neapstrādātas automobiļa <i>Opel Insignia</i> jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot to ar FDD pētījumu programmā PP-3.....	145
17. pielikums.	Neapstrādātas automobiļa <i>Opel Insignia</i> jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot to ar BioDD7 pētījumu programmā PP-3	146
18. pielikums.	Neapstrādātas automobiļa <i>Opel Insignia</i> jaudas un griezes momenta raksturliķnes, darbinot to ar HVO7 pētījumu programmā PP-3	147
19. pielikums.	Jaudas un griezes momenta raksturliķņu datu tabulu fragmenti pētījumu programmā PP-3	148
20. pielikums.	Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar FDD pētījumu programmā PP-3	149
21. pielikums.	Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar BioDD7 pētījumu programmā PP-3	150
22. pielikums.	Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar HVO7 pētījumu programmā PP-3	151
23. pielikums.	Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar FDD pētījumu programmā PP-3.....	152
24. pielikums.	Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar BioDD7 pētījumu programmā PP-3	153
25. pielikums.	Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar HVO7 pētījumu programmā PP-3	154

DARBĀ LIETOTIE SIMBOLI, SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

AMP	–	augšējais maiņas punkts
AER	–	atjaunojamie enerģijas resursi
ANO	–	Apvienoto Nāciju Organizācija
BioDD	–	biodīzeļdegviela
BTL	–	biosintētiskā (<i>Biomass-to-Liquid</i>) degviela, ko iegūst no salmiem, bioloģiskajiem atkritumiem, koksnes atliekām un enerģētiskajām kultūrām (pilstiebru graudaugiem, ātraudzīgām koku un krūmu sugām u.c.)
CFPP	–	zemākā temperatūra, pie kuras zūd filtra caurlaides spēja (<i>Cold Filter Plugging Point</i>)
CN	–	degvielas cetānskaits (<i>Cetane Number</i>)
DD vai FDD	–	fosilā dīzeļdegviela
DNPE	–	di-n-pentilētrs (<i>di n-pentyl ether</i>)
DPF	–	cieto daļiņu filtrs (<i>diesel particulate filter</i>)
DUS	–	degvielas uzpildes stacija
ECU	–	motora vadības bloks (<i>Engine control unit</i>)
EGR	–	izplūdes gāzu recirkulācijas sistēma (<i>exhaust gas recirculation</i>)
EK	–	Eiropas Komisija
EP	–	Eiropas Parlaments
ES	–	Eiropas Savienība
EVV	–	transportlīdzekļi, kuru emisiju līmenis ir zemāks par pašreizējos normatīvajos aktos noteikto (<i>Enhanced Environmentally-friendly Vehicles</i>)
FAME	–	taukskābju metilesteris, kas iegūts, izmantojot dzīvnieku taukus vai to maisījumus ar augu eļļām (<i>Fatty Acid Methyl Ester</i>)
FTIR	–	Furjē optiskā infrasarkanās gaismas absorbcijas mērīšanas metode (<i>Fourier Transform InfraRed Spectroscopy</i>)
HC	–	ogļūdeņraži (<i>hydrocarbons</i>)
HVO	–	hidrogenēta augu eļļa (<i>Hydro treated vegetable oil</i>)
IM-240	–	240 s braukšanas cikls, kas izstrādāts ASV, lai pārbaudītu vieglo automobiļu motoru emisiju līmeni un degvielas patēriņu
IPCC	–	ANO Klimata pārmaiņu starpvaldību padome (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
LNT	–	katalizatoru sistēma, kas kontrolētu liesās sadegšanas NO _x emisijas no benzīna un dīzeļmotoriem (<i>Lean NO_x Trap</i>)
NEDC	–	Jaunais Eiropas braukšanas cikls, kas izstrādāts, lai novērtētu vieglo automobiļu motoru emisiju līmeni un degvielas patēriņu (<i>The New European Driving Cycle</i>)
NExBTL	–	HVO tirdzniecības nosaukums degvielai, ko ražo firma <i>Neste Oil</i> (akronīms no “next generation bio-to-liquid”)
NO _x	–	kopējie monoslāpekļa oksīdu savienojumi (NO un NO ₂)
PM	–	mehāniskās daļiņas (<i>particles mechanical</i>)
PME	–	palmu eļļas metilesteris (<i>Palm Oil Methyl Ester</i>)
ppm	–	koncentrācijas mērvienība (<i>parts per million</i> – daļu skaits uz miljonu). Norāda, cik daudz gāzes daļu ir katrā miljonā daļu no kopējās gāzes masas
RME	–	rapša eļļas metilesteris (<i>Rapeseed Oil Methyl Ester</i>)
SEG	–	siltumnīcefekta gāzes
SESAM	–	daudzkomponentu izplūdes gāzu mērīšanas sistēma (<i>System for Emission Sampling and Measurement</i>)

SFC	– īpatnējais degvielas patēriņš (<i>specific fuel consumption</i>)
SME	– saulespuķu eļļas metilesteris (<i>Sunflower Oil Methyl Ester</i>)
SRC	– uzlabotā aktīvā emisiju kontroles tehnoloģiju sistēma (<i>Selective Catalytic Reduction</i>)
WLTP	– Vispasaules harmonizētā vieglo transportlīdzekļu pārbaudes procedūra – globāls standarts izmešu un degvielas patēriņa noteikšanai tradicionālajos un hibrīdautomobiļos (<i>Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure</i>)
WOME	– lietotas augu eļļas metilesteris (<i>Waste Oil Methyl Ester</i>)

IEVADS

Viens no galvenajiem 21. gadsimta izaicinājumiem ir tādu tehnoloģiju un enerģijas avotu izstrāde, kas spētu apmierināt pieaugošo energoresursu pieprasījumu. Pašreizējās transporta tehnoloģijas galvenokārt balstās uz fosilajiem enerģijas avotiem, kas ir ne tikai ierobežotā daudzumā un arvien grūtāk iegūstami, bet ir arī vieni no galvenajiem vides piesārņojuma avotiem. Ar fosilajām degvielām darbināmu spēkratu ietekme uz vidi ir kļuvusi par vienu no lielākajām vides un klimata pārmaiņu problēmām mūsu laikmetā.

Pasaules organizācijas un apvienības ir veikušas pasākumus, lai ierobežotu un samazinātu pasaulē un Eiropā radītās kaitīgās emisijas. Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO), Eiropas Savienības (ES) un Latvijas rīcībpolitikas dokumentu un normatīvo aktu galvenais mērķis ir samazināt siltumnīcefekta gāzu (SEG) koncentrāciju atmosfērā līdz līmenim, kas novērstu bīstamu cilvēka darbības iejaukšanos klimata sistēmā.

Tā kā ne ANO Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām, ne tās ietvaros pieņemtais Kioto protokols nespēja nodrošināt izvirzīto mērķi sasniegšanu, 2015. gada 12. decembrī 195 pasaules valstis vienojās par Kioto protokola aizstājēju laika periodam pēc 2020. gada – “Parīzes nolīgumu” (European Parliament, 2016). Viens no nolīguma pamatmērķiem ir uzlabot spēju pielāgoties klimata pārmaiņu nelabvēlīgajai ietekmei un veicināt noturību pret klimatu un zemu siltumnīcefekta gāzu emisiju attīstību tā, lai tas neapdraudētu pārtikas ražošanu.

ES un visas tās dalībvalstis ir parakstījušas un ratificējušas nolīgumu, tādējādi apņemoties to īstenot. Atbilstoši nolīgumam ES līdz 2020. gada beigām iesniedza ilgtermiņa emisiju samazināšanas stratēģiju un atjauninātos klimata plānus, apņemoties līdz 2030. gadam samazināt ES SEG emisijas vismaz par 55% salīdzinājumā ar 1990. gada līmeni (European Parliament, 2022b).

Eiropas Komisijas (EK) 2019. gada iniciatīva “Eiropas Zaļais kurss” (*The European Green Deal*) ir nākamais solis, kas apliecina ES apņēmību risināt klimata pārmaiņas – tajā aprakstīts, kā būtu nepieciešams transformēt ES ekonomiku un sabiedrību, lai 2050. gadā panāktu klimatneitralitāti, vienlaikus cenšoties arī sasniegt nulles piesārņojuma ieceri (European Commission, 2019).

Iepriekšminētos mērķus nostiprināja Eiropas Parlamenta (EP) 2021. gada 30. jūnijā pieņemtais “Eiropas Klimata likums” (European Parliament, 2021). Tajā minēts, ka pēdējos gados sasniegts samērā liels progress, piemēram, laika periodā no 1990. līdz 2019. gadam SEG emisiju apjoms ES samazinājās par 24%, lai gan ekonomikas pieaugums šajā laikā sasniedza 60%. Tas nozīmē, ka pasaules rūpniecības u.c. nozaru centieni inovāciju izmantošanā dod ieguldījumu, tomēr, lai panāktu klimatneitralitāti, būtu vajadzīgs visu nozaru devums. Likumā akcentēts, ka ir būtiski panākt pārkārtošanos uz drošu, ilgtspējīgu, cenas ziņā pieejamu un ar apgādi nodrošinātu energosistēmu, kuras pamatā ir atjaunojamo energoresursu izmantošana, labi funkcionējošs iekšējais enerģijas tirgus un lielāka energoefektivitāte.

Tā kā transports rada ceturtdaļu jeb 25% no ES SEG emisijām, viena no astoņām “Eiropas Zaļā kursa” politikas jomām ir ilgtspējīga un vieda mobilitāte. Tas nozīmē, ka visiem transporta veidiem būs jākļūst ilgtspējīgākiem, tādējādi veicinot SEG emisiju samazināšanu. Tā kā mobilitāte izraisa ne tikai SEG emisijas, bet arī gaisa, trokšņa un ūdens piesārņojumu, transporta nozare ir saistīta arī ar citām zaļā kursa politikas jomām – tīru enerģētiku, piesārņojuma samazināšanu, rīcību klimata jomā, bet attiecībā uz biodegvielām aktuālas ir arī ilgtspējīgas ražošanas, bioloģiskās daudzveidības un ilgtspējīgas pārtikas sistēmas faktori. Zaļais kurss aicina par 90% samazināt transporta radītās SEG emisijas un tādējādi līdz 2050. gadam ES kļūt par klimatneitrālu ekonomiku, vienlaikus cenšoties sasniegt nulles piesārņojuma mērķi (European Commission, 2019).

Papildus tam 2021. gada ilgtspējīgas izaugsmes stratēģijā (European Commission, 2020) teikts, ka līdz 2025. gadam jāuzbūvē viens miljons no trīs miljoniem elektrospekratu uzlādes punktu, kas ir mērķis 2030. gadam, kā arī puse no plānotajām 1000 ūdeņraža uzpildes stacijām.

2022. gada jūnijā EP atbalstīja EK priekšlikumu par nulles emisiju no jauniem automobiļiem un furgoniem līdz 2035. gadam. Starpposma emisiju samazināšanas mērķi 2030. gadam tiks noteikti 55% apmērā automobiļiem un 50% furgoniem (European Parliament, 2022a). Sākot no 2035. gada, visi jaunie automobiļi, kas nonāks tirgū, nevarēs emitēt CO₂. Šie noteikumi neietekmē esošos spēkratus. Tā kā to vidējais kalpošanas laiks ir 15 gadi, līdz aptuveni 2050. gadam ekspluatācijā būs būtisks to spēkratu īpatsvars, kas lietos fosilās degvielas. Tāpēc aptuveni līdz šim laikam būs aktuāla biodegvielu ražošana un pētniecība.

Lai sasniegtu nospraustos mērķrādītājus, EK 2021. gada 14. jūlijā iesniedza EP un Padomei priekšlikumu Regulai par alternatīvo degvielu infrastruktūras ieviešanu (European Commission, 2021). Šī priekšlikuma mērķis ir nodrošināt pietiekamu infrastruktūras tīklu autotransporta līdzekļu uzlādei vai uzpildei ar alternatīvām degvielām un nodrošināt infrastruktūras pilnīgu sadarbību un lietošanas ērtumu ES.

Priekšlikums nosaka paplašināt jaunākās paaudzes biodegvielu un sintētisko degvielu ražošana no dažādām izejvielām, lai aizstātu dīzeļdegvielu, benzīnu un reaktīvo motoru degvielu vai tās piejauktu fosilajām degvielām ļoti augstā piemaisījuma attiecībā.

Tā kā vismazākais atjaunojamās enerģijas īpatsvars 2015. gadā bija transporta sektorā – tikai 6%, līdz 2030. gadam tam dažādos veidos, piemēram, turpinot attīstīt un ieviest elektriskos un ar ūdeņradi darbināmus spēkratus, modernas biodegvielas un citas atjaunojamās un mazoglekļa degvielas, jāpieaug līdz aptuveni 24%.

Latvijai kā ES dalībvalstij ir ne tikai saistoši visi minētie likumi un regulas, bet arī pašai jānodrošina savas valsts dokumentu bāze, kas sekmētu mērķrādītāju sasniegšanu.

Augstākais valsts attīstības plānošanas dokuments ir “Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam” (LR Saeima, 2010), kur izvirzīti valsts ilgtermiņa attīstības mērķi un prioritātes. Transporta jomā šajā dokumentā kā prioritārie noteikti divi virzieni – atjaunojamo enerģijas resursu (AER) izmantošana un inovācijas, energoefektivitāte un videi draudzīga transporta politika.

“Latvijas Nacionālais attīstības plāns 2021. – 2027. gadam” (LR Ministru kabinets, 2020a) ir valsts vidēja termiņa attīstības plānošanas dokuments, kur aplūkojamās tēmas kontekstā veicamie pasākumi iekļauti rīcības virzienos “Daba un vide – “Zaļais kurss”” un “Tehnoloģiskā vide un pakalpojumi”. Pirmajā no tiem noteikts sasniegt augstu transporta sistēmu energoefektivitāti, dekarbonizāciju un slāpekļa oksīdu, amonjaka un cieta daļiņu piesārņojuma samazināšanu. Otrais nosaka, ka 2027. gadā no atjaunojamās enerģijas ražotās enerģijas īpatsvars jāpalielina līdz 5.85%, salīdzinot ar 2.56% 2017. gadā. Turklāt atzīmēts, ka līdz 2026. gadam pakāpeniski tiks izbeigta t.s. pirmās paaudzes biodegvielu ieskaitīšana šajā īpatsvarā.

“Transporta attīstības pamatnostādnes 2021. – 2027. gadam” ir vidēja termiņa politikas plānošanas dokuments transporta nozares attīstībai Latvijā (LR Ministru kabinets, 2021). Tajā norādīts, ka mērķis 2020. gadā sasniegt 10% AER īpatsvaru kopējā enerģijas patēriņā transportā, kas noteikts vairākos iepriekšējos politikas plānošanas dokumentos, nav ticis sasniegts, turklāt galvenokārt līdz šim sasniegto nodrošinājusi biodegvielas obligātā piejaukuma prasība benzīnam un dīzeļdegvielai.

Visbeidzot “Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021. – 2030. gadam” (LR Ministru kabinets, 2020b) ir ilgtermiņa plānošanas dokuments, kas nosaka Latvijas valsts enerģētikas un klimata politikas pamatprincipus, mērķus un rīcības virzienus turpmākajiem desmit gadiem. Kā viena no mūsu valsts problēmām dokumentā minēts vecs autoparks, kurā dominē ar dīzeļdegvielu un benzīnu darbināmi spēkrati. Tā kā EP un Padomes 2018. gada 11. decembra direktīvā 2018/2001 (European Parliament, 2018) noteikts, ka ES savā atjaunojamās enerģijas transportā mērķī neieskaitīs no pārtikas un dzīvnieku barības kultūraugiem iegūtas biodegvielas, tad mūsu valsts enerģētikas un klimata plānā akcentēts, ka jaunākās paaudzes biodegvielu īpatsvars enerģijas bruto galapatēriņā transportā 2030. gadā jāpalielina līdz 3.5%.

Apspriešanas stadijā ir arī vairāki valsts likumprojekti, piemēram, “Klimata likums”, “Transporta enerģijas likumprojekts”, kur kā galvenais mērķis noteikts veicināt cilvēku veselībai un apkārtējai videi drošu transporta enerģijas apriti, atjaunojamās enerģijas izmantošanu transportā un atjaunojamās enerģijas piedāvājumu un pieprasījumu tirgū, lai sekmētu ilgtspējīgu tautsaimniecības attīstību un veicinātu SEG emisiju un gaisa piesārņojošo vielu emisiju samazināšanu (LR Ekonomikas ministrija, 2020). Šajā dokumentā minēts arī termins “modernās biodegvielas” (līdz šim vairāk tika lietots “jaunākās paaudzes” vai “nākamās paaudzes” biodegvielas), kur uzskaitītas šo degvielu ražošanas izejvielas, piemēram, aļģes, sadzīves atkritumu biomasas frakcija, ražošanas atkritumu biomasas frakcija, ko nevar izmantot pārtikas vai barības ķēdē, palmu eļļas ražošanas šķidrās atliekas u.c.

Vairums no šīm degvielām ir izstrādes un izpētes stadijās, tāpēc degvielas uzpildes stacijās tās tīra veidā vai maisījumos ar fosilo degvielu pieejamas ļoti ierobežotā daudzumā ne tikai Latvijā, bet arī ES un pasaulē.

Līdz šim normatīvajos dokumentos noteikto biodegvielu izmantošanas īpatsvaru valstīs, t.sk., Latvija centās sasniegt, izmantojot t.s. pirmās paaudzes biodegvielas, piemēram, augu eļļu, biodīzeļdegvielu, bioetanolu un biogāzi tīrā veidā vai maisījumos ar fosilās izcelsmes degvielām.

Pirmās paaudzes biodegvielu ieguvei kā izejvielas tradicionāli izmantoja graudaugu kultūras, kuru ražošanai nepieciešama lauksaimniecībā izmantojamā zeme. Šajā sakarā pastāv bažas, ka biodegvielu ražošanas dēļ var pietrūkt lauksaimniecības zemes pārtikas vai lopbarības izejvielu ražošanai. Tāpēc aktuāla kļūst jaunāko paaudžu jeb moderno biodegvielu izmantošana (biodegvielu klasifikācijas shēmu skat. 21. lpp.).

Kā rāda pasaulē veiktie pētījumi, tad hidrogenētā augu eļļa (HVO) ir viena no perspektīvākajām modernajām degvielām izmantošanai vairumā ar dīzeļmotoriem darbināmos spēkratos. HVO var ražot no ļoti dažādām izejvielām, piemēram, augu eļļas, dzīvnieku taukiem, atkritumeļļas un aļģēm. Vairāki ražotāji šīm degvielām devuši savus tirdzniecības nosaukumus, piemēram, *NExBTL* (akronīms no “next generation bio-to-liquid”) ir HVO tirdzniecības nosaukums degvielai, ko ražo firma *Neste Oil*. Pirmie nopietnākie šīs degvielas pētījumi tika veikti 2008. gadā, firmai sadarbojoties ar Helsinku tehnoloģiju universitāti (Aatola et al., 2009).

Tā kā SIA *Neste Latvija* ir nozīmīgs Latvijas degvielas tirgus dalībnieks, arī viņiem bija aktuāla Biodegvielu likumā noteiktā norma – nodrošināt, lai biodegviela veidotu ne mazāk kā 5.75% procentus no kopējā tirgotā degvielas daudzuma. Turklāt šī likuma redakcijā (LR Saeima, 2005) definējumi biodegvielai un biodīzeļdegvielai sākotnēji nedeļa iespēju fosilajai dīzeļdegvielai piejaukto HVO daudzumu ieskaitīt kā biodegvielu. Lai šo situāciju risinātu, SIA *Neste Latvija* bija ieinteresēta veikt pētījumus arī Latvijā, pirmos degvielas paraugus atvedot no savas ražotnes Somijā. Tā radās šī promocijas darba tēma, vienlaikus arī divi SIA *Neste Latvija* un LBTU Tehniskās fakultātes pētnieku projekti “Automobiļa ekspluatācijas rādītāju salīdzinājums, to darbinot ar *NExBTL* un standarta dīzeļdegvielu” un “Biodīzeļdegvielas un *NExBTL* degvielas piejaukuma ietekmes pētījumi uz automobiļa ekspluatācijas parametriem”. Pētījumi tika turpināti, izmantojot traktortehniku, kā arī uz motorstenda.

Pašlaik SIA *Neste Latvija* degvielas uzpildes stacijās pieejama degviela *ProDiesel* ar HVO piejaukumu 7% – 15% atkarībā no gada un sezonas, kā arī *Neste MY*, kas ir 100% HVO, t.i., degviela no atjaunojamajiem resursiem. Diemžēl to var iegādāties tikai degvielas uzpildes stacijās (DUS) Rīgā. HVO piejaukumu degvielai *miles PLUS* piedāvā arī SIA *Circle K*. Diemžēl ne visos Vidzemes un Latgales novados ir pieejama degviela ar HVO biokomponenti. Tā kā šo degvielu uzglabāšana un uzpilde tiek realizēta esošajā fosilo degvielu infrastruktūrā, nav nepieciešama to papildus izbūve, un degvielas izplatītāji ir gatavi to piegādāt, ja būs pieprasījums, kuru savukārt var veicināt veiktie pētījumi.

Tāpēc, neskatoties uz to, ka degviela jau ir pieejama patērētājiem, tās izpēte aktualitāti nezaudēs. Kā rāda pētījumu pieredze citās valstīs, tiek strādāts arī pie jaunām izejvielām šo degvielu ražošanai, kā arī HVO izmantošanas maisījumos ar citām degvielām un dažādu tipu motoros.

Pētījumu objekti – dažāda pielietojuma ar dīzeļmotoriem darbināmi spēkrati.

Pētījumu hipotēze – izmantojot hidroģenētu augu eļļu vai tās maisījumus ar fosilo dīzeļdegvielu, iespējams iegūt labākus vai līdzvērtīgus tehniskos, ekonomiskos un ekoloģiskos rādītājus, salīdzinot ar fosilo degvielu vai pirmās paaudzes biodeģvielu.

Pētījumu mērķis – teorētiski un eksperimentāli novērtēt hidroģenētās augu eļļas izmantošanas iespējas dīzeļmotoros, tādējādi radot iespēju veicināt atjaunojamo energoresursu plašāku izmantošanu Latvijā un pasaulē.

Pētījumu uzdevumi:

- izanalizēt līdz šim veiktos pētījumus hidroģenētās augu eļļas ražošanā, izmantošanā un ietekmē uz motoru un spēkratu ekspluatācijas parametriem;
- izstrādāt ar hidroģenētu augu eļļu darbināmu spēkratu izmēģinājumu metodiku;
- eksperimentāli izpētīt un novērtēt hidroģenētās augu eļļas izmantošanas iespējas un motoru ekspluatācijas parametrus dažāda tipa spēkratos;
- veikt matemātisko modelēšanu ar dīzeļmotoriem darbināmu spēkratu ekspluatācijas parametru noteikšanai, izmantojot dažādas degvielas un to maisījumus, kā arī novērtēt modeļa efektivitāti;
- novērtēt hidroģenētās augu eļļas izmantošanas ekonomisko un ekoloģisko lietderīgumu.

Promocijas darbā izmantotas analīzes, sintēzes, modelēšanas, eksperimentēšanas, statistiskās, ekonomiskās un ekoloģiskās novērtēšanas **pētījumu metodes**.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes:

- hidroģenēta augu eļļa ir perspektīva jaunākās paaudzes degviela izmantošanai tīrā veidā vai maisījumos, lai aizstātu fosilo dīzeļdegvielu un tās maisījumus ar pirmās paaudzes biodeģvielu, nodrošinot labākus vai līdzvērtīgus tehniskos rādītājus;
- hidroģenētās augu eļļas plašāks pielietojums dos ieguldījumu SEG emisiju samazināšanā un atjaunojamo resursu izmantošanas mērķrādītāju sasniegšanā;
- matemātiskais modelis ir izmantojams HVO ietekmes noteikšanai uz galvenajiem spēkratu ekspluatācijas parametriem ar precizitāti, kas ļauj pieņemt tehniski un ekonomiski pamatotus lēmumus par degvielas izmantošanu spēkratos.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai veikta savstarpēji saistītu teorētisko un eksperimentālo pētījumu sērija, aptverot plaša pielietojuma spēkratus – vieglo automobili, traktoru un motoru, kas izmantojams bezceļu tehnikā. Šāda kompleksa pētījuma veikšana, kad, ja to ļauj testējamo objektu specifika, izmantotas vienas un tās pašas ierīces, piemēram, degvielas patēriņa un atgāzu mērīšanai, lai pētījumu rezultātus kopumā neiespaidotu dažādu ierīču izmantošana, ir būtiskākā atšķirība no citiem pētījumiem. Arī pētāmā degviela ir inovatīvs produkts, kuras plašākos pētījumos ieinteresēti tās ražotāji, kas nodrošināja eksperimentālos paraugus testēšanai. Ņemot vērā, ka tajā laikā Biodeģvielu likuma definējumi biodeģvielai un biodīzeļdegvielai nedeģa iespēju fosilajai dīzeļdegvielai piejaukto HVO daudzumu ieskaitīt kā biodeģvielu, sadarbības līgumu ietvaros veiktie pētījumi palīdzēja šo problēmu risināt. Tā kā pētītā degviela ietilpst jaunāko paaudžu biodeģvielu grupā, un līdz 2026. gadam pakāpeniski tiks samazināta pirmās paaudzes biodeģvielu ieskaitīšana biodeģvielu īpatsvarā enerģijas bruto galapatēriņā transportā, pētījumi veicinās cilvēku veselībai un apkārtējai videi drošu transporta enerģijas apriti, atjaunojamās enerģijas izmantošanu transportā, sekmējot ilgtspējīgu tautsaimniecības attīstību un SEG emisiju un gaisa piesārņojošo vielu emisiju samazināšanu.

1. HIDROGENĒTĀS AUGU EĻĻAS DEGVIELAS PĒTĪJUMU APSKATS UN ANALĪZE

Kopš pagājušā gadsimta 70. gadu sākuma, kad pirmo reizi tika lietots vārds “biodegviela”, dažādi autori ir definējuši terminu nedaudz atšķirīgi (Alaswad et al., 2015; Awogbemi et al., 2021; Saladini et al., 2016):

- degviela, kas tieši vai netieši ražota no biomasas;
- šķidrā degviela, kas iegūta no biomasas, piemēram, biodīzeļdegviela, kas ražota no taukiem un eļļām, biogāze, kas iegūta no dzīvnieku atkritumiem utt.;
- degviela, kas iegūta no koksnes un šķeldas vai lauksaimniecības atliekām vai ķīmiski pārveidota no biomasas par kokogli, biodīzeļdegvielu, bioetanolu un biometānu.

Saskaņā ar Biodegvielas likumu (LR Saeima, 2005) biodegviela Latvijā tiek definēta kā iekšdedzes motoros izmantojama šķidrā vai gāzveida degviela, ko iegūst no biomasas.

Dažādu valstu pētnieki norāda šādus būtiskākos biodegvielu izmantošanas ieguvumus:

- biodegvielas rada mazāk SEG emisiju, salīdzinot ar fosilo degvielu (Appavu et al., 2021);
- biodegviela ir bioloģiski noārdāma, ilgtspējīga un videi nekaitīga (Pugazhendhi et al., 2020);
- biodegvielu lielā mērā ražo no lokāli pieejamiem resursiem, izmantojot drošas ražošanas metodes (Darby, Callahan, 2020);
- biodegvielu ražošana un izmantošana veicina pašmāju tautsaimniecības attīstību un investīcijas (Alizadeh et al., 2020; Szabó, 2019);
- biodegvielu ražošana rada darba vietas un uzlabo iedzīvotāju ienākumus, kā arī samazina enerģijas importu (Chintala, 2019; Topcu, Tugcu, 2020).

Neraugoties uz šīm priekšrocībām, augstās sākotnējās biodegvielas ražošanas un uzglabāšanas izmaksas var atturēt potenciālos ražotājus un lietotājus. Pastāv pamatotas bažas, ka pieaugošais biodegvielas pieprasījums sadārdzinās lauksaimniecības un koksnes, kā arī citas izejvielas (Ingle et al., 2019). Koksnes pieprasījums var izraisīt strauju mežu izciršanu, bet, lai kultivētu īpašus kokus un citas nepārtikas eļļas biodegvielas ražošanai, ir nepieciešamas lielas zemes platības. Metāns, kas ir galvenā biogāzes sastāvdaļa, ir galvenais globālo klimata pārmaiņu veicinātājs, un nepārtraukta biogāzes izmantošana var veicināt ozona slāņa noārdīšanos (Meyer, Newman, 2020), savukārt biodīzeļdegviela rada augstas kopējo monoslāpekļa oksīdu savienojumu NO_x emisijas un veicina lielāku motora detaļu nodilumu salīdzinājumā ar fosilo degvielu (Kumar Patidar, Raheman, 2020). Neraugoties uz šiem trūkumiem, biodegviela tiek uzskatīta kā tīra, ilgtspējīga un pieejama energoresursu izvēle, kas var aizstāt fosilo degvielu un glābt cilvēci no draudošās vides katastrofas. Biodegvielas kā ilgtspējīgas degvielas pielāgošana dažādās tautsaimniecības nozarēs ir viena no CO₂ un oglekļa emisiju mazināšanas stratēģijām (Mandley et al., 2020).

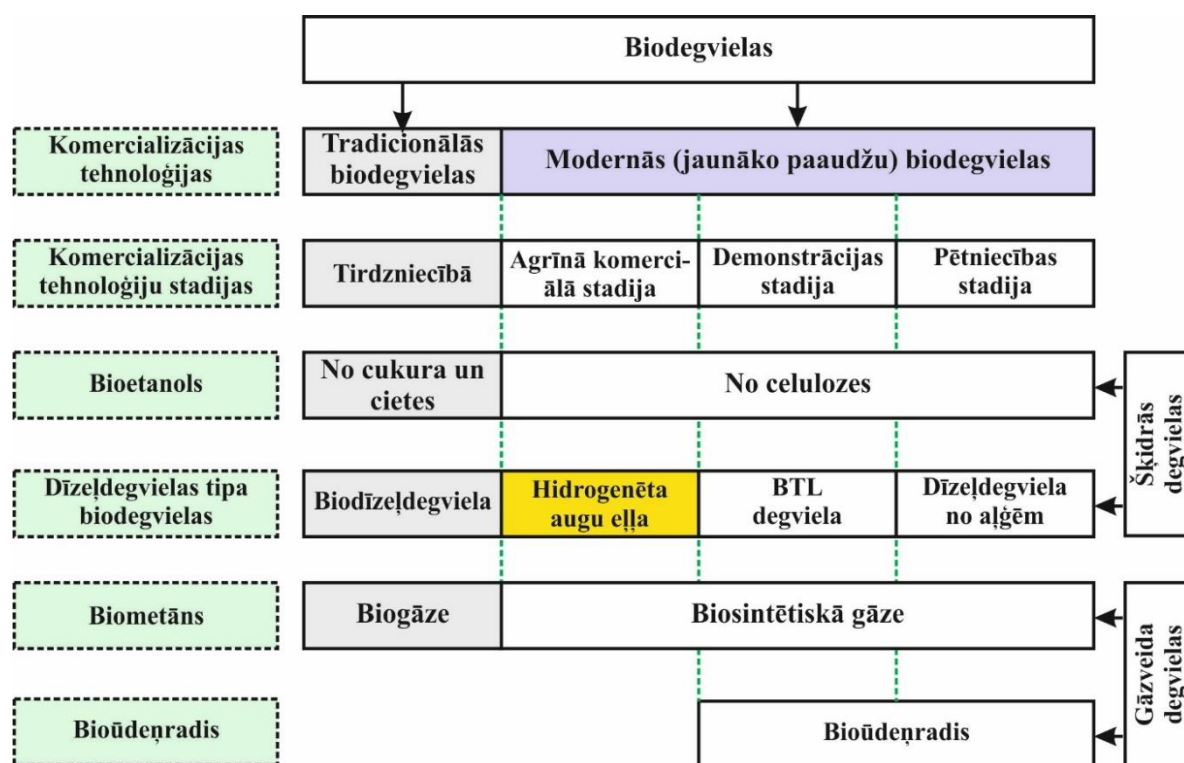
Šajā nodaļā analizēta biodegvielu klasifikācija un HVO vieta šajā topoloģijā, HVO degvielas ražošanā izmantotās tehnoloģijas un izejvielas, tās īpašību salīdzinājums ar citām degvielām, kā arī dažādas pasaules valstīs veiktie pētījumi par HVO izmantošanu dīzeļmotoros un tās ietekmi uz spēkratu ekspluatācijas parametriem.

1.1. Biodegvielu klasifikācija un HVO vieta šajā topoloģijā

Lai gan striktu noteikumu, kas noteiktu biodegvielu paaudžu skaitu vai konkrētā degvielas veida piederību kādai no paaudzēm, pagaidām nav, dažādu autoru darbos dominē klasifikācijas, kas biodegvielas iedala paaudzēs, pamatojoties un to agregātstāvokli, izejvielām, ražošanas veidu un tehnoloģiju gatavību masveida ražošanai. Tāpat jaunākajās publikācijās ir

vienprātība par paaudžu skaitu, t.i., četrām paaudzēm (Awogbemi et al., 2021; Datta et al., 2019; Jeswani et al., 2020; Mat Aron et al., 2020).

Pamatojoties un degvielu agregātvokli, tās iedala cietajās, šķidrās un gāzveida, bet pirmās grupas degvielas iekšdedzes motoros transportā un lauksaimniecībā praktiski neizmanto, tāpēc tās šeit netiek apskatītas. Šķidrās biodegvielas galvenokārt izmanto kā transporta degvielu. Zināmākie šķidro biodegvielu piemēri ir biodīzeļdegviela, biometanols, bioetanols, biobutanols, biopropanols un augu eļļa. Biometāns, bioūdeņradis un biosintētiskā gāze ir izplatītākie gāzveida biodegvielu piemēri. Tās izmanto transportā, kā arī siltuma un elektroenerģijas ražošanai. Vienkāršota biodegvielu klasifikācijas shēma, kas balstīta uz tehnoloģiju attīstību, dota 1.1. attēlā (Awogbemi et al., 2021).



1.1. att. Biodegvielu klasifikācija, pamatojoties uz tehnoloģiju attīstību

Tradicionālās biodegvielas tiek ražotas, izmantojot jau komerciāli pieejamās tehnoloģijas. Tradicionālo biodegvielu piemēri ir bioetanols, biodīzeļdegviela un biogāze, ko iegūst attiecīgi fermentācijas, pāresterifikācijas un anaerobās pārstrādes rezultātā.

Moderno biodegvielu ražošanas tehnoloģijas joprojām atrodas pētniecības un izstrādes, demonstrējumu vai agrīnās tirdzniecības stadijās (Ebadian et al., 2020). Šo degvielu piemēri ir HVO, lignocelulozes bioetanols, biosintētiskā BTL (*Biomass-to-Liquid*) degviela, ko iegūst no salmiem, bioloģiskajiem atkritumiem, koksnes atliekām un enerģētiskajām kultūrām (pilstiebru graudaugiem, ātraudzīgām koku un krūmu sugām u.c.), biodīzeļdegviela no aļģēm un bioūdeņradis.

Katra biodegvielas veida ražošanas tehnoloģiju faktiski nosaka izejvielas, tāpēc šie abi faktori ir noteicošie biodegvielu iedalījumā četrās paaudzēs.

Galvenās izejvielas pirmās paaudzes biodegvielu ražošanai ir ēdamās (pārtikas) kultūras, piemēram, kukurūza, kvieši un citi graudaugi, rapšu sēklas, sojas pupas, palmu eļļa, cukurniedres, cukurbietes u.tml. Lai gan šīs degvielas sniedz būtiskus vides un sociālos ieguvumus, galvenais trūkums ir t.s. pārtikas un degvielas kompromiss (Ajanovic, 2011; Sadeghinezhad et al., 2014; Subramaniam et al., 2020; Thompson, Meyer, 2013). Arī augstās izejvielu izmaksas ir būtiskas, jo aprēķināts, ka tās veido vairāk nekā 70% no ražošanas izmaksām (Callegari et al., 2020).

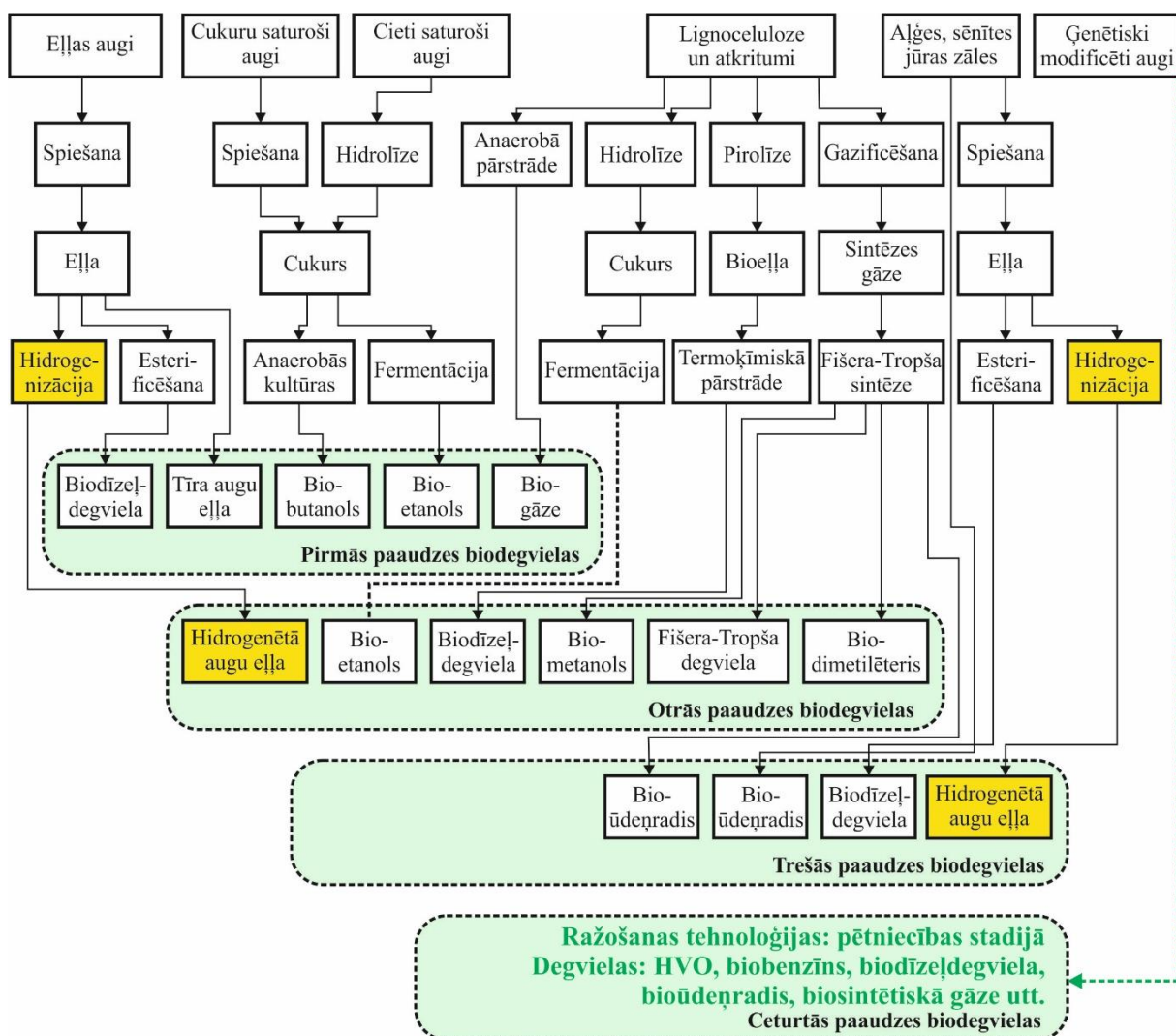
Otrās paaudzes biodegvielas var ražot no neēdamām izejvielām, piemēram, koksnes, salmiem, organiskajiem atkritumiem, pārstrādātām cepamajām eļļām, lauksaimniecības

atliekām, meža atliekām, sadzīves atkritumiem u.tml. (Ndiaye et al., 2020; Nikhom et al., 2020). Šīs paaudzes degvielu ražošana neietekmē pārtikas ķēdi, un izejvielu izmaksas ir salīdzinoši zemas, taču ražošanas tehnoloģijas joprojām ir sarežģītas un vēl nav komercializētas.

Trešās paaudzes biodegvielu galvenā izejviela ir aļģes. Arī šajā gadījumā netiek ietekmēta pārtikas ķēde, un to audzēšanai nav nepieciešama lauksaimnieciski izmantojamā zeme vai saldūdens (Chowdhury, Loganathan, 2019; Nwoba et al., 2020). Citas šīs paaudzes degvielu izejvielas ir raugs, sēnītes, jūras zāles un zilaļģes. Pēdējos gados pasaulē tiek piesaistītas investīcijas, īpaši aļģu audzēšanas un pārveidošanas tehnoloģijās (Ebadian et al., 2020; Liu et al., 2021; Oh et al., 2018; Veeramuthu, Ngamcharussrivichai, 2020).

Ceturtās paaudzes biodegvielas paredzēts ražot no ģenētiski vai metaboliski modificētiem augiem, t.sk. aļģēm (Chew et al., 2019). Ražošanas tehnoloģiju attīstīšana krasi samazinās ražošanas pašizmaksu, padarot degvielas ekonomiski konkurētspējīgas. Kā dažus šīs degvielas piemērus var minēt hydrogenēto atjaunojamo dīzeļdegvielu, biobenzīnu, zaļo aviācijas degvielu, augu eļļu un biodīzeļdegvielu (Awogbemi et al., 2021).

Balstoties uz iepriekš minētajām publikācijām, pilnveidota TF izstrādātajā promocijas darbā (Dukulis, 2013) dotā nozīmīgāko iekšdedzes motoros izmantojamo biodegvielu klasifikācijas un ieguves shēma (sk. 1.2. att.).



1.2. att. Iekšdedzes motoros izmantojamo biodegvielu klasifikācijas un ieguves shēma

Kā redzams shēmā, tad hydrogenētā augu eļļa atkarībā no izmantojamajām izejvielām var būt gan otrās, gan trešās, gan pat ceturtās paaudzes biodegviela.

Dažreiz termina *hydrotreated vegetable oil* vietā pētnieki izmanto arī *hydrogenated vegetable oil* vai *hydroprocessed vegetable oil*. Bez jau pieminētas firmas *Neste Oil* (Somija),

kas ražo degvielu *NExBTL*, arī citu valstu ražotāji, piemēram, *Conocophillips* (ASV un Īrija), *Syntroleum* (ASV), *Universal Oil Products (UOP)-Eni* (Lielbritānija un Itālija), *Nippon Oil* (Japāna) un *SK Energy* (Koreja) ir izstrādājuši HVO ražošanas procesus un testējuši degvielas komerciālos izmēģinājumos. Arī daļa no šīm degvielām ieguvusi savu tirdzniecības nosaukumu, piemēram, *Green Diesel* ražo uzņēmums *UOP-Eni*, bet *HBD* (*hydrogen-treating biodiesel*) – *SK Energy* (No, 2014).

1.2. HVO degvielas īpašību salīdzinājums ar citām dīzeļmotoros izmantojamajām degvielām

No pirmās paaudzes biodegvielām visplašāk dīzeļmotoros izmanto biodīzeļdegvielu, ko iegūst, pāresterificējot augu eļļas ar spirtu (metanolu vai etanolu) katalizatora KOH vai NaOH klātbūtnē. Ja reakcijā ir izmantots metilspirts, iegūtos esterus apzīmē ar ME (metilesteris), ja etilspirts – ar EE (etilesteris). Atkarībā no tā, kāda augu eļļa izmantota, apzīmējumiem pievieno burtu, piemēram, RME (*Rapeseed Oil Methyl Ester*) – rapša eļļas metilesteris, SME (*Sunflower Oil Methyl Ester*) – saulespuķu eļļas metilesteris, WOME (*Waste Oil Methyl Ester*) – lietotas augu eļļas metilesteris, FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) – taukskābju metilesteris, kas iegūts, izmantojot dzīvnieku taukus vai to maisījumus ar augu eļļām. Turpmāk darbā tīra 100% biodīzeļdegviela apzīmēta ar BioDD.

Biodīzeļdegvielu var lietot motoros gan tīrā veidā, gan arī maisījumos ar fosilo dīzeļdegvielu. Vairākās valstīs praktizē piejaukt visam tirgū izlaistajam fosilās dīzeļdegvielas daudzumam līdz 7% biodīzeļdegvielas kā piedevu, kas uzlabo dīzeļdegvielas eļļojošās īpašības. Arī Latvijā MK 2000. gada 26. septembra noteikumi Nr. 332 “Noteikumi par benzīna un dīzeļdegvielas atbilstības novērtēšanu” nosaka, ka dīzeļdegvielu vasaras mēnešos atļauts realizēt tikai tad, ja tai ir pievienota biodegviela ne mazāk kā 6.5% apjomā no kopējā maisījuma tilpuma. Ņemot vērā straujo degvielas cenu kāpumu, MK 2022. gada 14. jūnija sēdē nolēma uz pusotru gadu – no 2022. gada 1. jūlija līdz 2023. gada 31. decembrim – noteikt, ka biodegvielas piejaukums degvielai ir brīvprātīgs, t.i., degvielas tirgotāji paši var izvēlēties piemērot vai nepiemērot biodegvielas piejaukumu (LR Ministru kabinets, 2022). Biodīzeļdegviela ir visplašāk pētītā biodegviela pasaulē, t.sk. arī Eiropā un Latvijā. Pētījumos pierādīts, ka šāda veida degvielai ir savietojamības problēmas ar mūsdienu motoru *Common Rail* degvielas iesmidzināšanas sistēmu. Tāpēc BioDD izmantošana ir ierobežota līdz 7% maisījumos ar citām ogļūdeņražu degvielām, lai izvairītos no pārmērīgas degvielas kvalitātes pasliktināšanās (Douvartzides et al., 2019). Citas nevēlamās BioDD īpašības un to ietekme uz iekšdedzes motoriem apkopotas Szeto W. un Leung D.Y.C. veiktajā pētījumā (Szeto, Leung, 2022):

- augsta viskozitāte un plašs viršanas temperatūru diapazons – grūtības iedarbināt motoru aukstā laikā, slikta sadegšana un priekšlaicīga kartera eļļas atšķaidīšanās;
- augsts aukstā filtra aizsērēšanas punkts CFPP (*Cold Filter Plugging Point*), t.i., zemākā temperatūra, pie kuras zūd filtra caurlaides spēja – problēmas izmantot aukstā laikā;
- satur fosfolipīdus – var aizsprostot filtrus un sprauslas;
- zems enerģijas blīvums – dažiem motoriem var samazināties jauda;
- satur nepiesātinātas vielas – zema stabilitāte pret oksidēšanos uzglabāšanas laikā, var “piededzināt” sprauslas un aizsprostot filtrus;
- augsta difūzija dažos materiālos pēc oksidācijas – plastmasu vai gumiju noārdīšanās;
- augsts higroskopiskums un dēļ tā augsta elektrovadītspēja – iespējama metālu, piemēram, vara, cinka, alvas un svina korozija;
- glicerīna rašanās ražošanas laikā – lieli ieguldījumi tā utilizēšanai.

Tieši tie ir būtiskākie faktori, kas virza pētījumus jaunu biodegvielu veidu izstrādē un novērtēšanā, turklāt šo degvielu īpašībām pēc iespējas jātuvinās fosilajai dīzeļdegvielai, jo tieši tās izmantošanai konstruēti dīzeļmotori efektīvas darbības sasniegšanai.

Fosilās dīzeļdegvielas (FDD), biodīzeļdegvielas (BioDD) un hidrogenētās eļļas (HVO) fizikālo īpašību salīdzinājums dots 1.1. tabulā (Aatola et al., 2009; Arvidsson et al., 2011; Bezergianni, Dimitriadis, 2013; Kim et al., 2014; Lapuerta et al., 2011; No, 2014; Pinto et al., 2013; Šimáček et al., 2009).

1.1. tabula. **FDD, BioDD un HVO fizikālo īpašību salīdzinājums**

Rādītājs	FDD	BioDD	HVO
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	820 ... 850	860 ... 900	775 ... 785
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	2.2 ... 3.5	3.5 ... 5.0	2.5 ... 3.5
Sadūļķošanās temperatūra, °C	-5 ... -30	-5 ... -15	3 ... -30
CFPP temperatūra, °C	līdz -44	līdz -15	līdz -32
Zemākā masas siltumspēja, MJ kg ⁻¹	42.5 ... 43.0	37.5 ... 38.0	43.8 ... 44.0
Zemākā tilpuma siltumspēja, MJ l ⁻¹	34.9 ... 36.6	32.2 ... 34.2	33.9 ... 34.5
Cetānskaitlis	51 ... 60	50 ... 65	80 ... 99
Sēra saturs, mg kg ⁻¹	< 12	< 1	≈ 0
Skābekļa saturs, mg kg ⁻¹	≈ 0	≈ 11	≈ 0

Zemāk dots īss katra tabulā minētā rādītāja skaidrojums (Bezergianni, Dimitriadis, 2013).

Blīvums ir atkarīgs no temperatūras un dīzeļdegvielai parasti tiek noteikts pie 15 °C. Tā kā dīzeļdegviela sastāv no daudzu dažādu ogļūdeņražu savienojumu maisījuma ar dažādu blīvumu un molekulmasu, kopējais blīvums ir atkarīgs no degvielas sastāva. Blīvums ir cieši saistīts ar citiem degvielas parametriem, jo īpaši ar cetānskaitli un viskozitāti. Dīzeļmotoros degvielu iesmidzina tieši sadegšanas kamerā, vairumā gadījumu izmantojot uz tilpumu balstītu mērīšanas sistēmu. Degvielas enerģijas saturs ir aptuveni proporcionāls iesmidzinātās degvielas masai. Tādējādi pastāvīga tilpuma iesmidzināšanas sistēmā degvielas blīvuma izmaiņas var izraisīt iesmidzinātās degvielas enerģijas satura atšķirības. Līdz ar to degvielas blīvums var ietekmēt motora jaudu, emisijas un degvielas patēriņu.

Viskozitāte ir mērs, kas nosaka degvielas pretestību plūsmai. Tas ietekmē dīzeļdegvielas sūkņu un iesmidzināšanas sistēmu darbību. Viskozitāte ir atkarīga no degvielas sastāva un līdz ar to atspoguļojas destilācijas parametros, blīvumā un aukstās plūstamības īpašībās. Pēc aktuālās testa metodes ASTM D445 kinemātisko viskozitāti mēra pie 40 °C. Augsta viskozitāte var izraisīt nepietiekamu degvielas plūsmu, savukārt ļoti augsta viskozitāte var izraisīt degvielas sūkņa darbības traucējumus. Zema viskozitāte var palielināt noplūdes no sūkņēšanas elementiem sūknī, kas var radīt nepietiekamu degvielas padevi un motora iedarbināšanas problēmas.

Sadūļķošanās punkts ir temperatūra, kurā vaska kristāli sāk izgulsnēties un degviela kļūst duļķaina.

Aukstā filtra aizsērēšanas punkts (CFPP) ir zemākā temperatūra, pie kuras degviela var iziet cauri standarta testa filtram. CFPP ir ļoti būtisks rādītājs degvielas izmantošanai valstīs, kur ziemā temperatūra ir negatīva.

Siltumspēja ir siltums, kas izdalās standarta apstākļos, pilnībā sadegot vienam kilogramam vai litram degvielas. Trīs galvenie faktori, kas ietekmē spēkratu degvielas patēriņu, griezes momentu un jaudu, ir motora tips, motora efektivitāte, pārvēršot degvielas enerģiju lietderīgajā darbā, un degvielas tilpuma vienības enerģijas saturs.

Degvielas cetānskaitlis (CN) raksturo tās pašaizdegšanās spēju. Praktiski CN ietekmē laika intervālu starp degvielas iesmidzināšanu un aizdedzināšanu. Jo augstāks CN, jo īsāks ir šis aizdedzes aiztures periods, tāpēc CN ir vēlams augsts. CN ietekmē dīzeļmotora iedarbināšanas vieglumu, sadegšanas radīto troksni un izplūdes emisijas (Šimáček et al., 2010).

Sērs atrodas neapstrādātajās eļļās, un degvielas ražošanas procesā tas ir jāatdala līdz pieņemamam līmenim. Sērs dīzeļdegvielā veicina cieto daļiņu (PM) veidošanos motora izplūdes gāzēs un ietekmē transportlīdzekļa emisiju kontroles iekārtu darbību. Tāpat sēram ir netieša ietekme uz CO, ogļūdeņražu un NO_x emisijām.

Skābekļa satura palielināšana degvielas maisījumā nodrošina ātrāku sadegšanas ātrumu un spēju sadedzināt vairāk degvielas. Tas var palielināt dīzeļmotora efektivitāti un īpatnējo jaudu, bet reizēm negatīvi iespaido atgāzu sastāvu.

No 1.1. tabulas datiem redzams, ka HVO tāpat kā fosilā dīzeļdegviela nav skābekli saturoša degviela, un tās blīvums ir mazāks nekā fosilajai dīzeļdegvielai un biodīzeļdegvielai. HVO ir īpaši zems sēra saturs, augsts cetānskaitlis un dīzeļdegvielai līdzvērtīga siltumspēja, kas dod iespēju prognozēt, ka HVO var pilnvērtīgi aizstāt fosilo dīzeļdegvielu. Lai gan HVO tāpat kā visu citu degvielu īpašības mainās atkarībā gan no izejvielām, gan izgatavošanas procesa, pētījumu analīze liecina, ka lielākā daļa standarta parametru ir līdzīgi vai pat labāki salīdzinājumā ar fosilās dīzeļdegvielas parametriem, bet zemas temperatūras īpašības, kas nosaka motoru darbību ziemās, ir sliktākas (No, 2014; Šimāček et al., 2010).

Pieņemot, ka motoram ir vienāda efektivitāte darbā ar dažādām degvielām, tad degvielas patēriņš ir tieši saistīts ar degvielas siltumspēju. Tas nozīmē, ka degviela ar zemāku siltumspēju tiktu patērēta vairāk, lai iegūtu tādu pašu enerģiju (Sonthalia, Kumar, 2019).

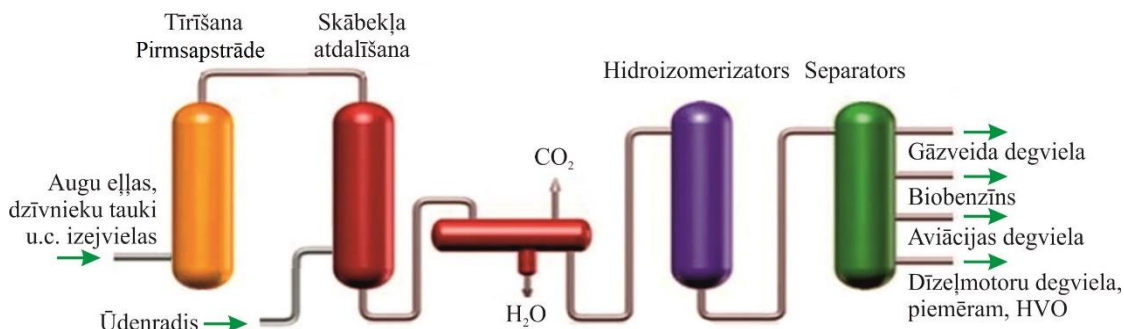
Lai uzlabotu degvielas plūstamību aukstos laika apstākļos, ir nepieciešama vieglāku ogļūdeņražu klātbūtne degvielā. Diemžēl HVO ir grūti uzlabot CFPP ar tradicionālajām aukstā laika piedevām, kas paredzētas fosilajai dīzeļdegvielai. Kā rāda pētījumi, tad HVO izomerizācija var uzlabot aukstās plūstamības īpašības un sasniegt saduļķošanās temperatūru $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ vai pat zemāku (Hartikka et al., 2012).

1.3. HVO ražošanā izmantotās tehnoloģijas un izejvielas

HVO ražo no triglicerīdu bāzes biomasas, piemēram, augu eļļas, dzīvnieku taukiem, atkritumeļļas, alģēm u.c. (No, 2014). Ražošanas pamatā ir katalītiska reakcija, kurā ogļūdeņražus iegūst, no organiskām izejvielām atdalot heteroatomus (parasti O, N un S), izmantojot ūdeņradi kā reducētāju (Szeto, Leung, 2022).

HVO ražošanas laikā notiek trīs reakcijas – dubultsaišu, kas atrodas nesaistītās taukskābju ķēdēs, hidrogenēšana (*hydrogenation*), skābekļa atomu atdalīšana no karboksilgrupas ūdens veidā (*hydrodeoxygenation*) un karboksilgrupas izslēgšana oglekļa dioksīda veidā (*hydrodecarboxylation*) (Šimāček et al., 2010).

Tā kā detalizēta HVO ražošanas procesa izpēte nav šī promocijas darba uzdevums, tad 1.3. attēlā dota tikai vienkāršota shēma (Douvartzides et al., 2019), kurā redzami būtiskākie ražošanas procesa etapi, turklāt līdzīgi procesi izmantojami arī gāzveida degvielas, biobenzīna un aviācijas degvielas ražošanai (Szeto, Leung, 2022).



1.3. att. Vienkāršota HVO ražošanas procesa shēma

Apjomīgu dažādās valstīs veikto pētījumu apkopojumu par dažādu parametru ietekmi uz HVO degvielas ražošanu veikuši Indijas pētnieki (Sonthalia, Kumar, 2019). Būtiskākie parametri šajā procesā ir katalizatora veids (parasti izmanto divu veidu katalizatorus – cēlmetālu katalizatorus, piemēram, palādiju, platīnu, rodiju vai rutēniju, un t.s. pārejas metālus, piemēram, niķeli, molibdēnu, kobaltu, volframu), reakcijas temperatūra (parasti no 300 līdz 400 $^{\circ}\text{C}$), ūdeņraža spiediens (parasti no 6 līdz 20 MPa) (Donnis et al., 2009; Veriansyah et al., 2012), ūdeņraža un eļļas attiecība (no 1:3 līdz 1:30).

Tā kā dažādos pētījumos līdztekus ar minēto parametru maiņu tiek izmantotas arī dažādas izejvielas, piemēram, rapša, saulespuķu, sojas, jatrofas (*jatropha*), karanjas (*karanja*) un cepšanas vai citu procesu atkritumeļļas (Sonthalia, Kumar, 2019), iegūto degvielu fizikālās īpašības 1.1. tabulā dotajās robežās atšķiras. Ņemot vērā, ka dīzeļmotoru attīstītā jauda, degvielas patēriņš un izmešu sastāvs ir jutīgi pat uz vismazākajām degvielu fizikālo un ķīmisko parametru izmaiņām, tas ir izskaidrojams krasi atšķirīgajiem un pat pretrunīgajiem spēkratu ekspluatācijas parametru pētījumu rezultātiem, kas apkopoti 1.4. nodaļā.

1.4. HVO izmantošana dīzeļmotoros un tās ietekme uz spēkratu ekspluatācijas parametriem

Ir praktiski neiespējami veikt kompleksus pētījumus, kas aptvertu visus spēkratu ekspluatācijas parametrus, darbinot tos ar dažādām degvielām, jo šajā gadījumā būtu nepieciešams iesaistīt milzīgus materiālos un cilvēkresursus. Jāņem vērā arī tas, ka atsevišķus faktorus, piemēram, degvielas sadegšanas procesu var pētīt tikai uz motorstendiem, bet ne spēkratiem kopumā. Savukārt izmešu analīze motoru pētījumos un automobiļu vai traktoru pētījumos atšķirsies, jo spēkrati ir aprīkoti ar dažādām atgāzu neitralizācijas sistēmām. Arī jaudas, griezes momenta un degvielas patēriņa mērījumi tiek veikti ar dažādām metodēm, jo spēkratiem bez motora ir arī transmisija, tāpēc lietderīgi izmantotā sadedzinātās degvielas enerģija motoru/spēkratu izmēģinājumos atšķiras. Atšķiras arī laboratorijas un reālos ceļa/lauka izmēģinājumos izmantotās iekārtas, jo, piemēram, degvielas vai atgāzu sastāva noteikšanas iekārtas var būt gan stacionāras, gan mobilas.

Tomēr vairumā gadījumu visi pētījumi fokusējas šādos virzienos:

- degvielas sadegšanas process;
- motoru/spēkratu veiktspēja;
- degvielas patēriņa izmaiņas;
- izmešu sastāvs;
- degvielu ietekme uz barošanas u.c. sistēmu elementiem;
- iespējas izmantot degvielu dažādās apkārtējās vides temperatūrās u.c.

Dažādas degvielas tiek pētītas gan tīrā veidā, gan maisījumos, bet šo maisījumu proporcijas ir atšķirīgas, turklāt pēdējos gados dažādu degvielu īpašību un ekspluatācijas parametru uzlabošanai tiek pētīti ne tikai dīzeļmotoru degvielu maisījumi, bet kā piedevas tiek izmantotas pat benzīnmotoros izmantojamas degvielas vai vielas.

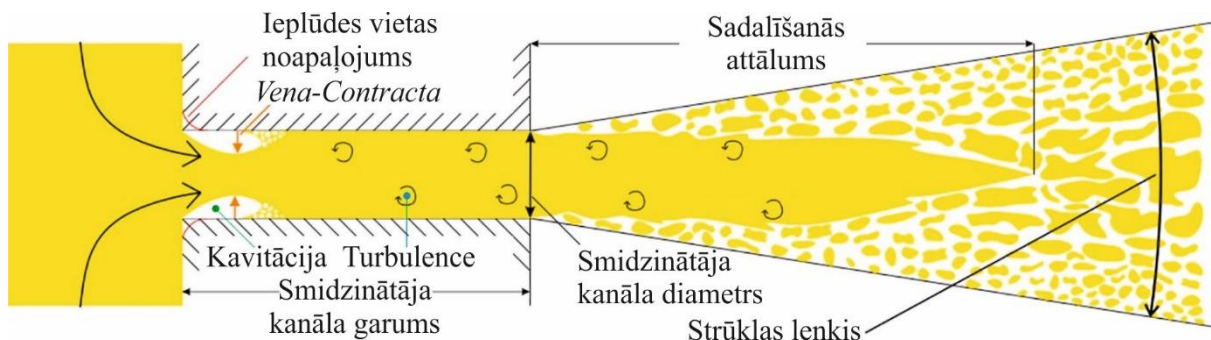
Ņemot vērā visu iepriekšminēto, ir grūti atdalīt dažādās valstīs veikto pētījumu rezultātus strikti pa pētāmo parametru grupām. Tāpēc turpmākajā aprakstā konkrētie pētījumi tiek pieminēti pie tās grupas, kur pētāmo parametru ir visvairāk. Ja līdztekus ar galveno pētāmo parametru, piemēram, degvielas sadegšanas procesu tiek noteikts arī kāds cits, piemēram, izmešu sastāvs, tad arī tas šeit pieminēts, bet apkopojums dots 1.5. nodaļā.

1.4.1. Degvielas sadegšanas process

Dīzeļmotoros degvielu iesmidzina cilindrā caur sprauslām kompresijas takts laikā, kad virzulis tuvojas augšējam maiņas punktam (AMP). Lai nodrošinātu labu degvielas strūkļas sadalīšanu pilienos, iesmidzināšanas spiediens ir augsts (20 līdz 250 MPa). Sprauslā notiek intensīva turbulence un kavitācija (Cheng et al., 2019; Dimitriadis et al., 2020; Emami, Jafarmadar, 2013). Izejot no sprauslas, degviela tiek izsmidzināta, kā parādīts 1.4. attēlā (Szeto, Leung, 2022; Y. Wang et al., 2014).

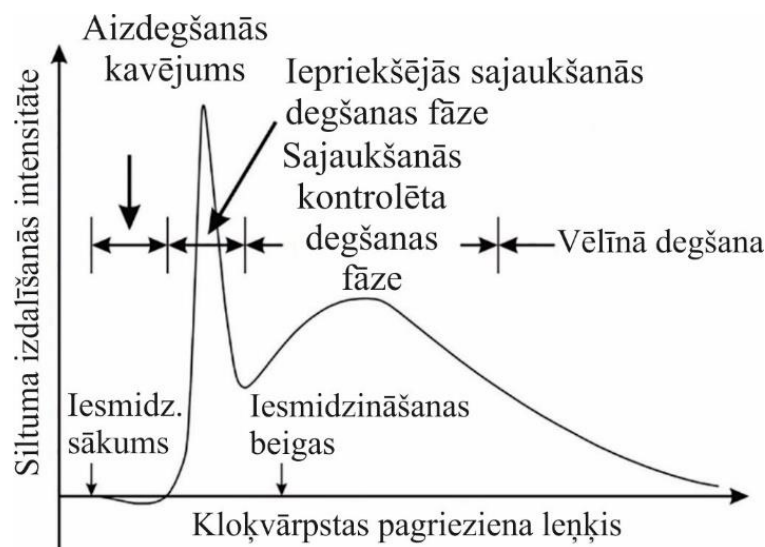
Šķidrā degviela vispirms pārvietojas nepārtrauktas plūsmas veidā nelielā attālumā, tad sadalās primārajos pilienos, bet pēc tam smalkākos pilienos (Cheng et al., 2019; Y. Wang et al., 2014). Paaugstinātā temperatūrā, kas rodas kompresijas rezultātā, degvielas pilieni iztvaiko, veido degošu maisījumu un sāk reaģēt ar skābekli. Šo reakciju sauc arī par pašaiždegšanos.

Pašaiždegšanās procesam seko straujš spiediena pieaugums cilindrā un liesmas temperatūras paaugstināšanās (Alkhayat et al., 2021).



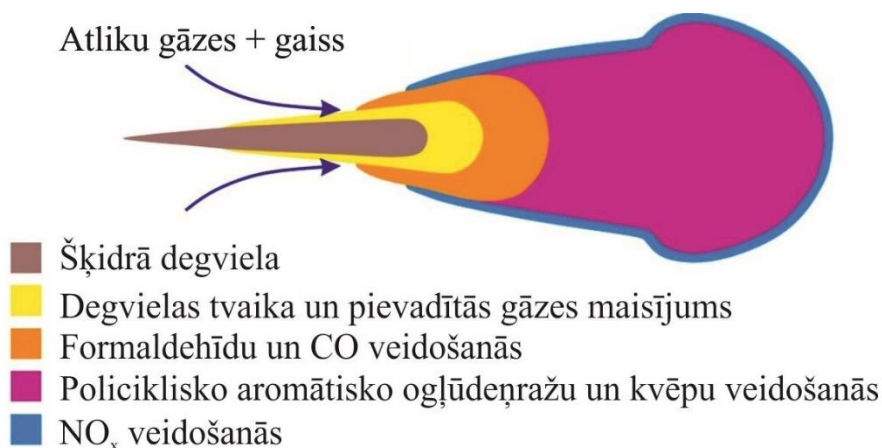
1.4. att. Degvielas izsmidzināšanas process

Procesus, kas notiek pēc iesmidzināšanas sākuma, var iedalīt četrās fāzēs (skat. 1.5. att.): aizdegšanās kavējums (*ignition delay*), iepriekšējās sajaukšanās degšanas fāze (*premixed combustion*), sajaukšanās kontrolēta degšanas fāze (*mixing controlled combustion*) un vēlīnā sadegšana (*late burning*) (Li et al., 2019; X. Liang et al., 2019).



1.5. att. Dažādas siltuma izdalīšanās fāzes tipiskā dīzeļdegvielas sadegšanas gadījumā

Nemot vērā to, ka sadegšanas procesa laikā cilindra atsevišķās zonās spiediens, temperatūra un degvielas pilienu izmēri atšķiras, tad dīzeļmotora raksturīga pazīme neatkarīgi no izmantotās degvielas veida ir neviendabīga maisījuma sadegšana (skat. 1.6. att.) (X. Liang et al., 2019; Musculus et al., 2013).



1.6. att. Vienkāršots dīzeļdegvielas sadegšanas zonu modelis

Parasti iekšdedzes motoru radītos piesārņotājus klasificē četrās lielās grupās: kvēpi, slāpekļa oksīdi (NO_x), oglekļa monoksīds (CO) un nesadegušie ogļūdeņraži (HC). Kvēpu daļiņas rodas, sadedzinot degvielu zonās, kur skābekļa daudzums nav pietiekams pilnīgai sadegšanai. Šīs kvēpu daļiņas var oksidēties vēlāk cikla laikā, kad tās tiek pakļautas skābekļa iedarbībai un ja temperatūra joprojām ir augsta.

Vjetnamas, Japānas un Taizemes pētnieku grupa veica pētījumus, lai noskaidrotu, kā sadegšanas procesu un tā laikā veidojošos kvēpus un NO_x ietekmē 20, 50 un 80% HVO maisījumi ar komerciāli pieejamo dīzeļdegvielu (tajā bija piejaukti arī 7% BioDD). Iegūtie rezultāti liecināja par aizdegšanās kavējuma, liesmas temperatūras, NO_x un kvēpu koncentrācijas samazinājumu, pieaugot HVO koncentrācijai. NO_x un kvēpu koncentrācijas samazinājums sasniedza attiecīgi 33% un 15.9%, salīdzinot ar dīzeļdegvielu (Chau et al., 2017).

Toyota Motor Corporation sadarbībā ar Neste Oil pētīja HVO ietekmi uz izsmidzināšanas īpašībām CRDi (*common rail* tiešās iesmidzināšanas) motorā. Autori atklāja, ka izsmidzināšanas ātrums, leņķis un degvielas daļiņu vidējais diametrs HVO un fosilajai dīzeļdegvielai ir vienādi. Tika konstatēts, ka HVO tiek iesmidzināta par 3 līdz 5% vairāk nekā FDD, ja iesmidzināšanas spiediens ir robežās no 40 līdz 200 MPa. Tādējādi ar *Common Rail* aprīkotiem motoriem HVO izmantošana nerada jaudas zaudējumus, lai gan tilpuma vienības enerģijas saturs ir aptuveni par 5% mazāks (Sugiyama et al., 2012). Šie rezultāti sakrīt ar Aalto Universitātē veiktajiem pētījumiem, kur testēja divus smidzinātāju diametrus 0.08 un 0.12 mm un iesmidzināšanas spiedienus 45, 100 un 198 MPa (Hulkkonen et al., 2011). Šādus rezultātus pētnieki skaidroja ar Bernulli vienādojumu, kas nosaka, ka tilpuma plūsmas ātrums ir apgriezti proporcionāls šķidruma blīvuma kvadrātsaknei. Tā kā HVO blīvums ir mazāks nekā FDD, plūsmas ātrums ir aptuveni par 4% lielāks (Crepeau et al., 2009).

Daudzas pētnieku grupas (Björger et al., 2020; Bohl et al., 2017; Cadrazco et al., 2020; Chau et al., 2017; Cheng et al., 2019; Li et al., 2019; Pastor et al., 2020) ir izmantojušas mūsdienīgas ātrdarbīgas fotografēšanas metodes HVO un fosilās dīzeļdegvielas izsmidzināšanas un sadegšanas raksturlielumu pētīšanai dažāda veida sadegšanas kamerās. Vairumā šo publikāciju HVO tiek novērtēta kā labāks vai līdzvērtīgs degvielas veids salīdzinājumā ar fosilo dīzeļdegvielu, un ka šīs labās īpašības, t.sk. zemāks kvēpu, NO_x , CO, HC un trokšņa līmenis, kā arī augstāka efektivitāte izriet no degvielu ķīmiskā sastāva atšķirībām (Hernández et al., 2020).

Indijā pētīta HVO degviela, kas ražota no cepšanas atkritumēļļas. Maisījumus sagatavoja, dīzeļdegvielai piejaucot 10, 20, 30, 40 un 50% HVO pēc tilpuma. Tika mērīta degvielas paraugu aizdegšanās spēja un iztvaikošanas ātrums. Palielinoties HVO procentuālajai daļai paraugos, aizdegšanās spēja palielinājās. Pētījumā tika secināts, ka HVO maisījumus līdz 30% ir iespējams izmantot lietošanai dīzeļmotoros bez modificēšanas, jo viskozitāte ($2.54, 2.59$ un $2.62 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$) un siltumspēja ($42.41, 42.29, 42.08 \text{ MJ kg}^{-1}$) šiem trim maisījumiem (10, 20 un 30%) ir līdzvērtīgi dīzeļdegvielai ($2.51 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ un 42.58 MJ kg^{-1}), bet augstā cetānskaitļa dēļ esošajos motoros nevar izmantot tīru HVO vai maisījumus ar augstāku HVO saturu ($> 30\%$), jo var tikt ietekmēta motora jauda (Sonthalia, Kumar, 2021).

Citā pētījumā konstatēts, ka vieglāka pašaizdegšanās ir visnozīmīgākā HVO īpašība salīdzinājumā ar citām degvielām, kā rezultātā var tikt uzlabota motora veiktspēja un samazinātas emisijas (Yehia et al., 2019).

Pašaizdegšanās nozīme akcentēta arī pētījumā, kur testēta HVO un dīzeļdegvielas maisījumu ietekme uz sadegšanas īpašībām dažādās skābekļa koncentrācijās (21, 15 un 10%) un ieplūstošās gāzes temperatūrās (1100, 900 un 700 K) nemainīga tilpuma sadegšanas kamerā. Tika noteikts siltuma izdalīšanās ātrums, aizdegšanās kavējums un kopējais izdalītais siltums. Tika testētas dažādas degvielas: komerciāli pieejamā dīzeļdegviela, dīzeļdegvielas un HVO maisījumi un tīra HVO. Rezultāti parādīja, ka, samazinot skābekļa koncentrāciju ieplūstošajā gāzē līdz 10%, siltuma izdalīšanās ātrums ir par 13.42% mazāks un kopējais izdalītais siltums ir par 13.89% mazāks. Tas palielināja aizdegšanās kavējumu. Arī ieplūstošās gāzes temperatūras pazemināšanās izraisīja ilgāku aizdegšanās kavējumu un lielāku maksimālo

siltuma izdalīšanās ātrumu. Palielinoties HVO saturam, par 6.43% samazinājās aizdegšanās kavējuma laiks, salīdzinot ar dīzeļdegvielu, jo HVO ir augstāks cetānskaitlis. Tika pierādīts, ka HVO ir labāka iztvaikošana 0.7 līdz 0.9 ms pēc iesmidzināšanas, jo tās blīvums, viskozitāte un destilācijas temperatūra ir zemāka. Izmantojot HVO kā degvielu dīzeļmotorā, var samazināt nepilnīgas sadegšanas izmešus, piemēram, HC un CO (Marasri et al., 2019).

Pētījumos tiek akcentēts HVO šaurāks viršanas temperatūru diapazons (Sugiyama et al., 2012) un zemāki galīgie viršanas punkti. Tā ir arī HVO priekšrocība, jo degviela pēc iesmidzināšanas cilindrā iztvaiko ātrāk nekā fosilā dīzeļdegviela. Tādējādi degmaisījums var veidoties agrāk un aizdegšanās kavējums samazinās (Alkhayat et al., 2021; Chau et al., 2017).

Pētot HVO ietekmi uz degšanas un emisijas īpašībām, tika izmantots izsmidzināšanas analizators, motora un spēkratu testi (Sugiyama et al., 2012). Izsmidzināšanas analīze parādīja, ka HVO un dīzeļdegvielas izsmidzināšanas īpašības bija praktiski vienādas. No motora dinamometra un spēkratu testu rezultātiem tika konstatēts, ka HVO augstais cetānskaitlis var samazināt HC un mehānisko daļiņu PM (*particles mechanical*) emisijas salīdzinājumā ar FDD. Turklāt, optimizējot motoru, HVO spēj uzlabot degvielas patēriņa un pilnas slodzes griezes momenta rādītājus.

Daži pētnieki norādīja, ka HVO degvielas izmantošana pagarina kopējo sadegšanas ilgumu, jo aizdegšanās notiek agrāk nekā fosilajai dīzeļdegvielai (Hernández et al., 2020; Hunicz et al., 2020). Tādējādi kvēpu, HC un CO emisijas var samazināt, jo ilgāks sadegšanas laiks nozīmē lielākas to oksidēšanās iespējas (Sugiyama et al., 2012).

Agrāka un vieglāka HVO aizdegšanās nozīmē arī to, ka tiek samazināta siltuma izdalīšanās pēc tam, kad virzulis ir sasniedzis AMP, kā arī vielu daudzums, kas rodas vēlīnās sadegšanas fāzē. Jāņem vērā arī tas, ka novēlota sadedzināšana nav īpaši efektīva, lai pārvērstu siltumu mehāniskajā darbā, jo atlikušais tilpuma palielinājums, kas pieejams gāzu darbībai, ir mazs, un izplešanās dzesēšanas efekts var dzēst degšanu (Hunicz et al., 2020; Y. C. Liang et al., 2006).

Tā kā HVO degvielas izmantošana var samazināt kvēpu, HC un CO emisijas, tas nozīmē, ka tiek patērēts mazāk ķīmiskās enerģijas. Turklāt, tā kā mazāks siltuma daudzums tiek atbrīvots pēc tam, kad virzulis ir sasniedzis AMP, un mazāk degošās vielas tiek iesaistīts vēlīnās sadegšanas fāzē, tas nozīmē, ka tiek patērēts arī mazāk siltumenerģijas. Tāpēc pētījumos bieži konstatēts, ka HVO kā degvielas izmantošana var nedaudz palielināt motoru maksimālo jaudu un efektivitāti (Bortel et al., 2019; Hernández et al., 2020; Hunicz et al., 2020).

Tā kā HVO degviela nesatur aromātiskus ogļūdeņražus, bez vieglākas aizdegšanās vēl viena bieži akcentēta HVO īpašība ir tās mazāks masas blīvums salīdzinājumā ar fosilo dīzeļdegvielu (Alkhayat et al., 2021; Cheng et al., 2019; Marasri et al., 2019). Tas nodrošina HVO degvielai labākas izsmidzināšanas īpašības, kā rezultātā varētu arī uzlaboties motora veiktspēja un samazinātas emisijas. Izmantojot izsmidzināšanas un sadegšanas kameras, kā arī ātrdarbīgas fotografēšanas metodes, pētnieki ir atklājuši, ka HVO izsmidzināšanas laiks, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, ir par 4 – 7% īsāks. Līdz ar to degvielas iztvaicēšana tiek pabeigta, pirms degviela sasniedz sadegšanas zonu, tādējādi nodrošinot labāku gaisa un degvielas sajaukšanos (Bohl et al., 2017, 2018; Cheng et al., 2019; Pastor et al., 2020).

Turklāt HVO īpašības, piemēram, īsāks aizdegšanās kavējums, vieglāka aizdegšanās un ātrāka iztvaikošana, var samazināt parādību, ko sauc par pārmērīgu sajaukšanos, kas sekmē īpaši liesu reģionu izveidošanos un nesadegušo HC, kvēpu un CO veidošanos (Dimitriadis et al., 2018).

Mazāks HVO blīvums izraisa arī plašāku izsmidzināto pilienu izplatību. Dažos pētījumos tiek norādīts lielāks izsmidzināšanas strūkļas leņķis (Bohl et al., 2018; Cheng et al., 2019) un lielāks izsmidzināšanas laukums (Bohl et al., 2017), salīdzinot ar FDD. Tas nozīmē, ka iesmidzinātā degviela ir labāk sadalīta un tiek uzlabota degvielas un gaisa sajaukšana. Tādējādi ir lielāka iespēja, ka nepilnīgi sadegušie produkti tiks oksidēti, jo ir lielāka skābekļa pieejamība.

Tomēr vairākos pētījumos norādīts, ka noteiktos apstākļos HVO izmantošana var izraisīt vairāk izmešu (Bortel et al., 2019; Dimitriadis et al., 2018; Gren et al., 2021; Suarez-Bertoa et

al., 2019). Turklāt reizēm pētījumus ir grūti salīdzināt, jo pētāmās degvielas ir ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām. Piemēram, vairāku pētnieku grupu veiktajos izmēģinājumos HVO paraugu viskozitāte ir zemāka (Bohl et al., 2018; Cadrazco et al., 2020; Cheng et al., 2019; Li et al., 2019; Marasri et al., 2019; Pastor et al., 2020; Rimkus et al., 2019) nekā fosilās dīzeļdegvielas paraugiem, bet citos tā ir augstāka (Alkhayat et al., 2021; Bohl et al., 2017; Kumar et al., 2021; Sonthalia, Kumar, 2021; Sugiyama et al., 2012).

1.4.2. Motoru/spēkratu veikspēja un degvielas patēriņš

Motora veikspējas pētījums, salīdzinot HVO un BioDD un vienlaikus nosakot arī degvielas patēriņa un izplūdes gāzu satura izmaiņas, tika veikts Korejā (Kim et al., 2014). Tika testēti degvielu paraugi ar 2, 10, 20, 30 un 50% BioDD un HVO piejaukumu fosilajai dīzeļdegvielai. Nelielais 2% piejaukums tika testēts, jo šādā apjomā biopiejaucums tiek noteikts komerciāli tirgotajai dīzeļdegvielai šajā valstī. Testi tika veikti uz motorstenda un uz šasijas dinamometra. Gan motorstends, gan vieglais automobilis bija aprīkoti ar 1.5 l dīzeļmotoru. HVO bija ražota no palmu eļļas, bet BioDD sastāvēja no 80% PME (palmu eļļas metilēstera) un 20% FAME (izlietotās cepamās eļļas).

Izmēģinājumu rezultāti liecināja par jaudas samazināšanos, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu – jo vairāk BioDD vai HVO tika piejaukts, jo vairāk samazinājās jauda, piemēram, fosilajai dīzeļdegvielai piejaucot 2% biodīzeļdegvielas, jaudas zudumi bija aptuveni 1.4%, piejaucot 20% – aptuveni 2.5%, bet, piejaucot 50% – vairāk nekā 5%. Sajaucot tādu pašu daudzumu HVO ar fosilo dīzeļdegvielu, jaudas zudumi bija attiecīgi 0.7, 1.2 un 1.8%. BioDD maisījuma ar dīzeļdegvielu degvielas patēriņš palielinājās, palielinoties BioDD saturam (no aptuveni 0.5 līdz 2%), bet HVO maisījumi uzrādīja nelielu degvielas patēriņa pieaugumu (no aptuveni 0.1 līdz 0.3%). 10% BioDD piejaukšana fosilajai dīzeļdegvielai samazināja nesadegušo oglekļa dioksīdu (HC) saturu salīdzinājumā ar fosilo dīzeļdegvielu, bet CO, NO_x un CO₂ saturs palika nemainīgs. 10% HVO maisījums samazināja CO, HC un CO₂ izmešus, salīdzinot gan ar tīru fosilo dīzeļdegvielu, gan ar BioDD/FDD maisījumu (Kim et al., 2014).

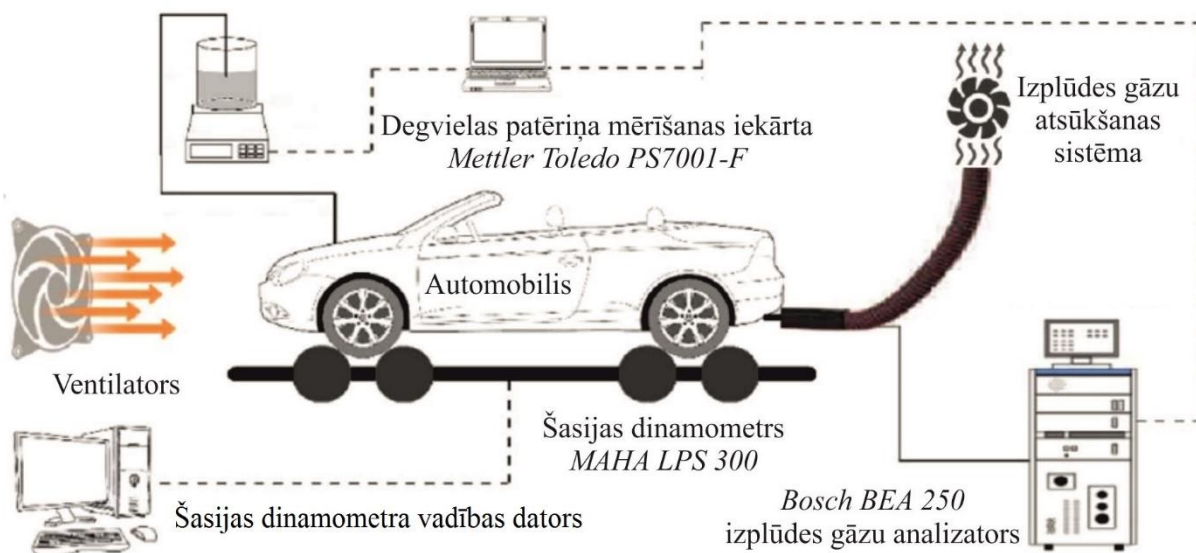
Somijā tika veikta 11 autobusu testēšana, sākot no vecākiem spēkratiem, kas atbilst *Euro II* izmešu normām, līdz pat *EVV* (*Enhanced Environmentally-friendly Vehicles*), t.i., transportlīdzekļiem, kuru emisiju līmenis ir zemāks par pašreizējos normatīvajos aktos noteikto. Salīdzinot ar vasaras un ziemas klases dīzeļdegvielu, 100% HVO samazināja enerģijas patēriņu par aptuveni 0.5%, bet degvielas tilpuma patēriņa pieaugums bija attiecīgi 5.2 un 3.5%.

Autobusu paātrinājums un vilces jauda tika noteikta uz šasijas dinamometra. Autobusiem, kas aprīkoti ar nedalīto degvielas padeves sistēmu jeb t.s. “sūknis – sprausla” sistēmu, lai sasniegtu ātrumu 50 km h⁻¹, bija nepieciešamas 17 s ar vasaras klases dīzeļdegvielu un 18 s ar 100% HVO. Vilces jauda pie 50 km h⁻¹, darbinot ar FDD bija 115 kW, bet, darbinot ar 100% HVO – 108 kW. Arī autobusi ar *Common Rail* iesmidzināšanas sistēmu šo rādītāju atšķirības tendences bija līdzīgas, t.i., aptuveni 6%. Tātad veikspējas zaudējumi bija aptuveni proporcionāli tilpuma siltumspējas atšķirībai starp degvielām (Makinen et al., 2011).

Portugālē tika testēts automobilis ar 103 kW motoru (motora darba tilpums 1986 m³, kompresijas pakāpe 16.5) un *Common Rail* iesmidzināšanas sistēmu (skat. 1.7. att.) (Serrano et al., 2021).

Tika testētas šādas degvielas: FDD, Bio7 (7% of biodīzeļdegvielas piejaukums FDD), Bio15, Bio100 (tīra biodīzeļdegviela) un HVO15 (15% HVO piejaukums FDD). Testu laikā tika veikti divi dažādi braukšanas cikli – NEDC (*The New European Driving Cycle*) un WLTP (*Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure*). Pirmais no tiem ir 11.03 km garš, ilgst 1180 s, vidējais braukšanas ātrums 33.6 km h⁻¹, maksimālais braukšanas ātrums 120 km h⁻¹. Otrajam šie parametri ir attiecīgi 23.27 km, 1800 s, 46.5 km h⁻¹ un 131.3 km h⁻¹.

Pieņemot par atskaites punktu dīzeļdegvielas patēriņu, NEDC cikla laikā Bio7 patēriņš samazinājās par 1.74%, bet Bio15, Bio100 un HVO15 palielinājās attiecīgi par 1.48, 15.19 un 0.58%. WLTP cikla laikā šīs izmaiņas bija attiecīgi – -0.69, 1.89, 14.71 un 0.05%.



1.7. att. Portugālē veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma

CO emisiju izmaiņu tendences nebija tik vienojošas. NEDC cikla laikā, izmantojot Bio7 degvielu, tās palielinājās par 3.7%, bet Bio15, Bio100 un HVO15 samazinājās par 72.7, 74.0 un 40.7%. Savukārt WLTP ciklā samazinājums par 14.7% bija vērojams tikai Bio100 degvielai. Bio7, Bio15 un HVO15 CO emisijas palielinājās par attiecīgi 81.8, 10.6 un 72.1%.

HC emisiju izmaiņas NEDC cikla laikā 44.8, -34.9, -78.8 un 6.3%, bet WLTP ciklā – 123.6, 94.5, -21.3 un 57.2%. NO_x emisiju izmaiņas NEDC cikla laikā 2.7, -7.8, 66.6 un -3.1%, bet WLTP ciklā – 4.3, -2.7, 47.9 un 14.1%. CO₂ emisiju izmaiņas NEDC cikla laikā -1.31, 0.69, 0.31 un 0.08%, bet WLTP ciklā – -1.19, 0.00, -0.91 un 0.55%. Tātad arī šeit kādas likumsakarības ir grūti atrast.

Veicot jaudas un griezes momenta mērījumus, tika konstatēts, ka Bio100 izmantošana rada maksimālo jaudas samazinājumu par 12.1% un griezes momenta samazinājumu par 12% pie maziem motora apgriezieniem, turklāt ar šo degvielu nevienā režīmā nebija veikspējas pieaugums. Bio7 izmantošana nodrošināja maksimālo jaudas pieaugumu par 2% un griezes momenta – 2.1% pie maziem apgriezieniem, bet lielā ātrumā jau radās neliels motora veikspējas deficīts (aptuveni -0.6% gan jaudai, gan griezes momentam). HVO15 degvielai bija līdzīga ietekme uz motora veikspēju kā Bio7 degvielai.

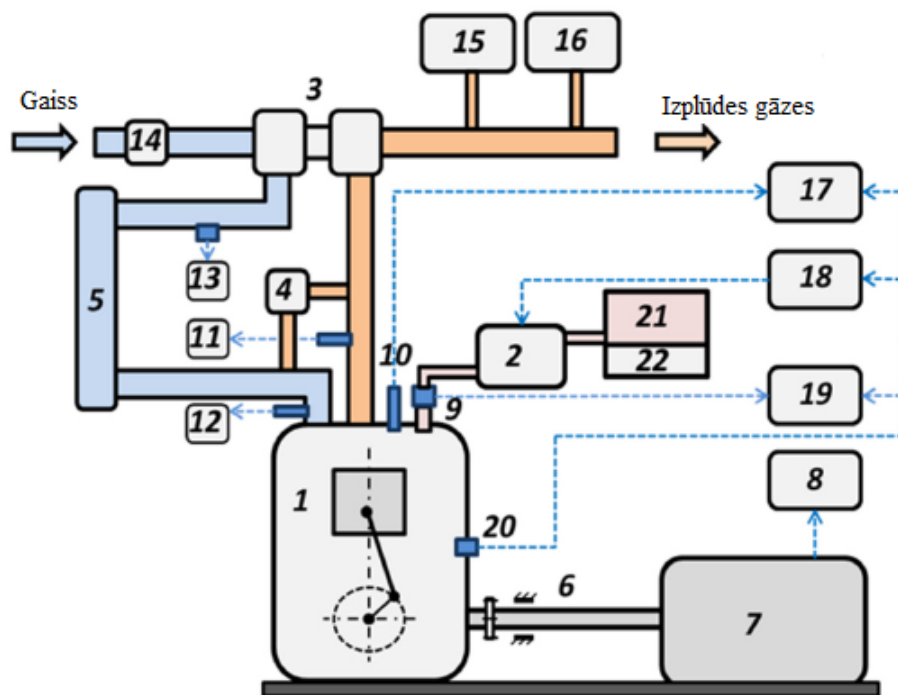
Kopumā pētnieki secināja, ka pilnīga fosilās degvielas aizstāšana ar biodegvielu nav visrentablākā pieeja (Serrano et al., 2021).

Audi 1.9 TDI (Turbocharged Direct Injection) motora (darba tilpums 1896 cm³, jauda 66 kW, kompresijas pakāpe 19.5) testi veikti Lietuvā (skat. 1.8. att.) (Rimkus et al., 2019).

Eksperimenti tika veikti, izmantojot tīru dīzeļdegvielu, tīru HVO, šajā gadījumā *Neste Oil* ražoto *NExBTL* un dažāda satura maisījumus. *NExBTL* saturs maisījumos bija robežās no 10% līdz 85% pēc tilpuma (*NExBTL10*, *NExBTL20*, *NExBTL30*, ..., *NExBTL85*).

Eksperimenti tika veikti pie diviem konstantiem motora apgriezieniem: $n = 2000$ un $n = 2500 \text{ min}^{-1}$. Bremzēšanas momenta slodze bija 30, 60, 90 un 120 N m. Šīs vērtības veido 16.6, 33.3, 50.0 un 66.6% no motora maksimālā griezes momenta.

Degšanas ātruma analīze būtiskas izmaiņas neuzrādīja. Novērtējot degvielas masas patēriņu, 10 – 30% *NExBTL* piejaukums samazināja degvielas patēriņu par 2 – 3%. Taču, vērtējot degvielas tilpuma patēriņa rādītājus, tika konstatēta pretēja tendence – rezultāti uzrādīja degvielas patēriņa pieaugumu līdz aptuveni 6% abos ātruma režīmos un gandrīz visos slodzes punktos. Galvenais iemesls ir *NExBTL* blīvums, kas šajos testos bija par aptuveni 7.7% mazāks nekā dīzeļdegvielai. Degvielas patēriņa pieauguma tendence bija ļoti labi redzama, un tai bija tieša atkarība no *NExBTL* procentuālā daudzuma maisījumos.



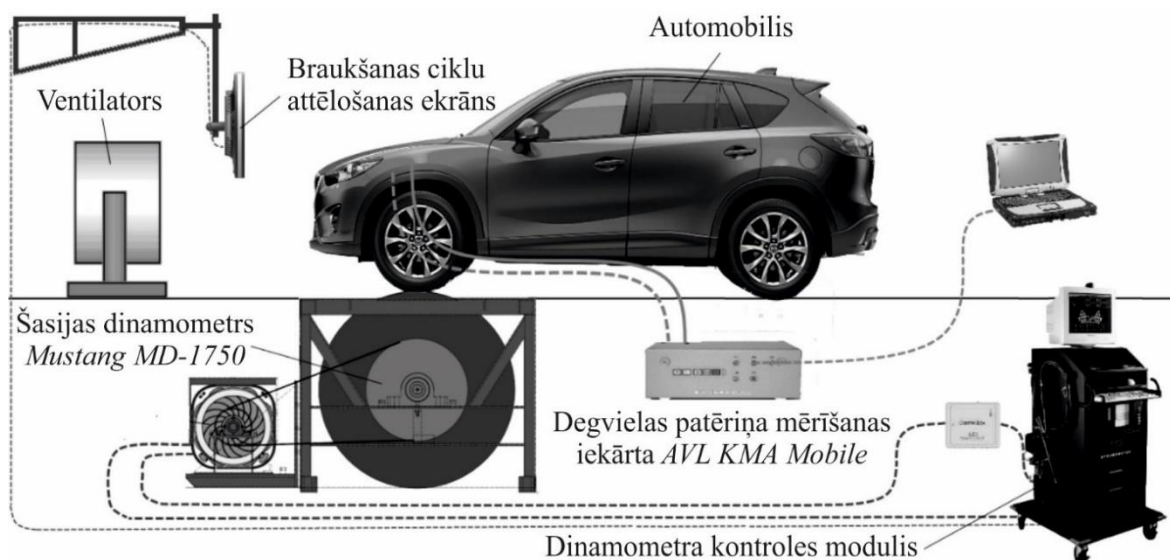
1.8. att. Lietuvā veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma

1 – 1.9 l TDI motors; 2 – augstspiediena degvielas sūknis; 3 – turbokompresors; 4 – EGR (izplūdes gāzu recirkulācijas) vārsts; 5 – gaisa dzesētājs; 6 – savienojošā vārpsta; 7 – motora slogotājs; 8 – motora griezes momenta un griešanās ātruma reģistrēšanas iekārta; 9 – degvielas iesmidzināšanas laika devējs; 10 – cilindra spiediena devējs; 11 – izplūdes gāzu temperatūras mērītājs; 12 – ieplūdes gāzu temperatūras mērītājs; 13 – gaisa spiediena mērītājs; 14 – gaisa masas mērītājs; 15 – izplūdes gāzu analizators; 16 – dūmainības analizators; 17 – cilindra spiediena mērīšanas iekārta; 18 – degvielas iesmidzināšanas laika kontroles iekārta; 19 – degvielas iesmidzināšanas laika reģistrēšanas iekārta; 20 – kloķvārpstas stāvokļa devējs; 21 – degvielas tvertne; 22 – degvielas patēriņa mērīšanas iekārta

CO izmaiņas, palielinoties *NExBTL* daudzumam degvielas maisījumā, bija nebūtiskas. CO₂ samazinājums bija 0.3 – 0.35%, un maksimālais samazinājums tika sasniegts, kad *NExBTL* procentuālais piemaisījums palielinājās līdz 85 – 100%. NO_x saturs samazinājās par 3 – 20% pie zemas motora slodzes. Tomēr pārējos slodzes režīmos rezultāti uzrādīja relatīvi mazāku NO_x samazinājumu par 0.5 – 7.5%. Lielākās samazinājuma vērtības tika sasniegtas pie augstas *NExBTL* koncentrācijas. HC saturs izmešos, izmantojot *NExBTL*85 maisījumu un tīru *NExBTL*, samazinājās par 12% pie motora apgriezieniem $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ un par 15 – 25% pie $n = 2500 \text{ min}^{-1}$. Jūtamas izmaiņas tika novērotas, analizējot dūmainību. Lielākais šī parametra samazinājums tika panākts, palielinot *NExBTL* procentuālo daļu, kas samazināja dūmainību no 2% līdz aptuveni 35% ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$) un no 5% līdz aptuveni 40% ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$) (Rimkus et al., 2019).

LBTU Alternatīvo degvielu zinātniskajā laboratorijā veiktajā pētījumā tika izmantots 2015. gadā ražots pilnpiedziņas automobilis *Mazda CX-5*, kas aprīkots ar 2.2 litru *Euro 6* normām atbilstošu motoru (kompresijas pakāpe 14, motora jauda 129 kW) un *Common Rail* degvielas iesmidzināšanas sistēmu (Birzietis et al., 2017).

Uz šasijas dinamometra *Mustang MD-1750* (skat. 1.9. att.) tika noteikta jauda un griezes moments, bet degvielas patēriņš tika mērīts trīs konstantos ātrumos (50 km h^{-1} , 90 km h^{-1} un 110 km h^{-1}), kā arī divos braukšanas ciklos – standartizētajā kombinētajā IM-240 ciklā un pašu pētnieku izstrādātajā Jelgavas pilsētas ciklā (Dukulis, Pirs, 2009). Pētījumā tika izmantotas divas degvielas – *Neste Pro Diesel* (ProD), kas saturēja hydrogenētu augu eļļu, un standarta fosilā dīzeļdegviela *Neste Futura* bez biopiedevām (FDD). Testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums dots 1.2. tabulā.

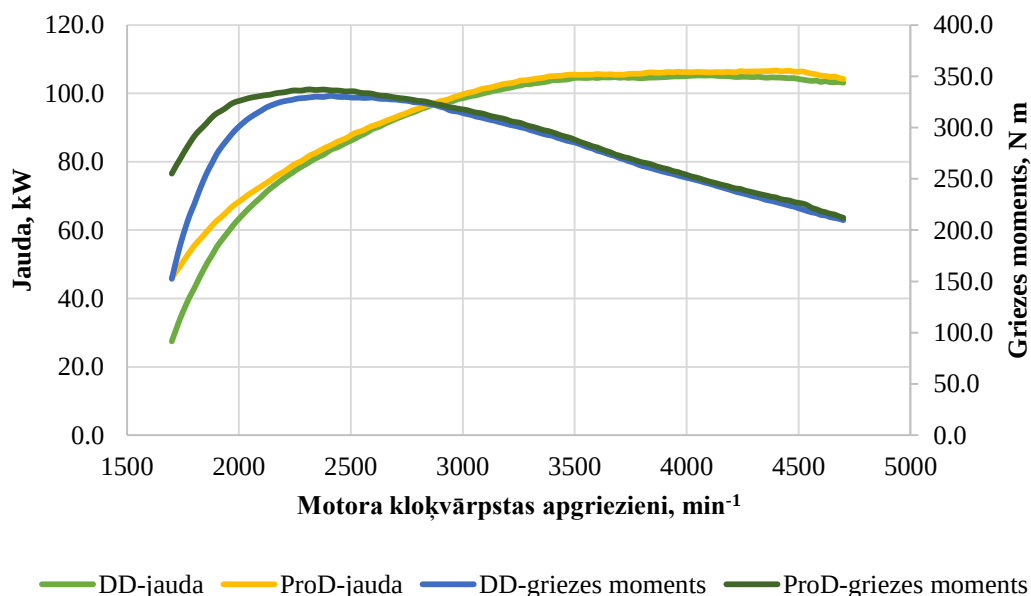


1.9. att. LBTU veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma

1.2. tabula. LBTU testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums

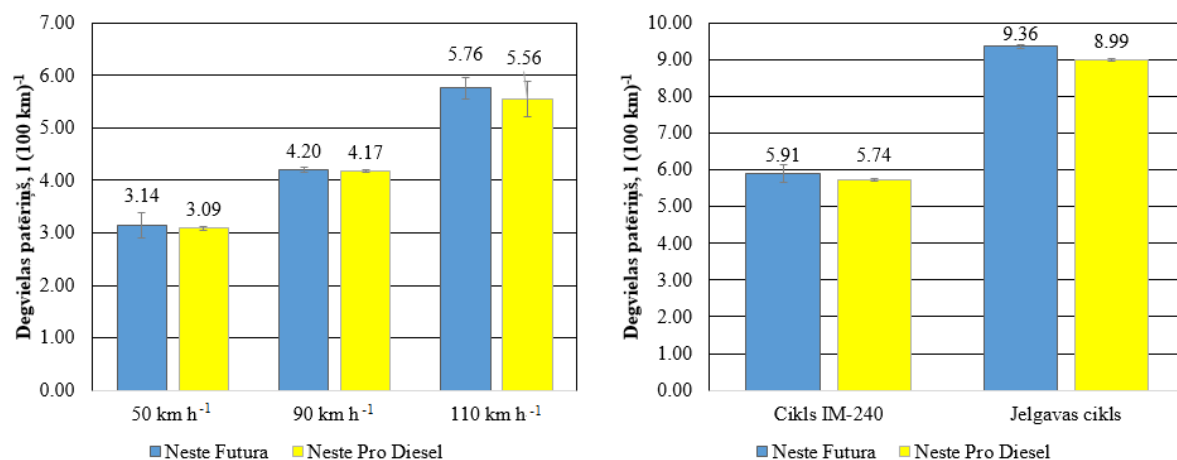
Rādītājs	FDD	FDD/HVO maisījums
Degvielas tirdzniecības nosaukums	<i>Neste Futura</i>	<i>Neste Pro Diesel</i>
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	824.4	822.2
Cetānskaitis	51.1	55.0
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	1.937	2.537
Uzliesmošanas temperatūra, °C	62.0	67.5
HVO saturs, tilpuma %	0.00	9.15

Automobiļa jaudas un griezes momenta testu rezultāti ar abām degvielām ir parādīti 1.10. attēlā. Pie vidējiem un lieliem motora kloķvārpstas apgriezieniem jaudas un griezes momenta vērtības ir ļoti līdzīgas. Būtisks jaudas un griezes momenta pieaugums tika novērots pie zemiem motora apgriezieniem (līdz ~ 2200 min⁻¹). Ar *Pro Diesel* degvielu tika sasniegta maksimālā jaudas vērtība 106.8±0.6 kW, kas ir par 1.2% lielāka nekā fosilās dīzeļdegvielas izmantošanas gadījumā. Arī maksimālā griezes momenta vērtība *Pro Diesel* degvielai bija par 2% lielāka.



1.10. att. Automobiļa jaudas un griezes momenta raksturlīknes LBTU veiktajos testos

Automobiļa darbināšana ar HVO saturošu degvielu vienmērīgā ātruma režīmā parādīja kopējo degvielas patēriņa samazināšanās tendenci (skat. 1.11. att.). Degvielas patēriņa samazinājums ar *Pro Diesel* degvielu pie vienmērīga ātruma 50, 90 un 110 km h⁻¹ bija attiecīgi 1.5, 0.7 un 3.7%.



1.11. att. Degvielas patēriņa izmaiņas LBTU veiktajos testos

Jūtāmākas degvielas patēriņa izmaiņas tika novērotas mainīgas slodzes braukšanas apstākļos, t.i., braukšanas ciklos. HVO saturošas degvielas izmantošana braukšanas ciklā IM-240 uzrādīja degvielas patēriņa samazinājumu par 0.17 l uz 100 km jeb 2.9%, salīdzinot ar FDD. Degvielas patēriņa samazinājums Jelgavas pilsētas braukšanas ciklā, kas atspoguļo transportlīdzekļa kustību intensīvā pilsētas satiksmē, bija 0.37 l uz 100 km jeb 3.9% (Birzietis et al., 2017).

Čehijā tika veikts pētījums par 100% rapšu metilestera (RME) un 100% hidroģenētas eļļas (HVO) ietekmi uz traktora *Zetor Foretrra 8641* (4 cilindru motors ar darba tilpumu 4.156 l, nominālā jauda 60 kW, maksimālais griezes moments 351 N m) iekšdedzes motora ar turbokompresoru darbības parametriem, izmantojot jūgvārpstas dinamometru *AW NEB 400*. Tika konstatēts, ka ar HVO degvielu motora maksimālais griezes moments samazinās par aptuveni 0.9%, bet maksimālā jauda par aptuveni 6%. HVO degvielas īpatnējais degvielas patēriņš, salīdzinot ar RME degvielu, samazinās gandrīz visā ātruma diapazonā, t.sk., pie nominālajiem apgriezieniem par 1.9% (Pexa et al., 2015).

Sērijveida automobiļu efektivitāte, aizstājot FDD ar HVO, tika noteikta Itālijā un Spānijā veiktajos testos. Enerģijas patēriņš (J km⁻¹) tika salīdzināts WLTP ciklā, un tas palielinājās vai samazinājās atkarībā no automobiļa modeļa un apkārtējās vides temperatūras. Pētot *Euro 6* normām atbilstošu automobili *Nissan Qashqai* (Hernández et al., 2020), tā enerģijas patēriņš, izmantojot HVO, samazinājās par 5.5% un 5.2% attiecīgi pie +24 °C un -7 °C, savukārt novērtējot divus *Euro 6b* prasībām atbilstošus pasažieru automobiļus (markas netika minētas) (Suarez-Bertoa et al., 2019) pie +23 °C un -7 °C, tikai viens automobilis patērēja par 4.3% mazāk enerģijas pie -7 °C. Tas pats automobilis 23 °C temperatūrā patērēja par 0.26% vairāk enerģijas. Cits automobilis patērēja vairāk enerģijas abās testētajās temperatūrās – attiecīgi par 0.84% un 0.43% vairāk.

Grieķijā NEDC ciklā tika testēts *Euro 5* normām atbilstoša vieglā automobiļa (marka netika minēta) dīzeļmotors. Veicot t.s. “karsto” un “auksto” iedarbināšanu ar HVO degvielu, enerģijas izmantošanas efektivitātes izmaiņas salīdzinājumā ar Bio7 degvielu bija -0.8% un +0.6%. Turklāt dažos apstākļos, piemēram, pie motora apgriezieniem $n = 1500/2000 \text{ min}^{-1}$ un griezes momenta 70 N m, HVO izmantošanas termiskā efektivitāte palielinājās par 0.5 – 0.6%. Tomēr visā apgriezienu/griezes momentu kartē enerģijas patēriņa izmaiņas svārstījās no +2.3 līdz -2.8%. Enerģijas patēriņa pieaugums parasti notika pie ļoti augstiem un zemiem griezes momentiem apgriezienu/griezes momentu kartes malās (Dimitriadis et al., 2018).

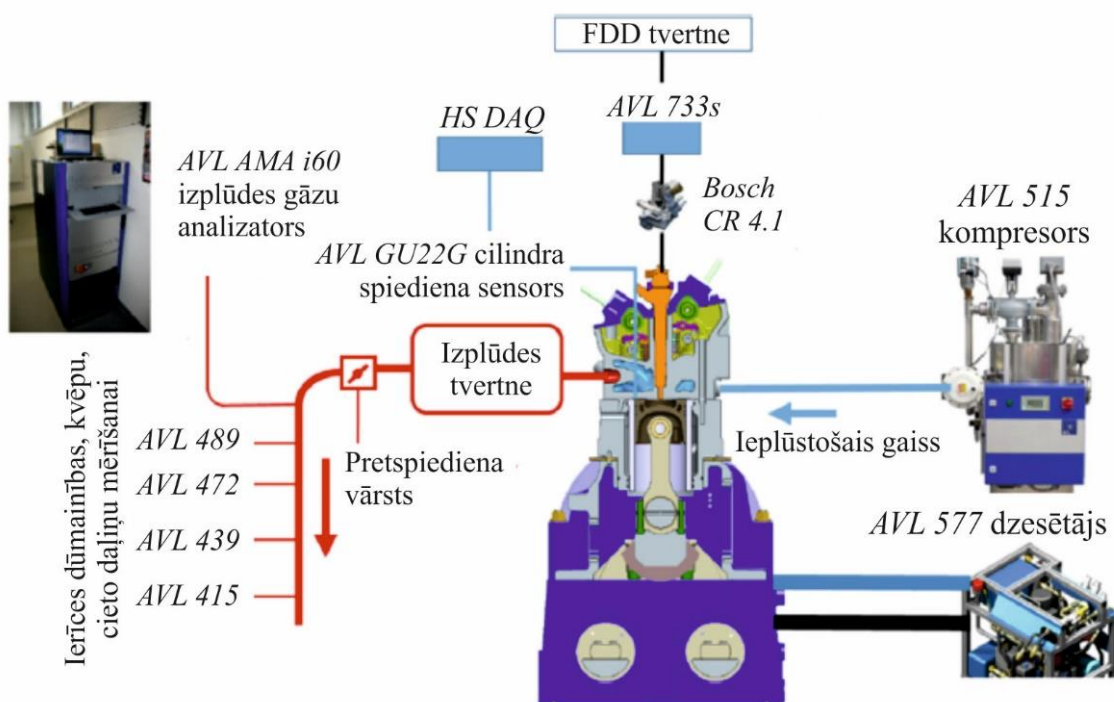
Polijas un Lietuvas pētnieku grupa salīdzināja HVO un FDD ietekmi uz enerģijas izmantošanas termisko efektivitāti pie dažādām izplūdes gāzu recirkulācijas EGR vērtībām pētnieciskajā viencilindra AVL 5402 dīzeļmotorā (motora darba tilpums 0.51 l, kompresijas pakāpe 17.5, maksimālā jauda bez turbopūtes 6.25 kW pie 4200 min⁻¹). Bez EGR termiskā efektivitāte ar HVO bija par 1.9% augstāka salīdzinājumā ar FDD. Pie 35% EGR efektivitāte bija par 0.9% augstāka. Tomēr, analizējot visus iegūtos rezultātus, tika secināts, ka HVO izmantošana FDD vai Bio7 degvielas vietā var palielināt enerģijas izmantošanas efektivitāti, taču tas netiek garantēts, ja vien, lietojot HVO, netiek veikta motora vadības bloka ECU (*Engine control unit*) kalibrēšana (Hunicz et al., 2020).

1.4.3. Izmešu sastāvs

Vairākos pētījumos, kas tika iepriekš analizēti 1.1.1. un 1.1.2. nodaļās, jau tika pieminētas identificētās izmaiņas izplūdes gāzu sastāvā, izmantojot HVO degvielu, jo tās ir saistītas gan ar šajās nodaļās aprakstīto degvielas sadegšanas procesu, gan arī izmaiņām spēkratu veiktspējā un degvielas patēriņā. Šajā nodaļā aplūkoti pētījumi, kas fokusējas galvenokārt tikai uz izmešu sastāvu.

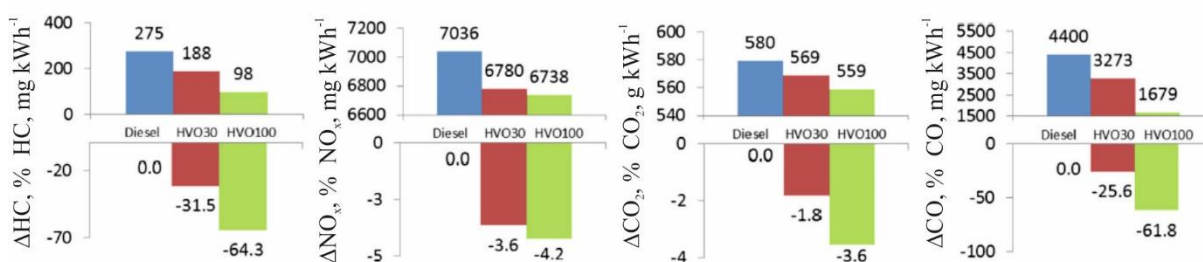
Vācijā tika testēti 11 vieglie automobiļi (*Audi*, *VW*, *Skoda*) ar dažādām iesmidzināšanas sistēmām, transmisijām, izplūdes gāzu pēcapstrādes sistēmām un emisiju standartiem (no *Euro III* līdz *Euro 6*). Četri no spēkratiem tika darbināti ar 2% biodīzeļdegvielas piejaukumu HVO (HVO-Bio2), bet pārējie septiņi ar HVO-Bio7, kur biodīzeļdegvielas piejaukšanas mērķis bija uzlabot degvielas eļļošanas īpašības. Rezultāti parādīja, ka, izmantojot HVO, nesadegušo komponentu (HC, CO) emisijas ir samazinājušās par 35 – 90%, salīdzinot ar dīzeļdegvielu. Šo faktu pētnieki skaidro ar HVO degvielas ķīmisko sastāvu un augsto cetānskaitli. HVO-Bio7 izmantošanā tika konstatēts arī CO₂ emisiju samazinājums par 5%, bet NO_x emisijas palielinājās par 5 – 14%, salīdzinot ar dīzeļdegvielu, un pieaugums nebija atkarīgs no izplūdes gāzu pēcapstrādes (Singer et al., 2015).

Čehijas Tehniskajā universitātē tika pētīta HVO degvielas un 30% HVO maisījuma ar FDD ietekme uz pētnieciskā ar *Common Rail* iesmidzināšanas sistēmu aprīkota viencilindra motora AVL 5402 (0.5 l, kompresijas pakāpe 16) izmešiem (skat. 1.12. att.) (Bortel et al., 2019). Motors pēc parametriem atbilst tipiska vieglā automobiļa motora vienam cilindram.



1.12. att. Čehijā veiktajos testos izmantoto iekārtu pieslēgšanas shēma

Izmantojot tīru HVO, motora indicētā jauda palielinājās par 4.53%. Ievērojami samazinājās CO un HC izmeši salīdzinājumā ar dīzeļdegvielu (par 61.8 un 64.3%). CO₂ un NO_x emisiju samazinājums bija mazāks (attiecīgi par 3.6 un 4.2%). Visu minēto parametru samazinājums tika konstatēts arī maisījumdegvielai HVO30 – attiecīgi 25.6, 31.5, 1.8 un 3.6% (skat. 1.13. att.) (Bortel et al., 2019).



1.13. att. Integrētās visu režīmu izmešu sastāva izmaiņas Čehijā veiktajos testos

Lai novērtētu emisijas, Indijas pētnieki testēja HVO un biodīzeļdegvielu, kas ražotas no jatrofas (*Jatropha*) eļļas, un izmantoja trīspadsmit režīmu Eiropas stacionāro ciklu (13 dažādas slodzes un motora apgriezienu kombinācijas). Eksperimentos tika izmantots tiešās iesmidzināšanas sešcilindru dīzeļmotors ar turbopūti (darba tilpums 5.9 l, maksimālā jauda 134 kW, maksimālais griezes moments 675 N m), kas atbilst *Euro III* normām. Salīdzinot ar FDD, tika konstatēts NO_x emisiju pieaugums par 77 un 26%, izmantojot attiecīgi BioDD un HVO, bet ar HVO motors radīja aptuveni 29% mazākas NO_x emisijas nekā ar BioDD. Samazinājums salīdzinājumā ar FDD tika konstatēts CO emisijām (HVO par 16%, BioDD par 27%) un HC emisijām (attiecīgi par 16 un 41%). Biodīzeļdegvielas gadījumā to var skaidrot ar lielāku skābekļa saturu degvielā, bet HVO – ar augstāku cetānskaitli (Singh et al., 2015).

Somijā tika testēts viens automobilis ar tiešo iesmidzināšanu (A) un divi ar *Common Rail* sistēmu (B un C). Automobilis A un C bija ar katalizatoru, bet B – bez tā. Tika testēti *NExBTL* maisījumi (5, 15, 20 un 85%) ar divām dažādām fosilajām dīzeļdegvielām. Palielinoties HVO koncentrācijai, tika novērota HC, CO un mehānisko daļiņu emisiju samazināšanās. Tomēr pētījums neuzrādīja skaidras NO_x samazinājuma tendences (Rantanen et al., 2005).

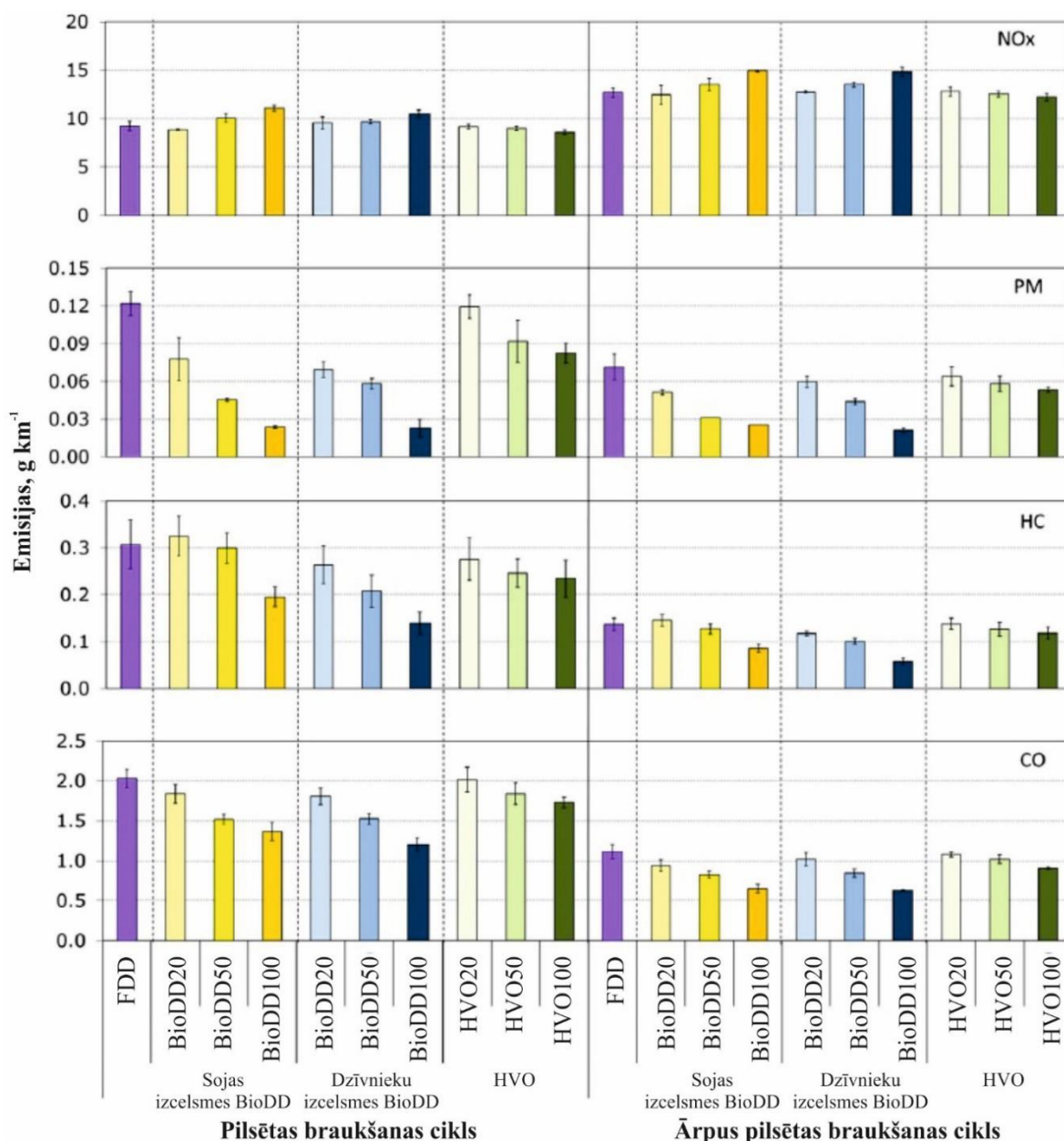
Cita Somijas pētnieku grupa pētīja HVO ietekmi uz HC, CO, NO_x un dūmainības samazināšanos. Ar noklusējuma iesmidzināšanas laiku tika novērots par 6% mazāks NO_x un par 35% mazāks PM emisiju līmenis salīdzinājumā ar dīzeļdegvielu. Ja HVO radītās NO_x emisijas tika kontrolēti turētas FDD līmenī, HVO izmantošana radīja par 37% mazāk kvēpu un par 6% mazāku īpatnējo degvielas patēriņu SFC (*specific fuel consumption*), salīdzinot ar dīzeļdegvielu. Ja turēja nemainīgu SFC, HVO izmantošana radīja NO_x samazinājumu par 16% un kvēpu samazinājumu par 23%, salīdzinot ar dīzeļdegvielu (Aatola et al., 2009).

Austrijā tika pētīta tīra HVO un tās maisījumi ar FDD četrcilindru *CRDi* motorā. Emisijas tika noteiktas, izmantojot motorstendu un šasijas dinamometru. Pie zemām slodzēm PM emisijas samazinājās līdz pat 50%, izmantojot HVO, jo tajā nav aromātisku ogļūdeņražu. Autori novēroja daļiņu izmēra samazināšanos, kas izraisīja mazāku kvēpu emisiju. Tomēr viņi atklāja, ka pašu daļiņu skaits nesamazinās. HC un CO emisijas arī tika samazinātas līdz 50%. NO_x emisijas nedaudz samazinājās testos uz motorstenda, tomēr uz šasijas dinamometra būtiskas izmaiņas netika konstatētas (Pflaum et al., 2010).

Somijā tika veikta 17 autobusu testēšana, sākot no vecākiem spēkratiem, kas atbilst *Euro II* izmešu normām, līdz pat *EVV* (*Enhanced Environmentally-friendly Vehicles*). Izmantojot 100% HVO degvielu, vidējais emisiju NO_x samazinājums bija 10%, PM 30%, CO 29% un HC 39%, salīdzinot ar FDD. Konsekvents izmešu samazinājums tika novērots *Euro II* un *Euro III* autobusiem, taču uz jaunākiem autobusiem šādas tendences netika novērotas. Cieto daļiņu filtra DPF (*diesel particulate filter*) darbība bija ar HVO efektīvāka nekā ar FDD, kas tika skaidrots ar NO_x un PM attiecību, kas HVO degvielai ir labvēlīgāka cieto daļiņu oksidēšanai (Erkkilä et al., 2011).

Biodīzeļdegvielas un otrās paaudzes biodegvielas ietekme uz NO_x emisijām tika pētīta Kalifornijā (ASV). Divi lieljaudas motori – 2006. gadā ražots bez izplūdes gāzu recirkulācijas un 2007. gadā ražots ar cieto daļiņu filtru (DPF), tika pārbaudīti uz motorstenda četros dažādos testa ciklos. Emisijas no sojas un dzīvnieku izcelsmes BioDD un HVO tika testētas maisījumos no 5 līdz 100%. NO_x emisijas konsekventi palielinājās, palielinoties BioDD saturam maisījumā – NO_x palielinājums bija 1.5 – 6.9%, izmantojot degvielu BioDD20, 6.4 – 18.2% BioDD50 un 14.1 – 47.1% BioDD00. Savukārt, palielinoties HVO saturam, tās ar līdzīgu tendenci samazinājās (Hajbabaei et al., 2012).

Citā ASV veiktajā pētījumā uz šasijas dinamometra tika testēts kravas automobilis (motora darba tilpums 14.6 l) bez izplūdes gāzu recirkulācijas sistēmas. Pētījumā tika izmantota FDD, sojas un dzīvnieku izcelsmes biodīzeļdegvielas un HVO. Abas BioDD gan tīrā veidā, gan 50% maisījumā ar FDD pilsētas braukšanas ciklā uzrādīja NO_x pieaugumu par 10 – 20% (sojas izcelsmes) un 5 – 14% (dzīvnieku izcelsmes). Savukārt HVO, palielinoties tās saturam degvielu maisījumā, uzrādīja NO_x emisiju samazināšanos. Sojas un dzīvnieku izcelsmes BioDD uzrādīja ievērojamu PM emisiju samazinājumu visos maisījumos un ciklos. HVO uzrādīja PM emisiju samazinājumu tikai maisījumiem, kur HVO saturs pārsniedza 50%. Detalizētas izmešu izmaiņas parādītas 1.14. attēlā (Na et al., 2015).



1.14. att. NO_x , PM, HC un CO emisijas ASV veiktajā pētījumā

Itālijā tika testēti divi *Euro 6b* normām atbilstoši viegie automobiļi (viens aprīkots ar SRC (*Selective Catalytic Reduction*) izmešu kontroles sistēmu, otrs ar LNT (*Lean NO_x Trap*) sistēmu) reālos braukšanas apstākļos, izmantojot piecus dažādus degvielu maisījumus, t.sk. tīru HVO degvielu dažādās apkārtējās vides temperatūrās. Lai gan paši autori raksta, ka dažādu HVO maisījumu un FDD radīto izmaiņu vērtības neuzrādīja ar degvielu saistītas tendences attiecībā uz testēto transportlīdzekļu emisijām ne laboratorijā, ne ceļizmēģinājumos, izņemot to, ka tīras HVO izmantošana nodrošināja par 4% mazāku CO₂ izmešu daudzumu nekā pārējās degvielas visos testēšanas režīmos, tomēr 1.3. tabulā redzams, ka konkrētajiem automobiļiem noteiktos apstākļos šīs izmaiņas bija jūtamas (Suarez-Bertoa et al., 2019).

1.3. tabula. Emisiju salīdzinājums Itālijā veiktajā pētījumā

Automobilis A ar SRC. CO ₂ emisijas WLTP ciklā pie 23 °C, g km ⁻¹ , pārējās – mg km ⁻¹								
Degviela	HC	CH ₄	CO	NO _x	PM (×10 ¹¹)	CO ₂	NH ₃	N ₂ O
BioDD7	2±0	1±0	52±5	58±2	0.04±0.03	143±1	12±0	7±0
FDD	4±0	2±0	147±3	136±5	0.10±0.04	142±1	28±7	11±0
HVO7	3±0	1±0	75±5	63±11	0.02±0.00	144±0	18±8	7±0
HVO30	2±0	1±0	69±10	341±4	0.10±0.10	143±0	< 1	6±0
HVO100	2±0	1±0	153±59	325±21	0.03±0.01	137±0	< 1	8±1
Automobilis A ar SRC. CO ₂ emisijas WLTP ciklā pie -7 °C, g km ⁻¹ , pārējās – mg km ⁻¹								
Degviela	HC	CH ₄	CO	NO _x	PM (×10 ¹¹)	CO ₂	NH ₃	N ₂ O
BioDD7	8±0	1±0	199±22	1066±28	0.30±0.20	160±3	< 1	11±3
FDD	7±0	1±0	241±26	770±34	0.30±0.30	156±5	< 1	12±2
HVO7	6±0	1±0	217±10	800±6	0.30±0.01	163±2	< 1	11±0
HVO30	5±0	1±0	157±12	812±23	0.20±0.00	159±0	< 1	9±0
HVO100	3±0	1±0	176±24	799±3	0.50±0.20	150±0	< 1	11±1
Automobilis B ar LNT. CO ₂ emisijas WLTP ciklā pie 23 °C, g km ⁻¹ , pārējās – mg km ⁻¹								
Degviela	HC	CH ₄	CO	NO _x	PM (×10 ¹¹)	CO ₂	NH ₃	N ₂ O
BioDD7	19±4	14±2	41±22	183±1	0.10±0.10	173±1	2±0	12±3
FDD	20±5	15±3	36±13	166±18	0.02±0.00	172±1	1±1	11±0
HVO7	21±7	16±5	42±4	182±3	1.40±0.90	171±0	2±0	10±1
HVO30	22±6	18±4	34±13	199±8	0.40±0.40	169±1	2±1	9±2
HVO100	17±1	14±1	29±13	148±37	2.00±0.50	165±2	< 1	8±1
Automobilis B ar LNT. CO ₂ emisijas WLTP ciklā pie -7 °C, g km ⁻¹ , pārējās – mg km ⁻¹								
Degviela	HC	CH ₄	CO	NO _x	PM (×10 ¹¹)	CO ₂	NH ₃	N ₂ O
BioDD7	20±1	13±3	45±1	393±32	0.50±0.04	199±2	2±0	12±3
FDD	20±2	12±2	126±19	411±67	3.10±0.70	204±9	1±0	10±1
HVO7	23±6	15±3	102±55	379±42	6.00±3.00	197±1	1±0	11±1
HVO30	37±6	28±3	83±9	384±40	0.70±0.70	200±14	1±0	15±1
HVO100	20±2	16±2	41±2	284±13	1.30±0.40	187±0	2±0	12±0

Somijā tika konstatēts, ka, izmantojot HVO degvielu, var samazināt izmešu daudzumu un uzlabot motora veiktspēju, optimizējot motora darbības parametrus vai izmantojot piedevas. Tika koriģēts ieplūdes vārsta aizvēršanas brīdis, ieplūdes laiks, iesmidzināšanas spiediens un EGR darbība, kā arī pievienota DNPE (di-n-pentilētera) piedeva. Tas samazināja PM un NO_x emisijas attiecīgi par 41 – 61% un 31 – 54%. Kā vienīgais trūkums tika konstatēts aldehīdu emisiju palielinājums dažos režīmos (Murtonen et al., 2012).

DNPE izmantoja arī cita Somijas četru zinātnisko institūciju pētnieku grupa, eksperimentējot ar tīru HVO un 80% HVO / 20% DNPE maisījumu, izmantojot viencilindra pētniecisko motoru, kas pēc parametriem atbilst komerciālajam sešcilindru bezceļu transportlīdzekļa *Common Rail* dīzeļmotoram. DNPE piejaukšana būtiski mainīja vairākas degvielas fizikālās īpašības (skat. 1.4. tabulu) (Happonen et al., 2013).

1.4. tabula. Somijā testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums

Rādītājs	HVO	HVO/DNPE maisījums
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	779	781
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	2.985	2.348
Cetānskaitlis	88.2	93.9
Efektīvā masas siltumspēja, MJ kg ⁻¹	43.991	43.137
Skābekļa saturs, %	0	2 – 3

Ar skābekli bagātinātais maisījums izraisīja PM emisiju samazinājumu par 25%, salīdzinot ar 100% HVO, savukārt NO_x emisijas samazinājums bija aptuveni 5%. EGR darbības korekcijas vienlaikus samazināja PM un NO_x daudzumu. Autori arī pētīja degvielas maisījuma ietekmi uz izplūdes gāzēs esošo daļiņu higroskopiskajām īpašībām. Daļiņām, kas radušās maisījuma sadegšanas laikā, bija augstāka higroskopiskums, salīdzinot ar 100% HVO. To var skaidrot ar palielinātu organisko vielu saturu izplūdes gāzēs, jo organiskās vielas aizpilda daļu izplūdes gāzu daļiņu aglomerētās struktūras dobumu (Happonen et al., 2013).

Arvien aktuālāka kļūst emisiju noteikšana dažādos ciklos un apstākļos, izmantojot modernākos spēkratus. Piemēram, Itālijā veiktie testi (Di Blasio et al., 2022) apstiprināja, ka HVO ievērojami samazina motora emisijas, nodrošinot *Euro 6c* noteiktos NO_x emisiju mērķus, nemainot efektivitāti. NEDC un WLTP testos, kas tika veikti uz viencilindra pētnieciskā motora (darba tilpums 0.5 l, kompresijas pakāpe 14.9), tika konstatēts HC samazinājums līdz 0.5 g kWh⁻¹ (50%) un CO samazinājums līdz 2.5 g kWh⁻¹ (45%), pateicoties labākai HVO degvielas strūklas sadalīšanai pilienos un augstākam cetānskaitlim. PM samazinājums bija līdz 10%, kas atbilst 0.18 g kWh⁻¹, savukārt CO₂ samazinājās aptuveni 7 – 8% robežās, t.i., par 0.2 – 0.5 g kWh⁻¹. Šajā pētījumā izmantoto degvielu fizikālās īpašības dotas 1.5. tabulā.

1.5. tabula. Itālijā testēto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums

Rādītājs	HVO	FDD
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	777	837
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	2.650	2.891
Cetānskaitlis	79.6	56.2
Zemākā masas siltumspēja, MJ kg ⁻¹	44.35	42.95
Ūdeņraža saturs, %	15.0	13.4
Sēra saturs, mg kg ⁻¹	0	8.2

Polijā veiktā pētījuma (Dobrzyńska et al., 2020) mērķis bija izpētīt emisiju samazināšanas iespējas reālos braukšanas apstākļos, izmantojot degvielas piedevas. Tika pārbaudītas dažādas piedevas komerciāli pieejamajai BioDD7 degvielai – HVO 10 un 30% apjomā, un piedevas, kas satur cērija (*cerium*) dioksīda un ferocēna (*ferrocene*) nanodaļiņas. Tika izmantots šasijas dinamometrs AVL Zoellner un jaunā Eiropas braukšanas cikla (NEDC) procedūra, lai noteiktu CO, NO_x, HC un PM (pēc masas un skaita) emisijas no 11 gadus veca vieglā automobiļa *Fiat Panda* ar dīzeļmotoru (darba tilpums 1.15 l, maksimālā jauda 51 kW). Iegūtie rezultāti liecināja, ka gan HVO, gan nanopiedevu pievienošana BioDD7 degvielai deva ievērojamu CO (52%) un HC (47%) emisiju samazinājumu salīdzinājumā ar bāzes BioDD7 degvielu. Tika konstatēts, ka makrodaļiņu emisijas (līdz 10% daļiņu masas un 7% pēc daļiņu skaita) vislabāk tiek samazinātas, pievienojot cērija dioksīda nanodaļiņas BioDD7 degvielai (ar 30% HVO), savukārt vislabākie rezultāti NO_x samazināšanai tika iegūti, pievienojot BioDD7 degvielai (ar 30% HVO) ferocēna nanodaļiņas.

Indijā veiktajā pētījumā (Kumar et al., 2021) tika sagatavoti no cepšanas atkritumeļļas ražotās HVO maisījumi (10, 20, 30, 40 un 50% pēc tilpuma) ar dīzeļdegvielu. Tika konstatēts, ka HC, CO un PM emisijas samazinās maisījumiem ar HVO saturu līdz pat 30%. Kad HVO procentuālais daudzums tiek vēl vairāk palielināts, emisijas sāk pieaugt. NO_x emisijas bija

zemākas nekā dīzeļdegvielai visiem testa paraugiem. Salīdzinot ar dīzeļdegvielu, maksimālais NO_x, HC, CO un PM samazinājums bija attiecīgi 23.2% (tīrai HVO), 14.4% (HVO30), 13.8% (HVO30) un 13.3% (HVO30).

Pētījumā Somijā tika novērtēts ikgadējais NO_x izmešu samazināšanas potenciāls, aizstājot BioDD7 degvielu ar HVO *Euro 4*, *Euro 5* un *Euro 6* normām atbilstošu autobusu parkā Helsinkos. Tika pierādīts, ka samazinājuma potenciāls ir 7% (Lakanen et al., 2021).

Somijā tika pētīts apvidus transportlīdzekļa dīzeļmotors ar 4.4 l darba tilpumu un 101 kW jaudu un tika novērots 4.3% NO_x emisiju samazinājums, izmantojot fosilās dīzeļdegvielas vietā HVO (Ovaska et al., 2019).

Tomēr kopumā HVO ietekme uz NO_x izmešu samazināšanu joprojām nav skaidra. Piemēram, Beļģijā veiktajā pētījumā, izmantojot *Euro 6b* normām atbilstošu 1.5 l četrcilindru dīzeļmotoru (Demuynck et al., 2021), nekonstatēja īpašu degvielas ietekmi uz NO_x izmešiem, testējot komerciāli pieejamo dīzeļdegvielu BioDD7, BioDD30 un 100% HVO. Somijā veiktajos testos ar lieljaudas motoriem (Kuronen et al., 2010), izmantojot HVO, novēroja NO_x samazināšanos par 7 – 14% salīdzinājumā ar FDD. Tajā pašā laikā citā pētījumā (Happonen et al., 2012) atklāja, ka NO_x var samazināt pie dažādām slodzēm (50, 75 un 100%), pielāgojot motora parametru parametrus, rezultātā secinot, ka nevar pilnībā izmantot HVO priekšrocības, ja vien motors nav optimizēts jaunajai degvielai. Līdz ar to NO_x koncentrācijas samazināšanas iespējas ir atkarīgas no dažādiem faktoriem – degvielas īpašībām, izsmidzināšanas īpašībām, gaisa un degvielas attiecības, kompresijas pakāpes utt. (Dimitriadis et al., 2018). Tāpēc, aizstājot parasto dīzeļdegvielu ar HVO, nav garantētas samazinātas NO_x emisijas (Szeto, Leung, 2022).

Analizējot aptuveni 100 dažādu pētījumu rezultātus, Ķīnas pētnieki (Szeto, Leung, 2022) konstatēja, ka dažās publikācijās vērojams interešu konflikts saistībā ar apgalvojumiem par labāku efektivitāti un emisiju samazināšanu, ja fosilās dīzeļdegvielas vietā izmanto HVO, jo tajos dalību ņēmuši HVO degvielas ražotāji un izplatītāji (Dimitriadis et al., 2018; Lakanen et al., 2021; Suarez-Bertoa et al., 2019). Tomēr arī daudzās citās publikācijās, kurās šāds interešu konflikts nav vērojams, tāpat tiek konstatēti daudzsoļi HVO degvielas izmantošanas rezultāti (Bjørngen et al., 2020; Bortel et al., 2019; Gren et al., 2021; Hernández et al., 2020; Hunicz et al., 2020; Ovaska et al., 2019).

1.4.4. Degvielas izmantošana dažādās apkārtējās vides temperatūrās un ietekme uz dažādu spēkratu sistēmu elementiem

Vairums no iepriekš minētajiem pozitīvajiem rezultātiem, kas iegūti, darbinot spēkratus vai to motorus ar HVO, sasniegti, pateicoties šīs degvielas fizikāli ķīmisko īpašību kombinācijai. HVO ir sintētiska šķidra biodegviela, kas nesatur aromātiskās vielas un sēra savienojumus (Singh et al., 2018). Tai ir salīdzinoši augsta siltumspēja un cetānskaitlis, zema viskozitāte, blīvums, eļļošanas īpašības un saduļķošanās punkts (Dimitriadis et al., 2018). Visas šīs īpašības ir savstarpēji saistītas. Siltumspēja ir saistīta ar ūdeņraža saturu, blīvums – ar degvielas parafīnveida dabu, savukārt saduļķošanās punkts atkarīgs no reakcijas apstākļiem, kas var radīt noteiktu triglicerīdu saturu (Šimáček et al., 2010). Spānijā un ASV veiktais pētījums (Lapuerta et al., 2011) pierādīja, ka galvenos ierobežojumus HVO un FDD sajaukšanai nosaka eļļošanas īpašības un cetānskaitlis, kur starp šiem raksturlielumiem ir jāatrod kompromiss. Kopumā pasliktinātās īpašības izmantošanai zemās temperatūrās varētu būt vienīgais HVO trūkums salīdzinājumā ar fosilo dīzeļdegvielu (Šimáček et al., 2010).

Šo apgalvojumu apstiprina arī Korejā veiktā vairāk nekā 50 dažādu HVO izmantošanas pētījumu analīze (No, 2014), kur secināts, ka HVO ir augstāka oksidācijas stabilitāte nekā biodīzeļdegvielai, bet tā uzrāda sliktāku veiktspēju zemās temperatūrās nekā FDD.

Pētījumā, kur NEDC braukšanas ciklā testēja *Toyota* pikapu, BioDD5 un dažādus HVO un FDD maisījumus, autori novēroja degvielas patēriņa samazināšanos, palielinoties HVO saturam maisījumā. Tika noteikta arī kravas automobiļa aukstās palaišanas spēja un darbība zemās temperatūrās lauka apstākļos. Tika konstatēts, ka HVO bija vismaz līdzvērtīga fosilajai

dīzeļdegvielai abos šajos aspektos, taču drošai ekspluatācijai īpaši smagos braukšanas apstākļos tika ieteikts HVO20, t.i., degvielas maisījums, kur 20% HVO piejaukti dīzeļdegvielai ar atbilstošām aukstās plūsmas piedevām (Caprotti et al., 2011).

Saderība ar parastajiem kompresijaizdedzes motoriem un Eiropas standartu EN 15940, iespēja sajaukt ar FDD mazumtirdzniecības vietā (Björgen et al., 2020) padara HVO pievilcīgu mazumtirgotājiem. Turklāt zemais degvielas sistēmas nosēdumu un motoreļļas bojāšanās risks (Mikkonen et al., 2013), uzlabotas izplūdes gāzu emisijas un pagarināts dīzeļdegvielas daļiņu filtra reģenerācijas intervāls (Rodríguez-Fernández et al., 2017) padara to pievilcīgu arī klientiem. HVO var izmantot, nemainot motora degvielas padeves sistēmu, jo tā būtiski neietekmē elastomēru, piemēram, blīvju un gredzenu, noārdīšanos (Müller et al., 2022), kas parasti nav izturīgi pret citām spēkratos izmantotajām biodegvielām.

Taizemes pētnieki (Jaroonsathian et al., 2013) veica materiālu saderības izpēti, izmantojot HVO kā degvielu. Tika pārbaudīta HVO ietekme uz degvielas tvertnes materiālu (ar cinka pārklājumu), un no rentgena fluorescences analīzes tika konstatēts, ka tvertnes pārklājumā nav notikušas izmaiņas. Somijas pētnieki (Makinen et al., 2011) sniedza līdzīgus rezultātus – nekādas izmaiņas degvielas uzglabāšanas tvertnē netika konstatētas pēc astoņiem mēnešiem, un HVO degviela joprojām bija dzidra. Tā kā gumijas blīvējumu uzbriešana ir atkarīga no degvielas aromātisko ogļūdeņražu satura, bet to HVO degvielā nav, tad lauka izmēģinājumos nekādas problēmas blīvējumos netika konstatētas.

Austrijā autori pētīja arī eļļas atšķaidīšanos, kas rodas cieto daļiņu filtra DPF (*diesel particulate filter*) reģenerācijas dēļ. DPF uzkrāto kvēpu sadedzināšanai nepieciešama augsta temperatūra. Degvielas pēciesmidzināšana rada nepieciešamo izplūdes gāzu temperatūru, jo tās sadeg darba gājiena beigās. Tomēr šīs iesmidzināšanas stratēģijas rezultātā degviela var nonākt uz cilindra sienām, tādējādi palielinot eļļas atšķaidīšanu. Pēc 4 h testa pie 1250 min⁻¹ un 2 bar spiediena autori novēroja eļļas viskozitātes samazināšanos, palielinoties HVO saturam degvielā. Autori to skaidroja ar degvielas patēriņa palielināšanos, kas ir zemākas HVO tilpuma siltumspējas rezultāts (Pflaum et al., 2010).

HVO ietekmi uz DPF pētīja arī Somijas zinātnieki (Kopperoinen et al., 2011), pārbaudot vieglo automobili uz šasijas dinamometra. Autori novēroja, ka, darbinot automobili ar 100% HVO, tika nobraukts vismaz 400 km pirms DPF reģenerācijas sākuma. Tā kā reģenerācija parasti palielina degvielas patēriņu, tad, jo garāks ir reģenerācijas intervāls, jo augstāka ir degvielas ekonomija. Tā kā HVO degviela deg tīri un rada mazāk cieto daļiņu emisiju nekā parastā dīzeļdegviela, tad izplūdes pretspiediena paaugstināšanās ir lēnāka, un tas nodrošina garāku reģenerācijas intervālu. Cita Somijas pētnieku grupa (Happonen et al., 2010) salīdzināja dīzeļdegvielas un HVO oksidācijas īpašības un šo degvielu radīto kvēpu daļiņu struktūru. Autori nenovēroja nekādas izmaiņas kvēpu daļiņu īpašībās, lai gan abu degvielu ķīmiskais sastāvs ir atšķirīgs. Tas parāda, ka fosilajai dīzeļdegvielai paredzētās izmešu pēcapstrādes ierīces var droši darbināt arī ar HVO.

Vācijas zinātnieki pētīja triboloģiskos apstākļus dīzeļmotoru degvielas iesmidzināšanas sistēmu augstspiediena sūkņos un sprauslās, secināja, ka pie maziem ātrumiem, zemas viskozitātes un lielām slodzēm šķidrums slānis no berzes elementiem var tikt izspiests, līdz ar to triboloģiskā sistēma atrodas robežrežīmā un nodilumaizsardzība balstās uz molekulāri plānu slāni uz virsmas. Šajā režīmā aizsardzības līmeni nosaka šī slāņa īpašības un pārklājums. Degvielas iesmidzināšanas sistēmās dažādas sastāvdaļas eļļo galvenokārt ar degvielu. Izmantojot degvielas ar īpaši zemu sēra saturu, t.sk. HVO degvielu, var notikt motoru atteices, jo pārmērīgi nodilst degvielas iesmidzināšanas sistēmas sastāvdaļas (Matzke et al., 2009).

Indijas pētnieki (Sonthalia, Kumar, 2019) uzskata, ka HVO neietekmē izmešu pēcapstrādes ierīču, piemēram, DPF, DFC vai SCR darbību un HVO izmantošana CRDi motorā izraisa izmešu cieto daļiņu izmēra samazināšanos, taču daļiņu skaits paliek nemainīgs. Tāpat tiek samazināts toksisko emisiju, piemēram, aldehīdu un benzola daudzums, kā arī baktēriju mutagenitāte. Atzīmēts, ka motora darbību var optimizēt, mainot ieplūdes vārsta aizvēršanu, iesmidzināšanas spiedienu, EGR izmantošanu un izmantojot piedevas.

1.5. Nodaļas kopsavilkums

Lai sasniegtu ANO, ES un Latvijas rīcībpolitikas dokumentos un normatīvajos aktos noteiktos mērķus, jaunāko paaudžu biodegvielu izmantošana un ilgtspējīga mobilitāte ar augstu tehnoloģiju gatavības līmeni ir viens no veidiem, lai līdz 2050. gadam sasniegtu oglekļa neitralitāti emisijās.

Kā apliecina šajā nodaļā veikto pētījumu analīze, HVO degviela, ko var izmantot esošajos dīzeļmotoros faktiski bez vai ar nelielām modifikācijām, ir ar ilgtermiņa perspektīvu, īpaši tad, ja tās ražošanā tiks izmantotas izejvielas, kas samazinās degvielas pašizmaksu. HVO gandrīz nepiemīt pirmās paaudzes biodegvielu nevēlamās īpašības, kas saistītas ar to iedarbību uz dažādām degvielas sistēmas komponentēm.

Vairākos pētījumos pierādīts, ka HVO ir degvielas veids, kas ir pārāks par fosilo dīzeļdegvielu gaisa piesārņotāju (PM, HC, CO un NO_x), trokšņa un termiskās efektivitātes ziņā, kas izriet no trim galvenajām HVO ķīmiskajām īpašībām – aromātisko vielu un cikloparafīnu neesamības, mazāk izkliedētas molekulmasas un sēra un citu kvēpus veidojošo vielu niecīgā satura. Testos ar dīzeļmotoriem, kas aprīkoti ar vecāka tipa, piemēram, ar nedalīto degvielas padeves PLN jeb t.s. “sūknis – sprausla” sistēmu, HVO kopumā var pārspēt fosilo dīzeļdegvielu visos iepriekšminētajos aspektos bez jebkādam izmaiņām. Tomēr tas nav tāpat ar modernajiem dīzeļmotoriem, kas bieži uzrāda zemākas PM, HC un CO emisijas, bet labāka termiskā efektivitāte un zemākas NO_x emisijas ne vienmēr tiek garantētas dēļ sistēmu sarežģītības un tāpēc, ka šīs sistēmas, piemēram, degvielas iesmidzināšanas, EGR un turbokompresoru iestatījumi parasti ir optimizēti fosilajai dīzeļdegvielai. Tāpēc, lai pilnībā izmantotu HVO efektivitātes priekšrocības, būtu jāizstrādā alternatīva motora vadības bloku kalibrēšana, kas piemērota HVO izmantošanai.

Izmantojot HVO kā degvielu, rodas ne tikai mazāk PM, bet arī šīs daļiņas var oksidēties cieto daļiņu filtrā DPF zemākā temperatūrā, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu. Tādējādi HVO radītās daļiņas no DPF tiek viegli izvadītas normālas braukšanas un DPF reģenerācijas laikā, dodot iespēju samazināt degvielas patēriņu. Arī dīzeļmotoru izdalīto daļiņu toksiskums, darbinot ar HVO, ir zemāks nekā FDD gadījumā. HVO trūkums, salīdzinot ar FAME, ir sliktās eļļošanas īpašības. Tāpēc nepieciešami berzes modifikatori, kurus dēvē arī par eļļošanas uzlabotājiem, un arī tos varētu iegūt no biomasas.

Analizējot pētījumu apkopojumus, tajos akcentēts, ka jāturpina pētījumi, izmantojot motorus, kas atbilst jaunākajiem emisiju standartiem vai aprīkoti ar vismaz *Common Rail* iesmidzināšanas sistēmu, bet turpmākie pētījumi ar motoriem, kas aprīkoti ar nedalīto degvielas padeves sistēmu, nav lietderīgi, jo HVO salīdzinošās priekšrocības ar šo iesmidzināšanas sistēmu jau ir diezgan acīmredzamas. Arī šādu darbu sociālā vērtība ir apšaubāma, jo šobrīd gandrīz visa dīzeļdegviela tiek patērēta motoros ar modernām iesmidzināšanas tehnoloģijām, kas degšanas īpašību ziņā ļoti atšķiras no PLN iesmidzināšanas. Ieteikts arī izstrādāt turbokompresorus ar zemākiem optimālajiem plūsmas ātrumiem, kas atbilst pētniecības motoriem, lai pētnieki, kuri izmanto šos motorus kā izmēģinājumu objektus, varētu veikt savus eksperimentus reālākos apstākļos. Uzsvērts, ka ne mazāk svarīgi ir veikt pēc iespējas vairāk pētījumu bez HVO pārdevēju līdzdalības, lai mazinātu aizdomas par interešu konfliktu tajos (Szeto, Leung, 2022).

Tā kā visas HVO priekšrocības, izmantojot HVO un fosilās dīzeļdegvielas maisījumus, netiek izmantotas, tad tiek ieteikti arī drastiski pasākumi fosilās degvielas izmantošanas pakāpeniskas pārtraukšanas gaitā, piemēram, ieviešot sarūkošas ikmēneša kvotas FDD patēriņam katram automobilim, bet papildu vajadzības pēc degvielas nodrošinot ar 100% HVO. Tomēr, ja šādu politiku nevar īstenot infrastruktūras vai administratīvu grūtību dēļ, maisījumu izmantošana joprojām tiek vērtēta pozitīvi, jo tā vismaz samazina SEG emisijas.

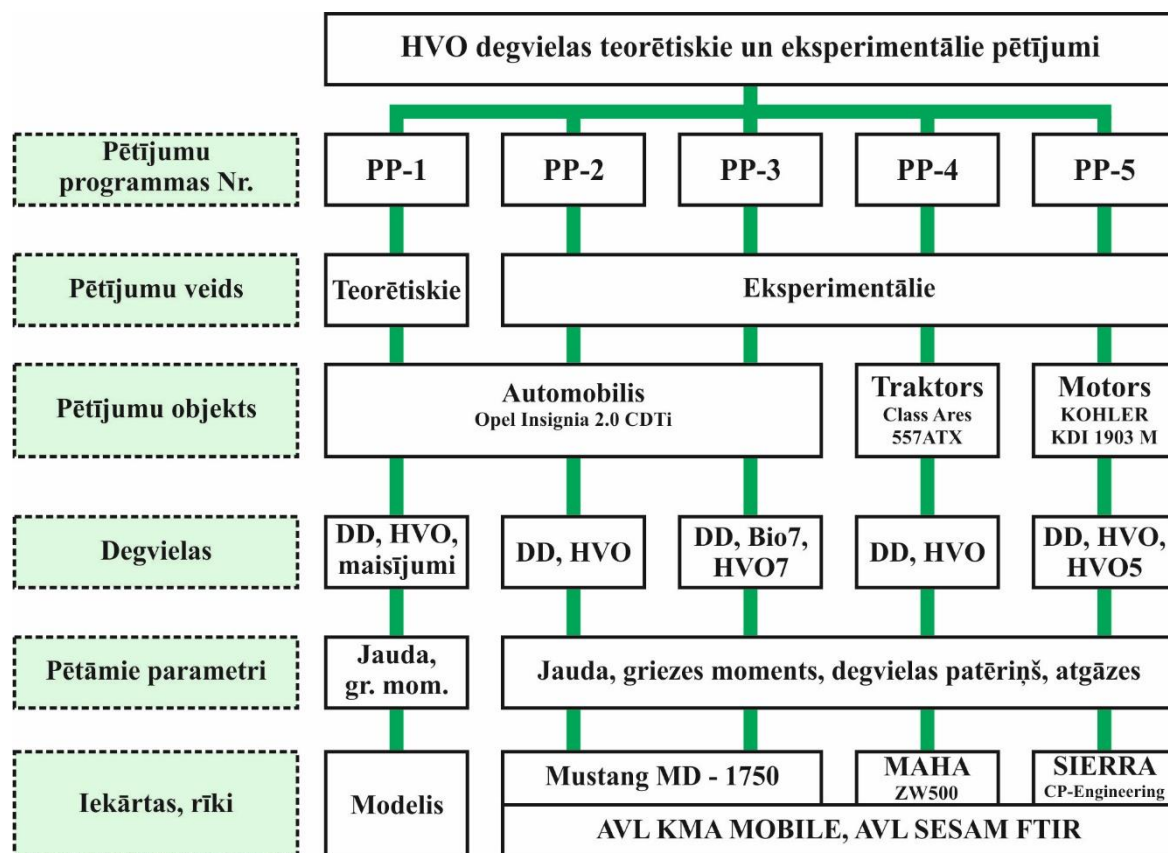
Gan šajā nodaļā veikto pētījumu analīze, gan citu autoru pārskati (No, 2014; Sonthalia, Kumar, 2019; Sunde et al., 2011) ļauj secināt, ka jaudas, degvielas patēriņa un izmešu tendences ir ļoti dažādas atkarībā no izmantotā motora veida, testa apstākļiem, izmantotajām iekārtām,

konkrēto degvielu īpašībām utt. Rezultātu atšķirības vērojamas arī atkarībā no tā, vai eksperimenti tiek veikti, izmantojot motorstendus vai spēkratus kopumā.

Tāpēc šajā promocijas darbā sagatavotas vairākas savstarpēji saistītas pētījumu programmas, kas aptver gan teorētiskos, gan eksperimentālos pētījumus, kā arī cenšoties vienu un to pašu pētāmo objektu, degvielu un iekārtu iesaistīt pēc iespējas vairākās programmās.

2. MATERIĀLI UN METODES

Teorētisko un eksperimentālo pētījumu mērķis ir noteikt ar hidrogenētu augu eļļu darbināmu spēkratu galvenos ekspluatācijas parametrus. Lai to veiktu, vispirms izstrādāta pētījumu vispārīgā blokshēma (skat. 2.1. att.).



2.1. att. Teorētisko un eksperimentālo pētījumu vispārīgā blokshēma

Pētījumi iedalīti piecās pētījumu programmās, kurām piešķirti nosacītie apzīmējumi PP-1, PP-2 utt. Blokshēmā katras programmas vertikālē redzams pētījumu veids, objekts, degvielas, pētāmie parametri, kā arī iekārtas vai rīki:

- PP-1: teorētiskie pētījumi, izstrādājot modeli ar ievadītiem automobiļa *Opel Insignia 2.0 CDTi* parametriem, iespēju izvēlēties degvielas veidu (DD – dīzeļdegvielu, HVO – hidrogenēto augu eļļu) vai veidot to maisījumus, un modelēšanas rezultātā iegūstot datus par automobiļa jaudu, griezes momentu un degvielas patēriņu;
- PP-2: eksperimentālie pētījumi, darbinot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi* uz jaudas stenda *Mustang MD – 1750* jaudas un griezes momenta noteikšanai, lietojot tīras degvielas DD un HVO, un degvielas patēriņu un atgāzu sastāvu nosakot attiecīgi ar *AVL KML MOBILE* un *AVL SESAM FTIR* iekārtām;
- PP-3: identiski eksperimentāli pētījumi programmai PP-2, bet izmantojot trīs dažādas degvielas – DD, Bio7 (dīzeļdegviela ar 7% biodīzeļdegvielas piejaukumu) un HVO7 (dīzeļdegviela ar 7% HVO piejaukumu);
- PP-4: eksperimentālie pētījumi, darbinot traktoru *Class Ares 557ATX*, lietojot tīras degvielas DD un HVO, jaudu un griezes momentu, degvielas patēriņu un atgāzu sastāvu nosakot attiecīgi ar *MAHA ZW-500*, *AVL KML MOBILE* un *AVL SESAM FTIR* iekārtām;
- PP-5: eksperimentālie pētījumi, darbinot motoru *KOHLER KDI 1903 M*, lietojot degvielas DD, HVO un HVO5, jaudu un griezes momentu, degvielas patēriņu un atgāzu sastāvu nosakot attiecīgi ar *SIERRA CP-Engineering*, *AVL KML MOBILE* un *AVL SESAM FTIR* iekārtām.

Detalizēti katrā pētījumu programmā izmantojamās iekārtas, nosakāmie ieejas un izejas parametri, testēšanas režīmi, atkārtojumu skaits, rezultātu noteikšanas veids, to apstrādes un precizitātes vērtēšanas metodes u.tml. aplūkoti turpmākajās apakšnodaļās.

2.1. Eksperimentālajos pētījumos izmantotās iekārtas un materiāli

2.1.1. Pētījumos izmantotās degvielas

Pētījumu programmās PP-2 un PP-4 izmantota tīra HVO degviela (*Neste Oil* ražotā *NExBTL*) un tīra fosilā arktiskā dīzeļdegviela FDD. *NExBTL* tika atvesta no *Neste Oil* ražotnes Somijā (skat. 2.2. att. un 1. pielikumu), bet FDD tika iegādāta SIA *Neste Latvija* degvielas uzpildes stacijā (skat. 2. pielikumu). Būtiskāko abu degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums dots 2.1. tabulā.



2.2. att. *NExBTL* degviela tarā, degvielas paraugs un ierīce laboratorijas mikroklimata parametru noteikšanai

2.1. tabula. Pētījumu programmās PP-2 un PP-4 izmantoto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums

Rādītājs	FDD	<i>NExBTL</i>
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	836.3	778.9
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	2.581	2.884
Sadulķošanās temperatūra, °C	-10	-35
CFPP temperatūra, °C	-24	-35
Zemākā masas siltumspēja, MJ kg ⁻¹	43.5	43.9
Zemākā tilpuma siltumspēja, MJ l ⁻¹	36.4	34.2
Cetānskaitlis	52.4	74.7
Sēra saturs, mg kg ⁻¹	8.9	< 1

Pētījumu programmas PP-3 uzdevums obligātā biodegvielu piejaukuma kontekstā bija izvērtēt perspektīvu pirmās paaudzes biodīzeļdegvielas piejaukumu aizvietot ar pēc tilpuma līdzvērtīgu HVO piejaukumu. Tāpēc bez tīras fosilās dīzeļdegvielas tika testēta FDD ar 7% (pēc tilpuma) biodīzeļdegvielas piejaukumu (BioDD7) un FDD ar 7% (pēc tilpuma) HVO (*Neste Oil* ražotās *NExBTL*) piejaukumu (*NExBTL*7) (skat. 2.3. att.).

Degvielu parametru noteikšana tika veikta neatkarīgās testēšanas laboratorijās. 3., 4. un 5. pielikumā doti testēšanas pārskati visiem parametriem, izņemot siltumspēju, kas savukārt tika noteikta citā laboratorijā, veicot mērījumus ne tikai trīs eksperimentos izmantotajiem degvielu paraugiem, bet arī tīrām BioDD un *NExBTL* (skat. 6. pielikumu). Būtiskāko trīs degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums dots 2.2. tabulā.



2.3. att. Pētījumu programmā PP-3 izmantoto degvielu paraugi

2.2. tabula. Pētījumu programmā PP-3 izmantoto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums

Rādītājs	FDD	BioDD7	NExBTL7
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	833.9	837.2	830.0
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	2.834	2.917	2.814
Sadūļkošanās temperatūra, °C	-5	-5	-6
CFPP temperatūra, °C	-16	-17	-17
Zemākā masas siltumspēja, MJ kg ⁻¹	43.45	42.94	43.54
Zemākā tilpuma siltumspēja*, MJ l ⁻¹	36.23	35.95	36.14
Cetānskaitlis	52.5	52.8	52.6
Sēra saturs, mg kg ⁻¹	9.9	9.9	9.8
Ūdens saturs, mg kg ⁻¹	34	55	36

* Zemākās tilpuma siltumspējas tika aprēķinātas, izmantojot zemākās masas siltumspējas un blīvumu vērtības

Tā kā pētījumu programma PP-5 uz motorstenda tika realizēta ziemas apstākļos, tad testētas trīs šajā laikā komerciāli pieejamās degvielas – 2. arktiskās klases FDD, tīra HVO (Neste My), un FDD ar 5.21% HVO piejaukumu pēc tilpuma (Pro Diesel).

Visu trīs degvielu atbilstības apliecinājumi un testēšanas pārskati, kas veikti neatkarīgā testēšanas laboratorijā, doti attiecīgi 7., 8. un 9. pielikumā, bet būtiskāko trīs degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums dots 2.3. tabulā.

2.3. tabula. Pētījumu programmā PP-5 izmantoto degvielu fizikālo īpašību salīdzinājums

Rādītājs	FDD	Neste My	Pro Diesel
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	816.1	780.8	807.4
Viskozitāte pie 40 °C, mm ² s ⁻¹	1.853	3.025	1.797
Sadūļkošanās temperatūra, °C	-28	-34	-33
CFPP temperatūra, °C	-40	-38	-42
Cetānskaitlis	53.8	74.5	55.0
Sēra saturs, mg kg ⁻¹	4.7	< 1	1.1
Ūdens saturs, mg kg ⁻¹	25	28	23

2.1.2. *Pētījumos izmantotais automobilis Opel Insignia*

Pētījumu programmās PP-1, PP-2 un PP-3 izmantots vieglais automobilis *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar četrcilindru dīzeļmotoru un *Common Rail* degvielas iesmidzināšanas sistēmu (skat. 2.4. att.).



2.4. att. Eksperimentos izmantotais automobilis *Opel Insignia 2.0 CDTi*

Automobiļa tehniskie parametri doti 2.4. tabulā.

2.4. tabula. Eksperimentos izmantotais automobilis *Opel Insignia 2.0 CDTi*

N.p.k.	Parametrs	
1.	Marka un modelis	<i>Opel Insignia 2.0 CDTi</i>
2.	Izlaiduma gads	2011
3.	Motora darba tilpums	1956 cm ³
4.	Motora maksimālā jauda pēc tehniskās specifikācijas	128 Zs (96 kW) pie 4000 min ⁻¹
5.	Motora maksimālais griezes moments pēc tehniskās specifikācijas	300 N m pie 1750 min ⁻¹
6.	Motora kods	A20DT
7.	Kompresijas pakāpe	16.5:1
8.	Ātrumkārbas pārnesumu skaits	6
9.	Automobiļa pašmasa	1503 kg

2.1.3. *Pētījumos izmantotais traktors Class Ares 557ATX*

Pētījumu programmā PP-4 izmantots traktors *Class Ares 557ATX* (skat. 2.5. att.).



2.5. att. Eksperimentos izmantotais traktors *Class Ares 557ATX*

Traktors aprīkots ar 4.5 litru 4 cilindru tiešās iesmidzināšanas turbo dīzeļmotoru (izlaiduma gads – 2007, maksimālā motora jauda – 77.5 kW pie 2100 min⁻¹, maksimālais griezes moments – 421 N m pie 1400 min⁻¹, īpatnējais degvielas patēriņš – 218 g kWh⁻¹ pie 1700 min⁻¹).

2.1.4. Jaudas stends Mustang MD – 1750

Jaudas stendu jeb šasijas dinamometru *Mustang MD-1750* (skat. 2.6. att.) izmanto, lai noteiktu automobiļa jaudas un griezes momentu, kā arī imitētu reālos braukšanas apstākļus (piemēram, veiktu dažādus braukšanas ciklus) laboratorijā, nodrošinot to parametru fiksēšanu, kurus grūti iegūt ceļizmēģinājumos. Jaudas stends tiek izmantots pētījumu programmās PP-2 un PP-3.



2.6. att. Uz jaudas stenda *Mustang MD – 1750* nostiprināts testējamais automobilis

- 1 – testējamais automobilis; 2 – šasijas dinamometrs; 3 – datorizētā vadības platforma;
4 – ventilators; 5 – stiprinājuma atsaites; 6 – degvielas mērītāja pievada šļūtenes

Stenda galvenie parametri: maksimālais braukšanas ātrums – 362 km h⁻¹, maksimālā mērīšanas jauda – 1287 kW (1750 Zs) (*MD-1750 Chassis Dynamometer*, 2004).

Trīs biežāk lietotie testu veidi uz stenda: veiktspējas pārbaude (*Power Curve*), izplūdes gāzu pārbaudes režīms (*Drivers Trace*), diagnostikas režīms (*Vehicle Simulation Test*).

Pirmajā testā nosaka automobiļa jaudas un griezes momenta raksturlielnes visā motora darba apgriezumu diapazonā. Tests ar dīzeļmotoriem darbināmiem automobiļiem tiek veikts pie ieslēgta viena nemainīga pārnesuma (parasti pie tā, kuram pārnesuma attiecība ir vistuvākā attiecībai 1:1) un maksimālās degvielas padeves.

Izplūdes gāzu pārbaudes režīmu lieto, lai noteiktu automobiļa izplūdes gāzu sastāvu un degvielas patēriņu mainīgos kustības un slodzes režīmos. Šajā režīmā izvēlas kādu no braukšanas cikliem, piemēram, IM-240, FTP vai tml.

Diagnostikas režīmā ar stenda slogotājmotora palīdzību uztur slodzi, kas atbilst reālai automobiļa masai, kā arī ceļa un gaisa pretestībai pie konkrēta kustības ātruma. Šādi parasti nosaka izplūdes gāzu sastāvu un degvielas patēriņu pie nemainīgiem kustības ātrumiem, piemēram, 50, 90 un 110 km h⁻¹.

Automobili uz stenda nostiprina ar atsaitēm, izplūdes sistēmai pieslēdz atgāzu nosūkšanas sistēmu, bet automobiļa priekšpusē novieto speciāli šim nolūkam paredzēto gaisa ventilatoru, kas pasargā motoru no pārkaršanas testu laikā.

2.1.5. Jūgvārpstas jaudas stends MAHA ZW-500

Traktora jaudu parasti nosaka no jūgvārpstas. Tāpēc pētījumu programmā PP-4 izmantots jaudas stends MAHA ZW-500 (skat. 2.7. att.).



2.7. att. MAHA ZW500 jaudas stends

Stenda galvenie parametri: maksimālie jūgvārpstas apgriezieni – 2500 min^{-1} , maksimālā mēramā jauda – 500 kW , maksimālais griezes moments – 6600 N m , mērīšanas precizitāte $\pm 2\%$ (ZW 500 Power Take-off Dynamometer, 2013).

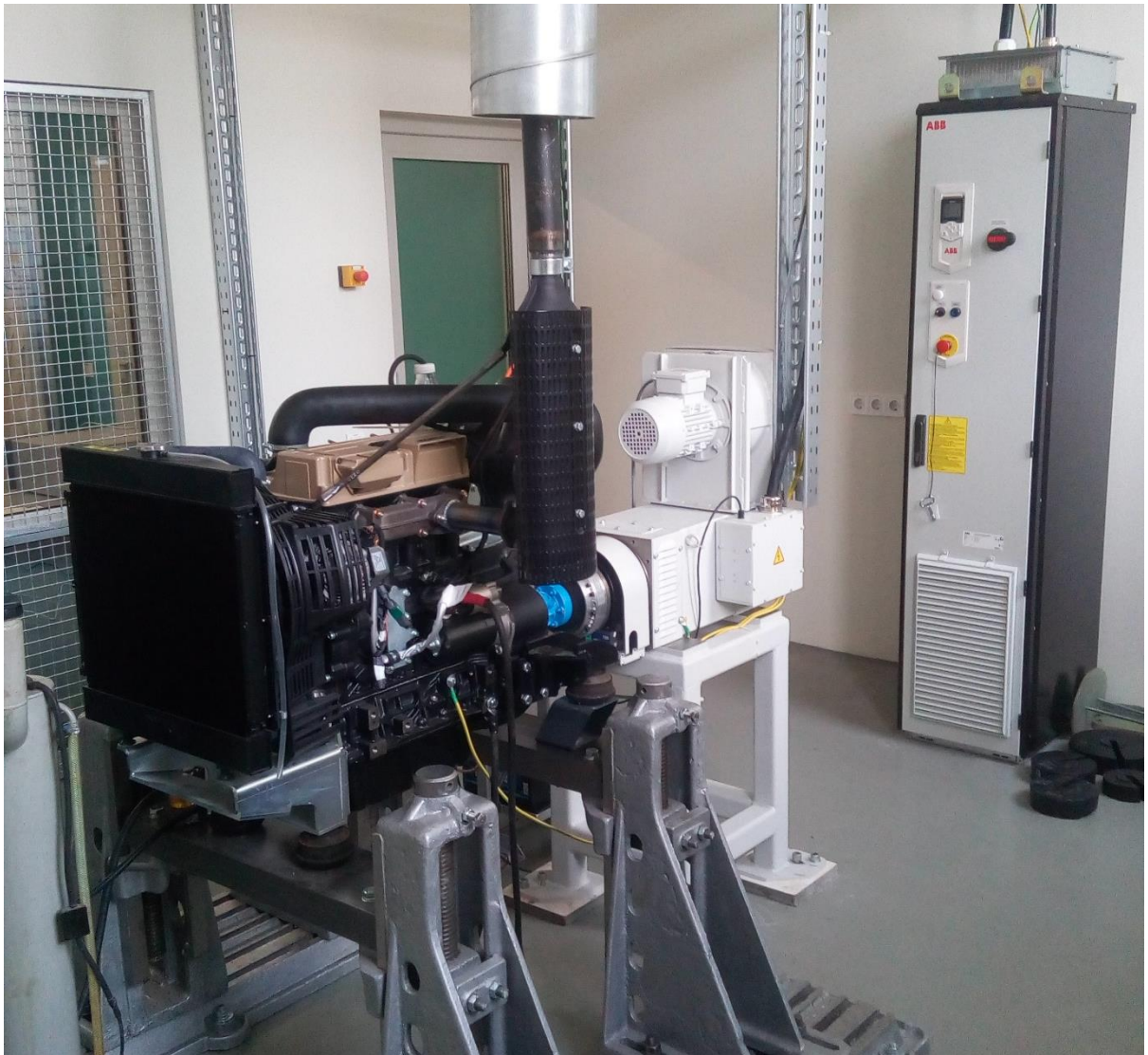
Mērīšanu var veikt divējādi – pie konstantiem jūgvārpstas apgriezieniem vai visā apgriezienu diapazonā, iepriekš sagatavojot mērīšanas programmu ar noteiktu jūgvārpstas rotācijas frekvences soli.

2.1.6. Jaudas stends SIERRA CP-Engineering un motors KOHLER KDI 1903

Pētījumu programmā PP-5 testēts pētnieciskais motors KOHLER KDI 1903, izmantojot motoru jaudas stendu SIERRA CP-Engineering (skat. 2.8. att.).

3-cilindru iekšdedzes atmosfēriskā dīzeļmotora darba tilpums ir 1861 cm^3 un maksimāli attīstāmā jauda 31 kW pie 2600 min^{-1} (KDI 1903M - KDI 2504M, 2020). Motors aprīkots ar mehānisko rotora augstspiediena sūkni, un tas atbilst EUR STAGE III A izmešu normām, kas attiecināmas uz bezceļu spēkratu motoriem, t.i., izmantošanai kompresoros, rūpnieciskās urbšanas iekārtās, iekrāvējos, buldozeros, ekskavatoros, bezceļu kravas automobiļos, sniega tīrītājos, celtņos u.tml., kā arī lauksaimniecības un mežsaimniecības traktoros.

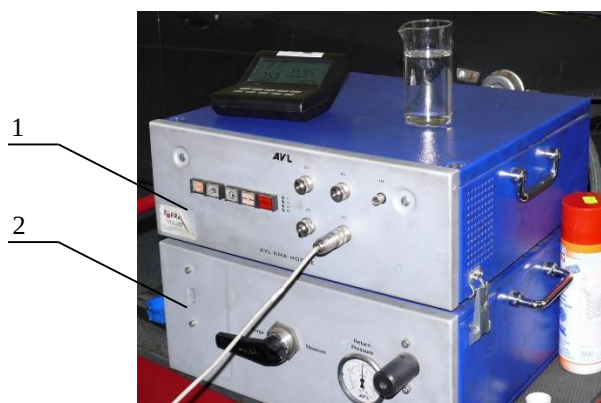
Pētnieciskais motors savienots ar motoru jaudas stendu, kura sloģošanas iekārta sastāv no maiņstrāvas dinamometra, kas var darboties gan absorbcijas, gan motora režīmā. Darbojoties absorbcijas režīmā, absorbētā enerģija tiek pārveidota elektroenerģijā un ievadīta koplietošanas elektrotīklā. Maksimālā dinamometra absorbcijas jauda ir 50 kW , maksimālie apgriezieni – 7000 min^{-1} , maksimālais absorbcijas griezes moments – 140 N m . Par sloģošanas iekārtas korektu darbību atbild ABB 4 piedziņas sistēma, kas tiek kontrolēta ar CADET vadības sistēmu (AC Dyno and CADET Compact, 2019).



2.8. att. Jaudas stends *SIERRA CP-Engineering* un motors *KOHLER KDI 1903*

2.1.7. Degvielas patēriņa mēriekārta *AVL KMA Mobile*

Degvielas patēriņa mēriekārta *AVL KMA Mobile* ir universāla ierīce, kas paredzēta mērīšanai gan laboratorijās, gan ceļa apstākļos. Tā tiek izmantota visās četrās eksperimentālo pētījumu programmās, t.i., PP-2, PP-3, PP-4 un PP-5. Mērīšanas iekārta sastāv no mērīšanas moduļa un kondicionēšanas moduļa (skat. 2.9. att.).



2.9. att. Degvielas patēriņa mēriekārta *AVL KMA Mobile*
1 – mērīšanas modulis; 2 – kondicionēšanas modulis

Pieslēgšanas veids automobilim atkarīgs no tā barošanas sistēmas specifikas. Ja barošanas sistēmā ir tikai viena degvielas maģistrāle bez atplūdes, tad degvielas patēriņa mērīšanai var izmantot tikai iekārtas mērīšanas moduli.

Tā kā vairumā mūsdienu automobiļu ir barošanas sistēmas ar degvielas atplūdi uz degvielas tvertni, tad šādos gadījumos papildus jāpieslēdz arī kondicionēšanas modulis, kas, nosakot reālo degvielas patēriņu, pieskaita arī atplūstošās degvielas daudzumu.

Iekārtas *AVL KMA Mobile* galvenie parametri (*AVL KMA Mobile Fuel Consumption Measuring System*, 2008): mērīšanas diapazons – $0.35 - 150 \text{ l h}^{-1}$, darbības temperatūra – no -10°C līdz $+50^\circ\text{C}$, mērāmās degvielas blīvums – $0.5 \dots 2.0 \text{ g cm}^{-3}$, mērīšanas kļūda – 0.1% .

2.1.8. Atgāzu analītiskā sistēma AVL SESAM FTIR

Atgāzu analītiskā sistēma *AVL SESAM FTIR* (skat. 2.10. att.) tiek izmantota visās četrās eksperimentālo pētījumu programmās, t.i., PP-2, PP-3, PP-4 un PP-5. Tā ir mēriekārta, kas paredzēta motoru izplūdes gāzu komponentu daudzuma noteikšanai dažādos darbības režīmos. Iekārtu var izmantot tikai stacionāros apstākļos.



2.10. att. Atgāzu analītiskā sistēma *AVL SESAM FTIR*

Atgāzu sastāvs tiek noteikts ar infrasarkano staru spektrometra palīdzību. Vienlaikus var noteikt 25 dažādas atgāzu komponentes, piemēram, C_2H_2 ; C_2H_4 ; C_2H_6 ; C_3H_8 ; C_4H_6 ; C_4H_8 ; CH_4 ; CO_2 ; CO ; H_2O ; N_2O ; NH_3 ; NO_2 ; NO ; SO_2 u.c. Vairākas komponentes iekārta aprēķina papildus mērītajām, piemēram, NO_x un HC. Mērīšanas intervāls ir 1 sekunde, darbības temperatūra – 10°C līdz 30°C , iekārtas dzesēšana tiek veikta ar šķidro slāpekli (*AVL SESAM FTIR User's Manual*, 2007).

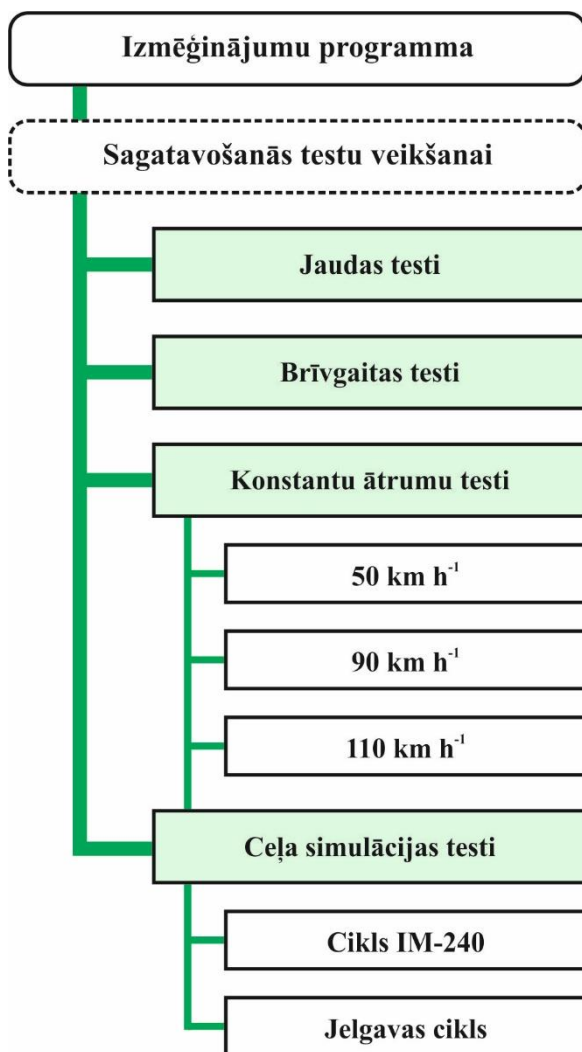
2.2. Eksperimentālo pētījumu programmu metodikas

Tā kā eksperimentālo pētījumu programmas, balstoties uz pētāmo objektu specifiku (tiek pētīts automobilis, traktors un motors uz stenda), tiek veiktas, izmantojot dažādus standus – šasijas dinamometru, jūgvārpstas jaudas standu un motorstendu, izstrādātas trīs atsevišķas pētījumu metodikas.

2.2.1. Pētījumu programmu PP-2 un PP-3 eksperimentālo pētījumu metodika

Šī metodika izstrādāta, balstoties uz LBTU ADZL līdzšinējo vairāku gadu pieredzi darbā ar dažādu degvielu, t.sk., arī biodegvielu testēšanu pētījumos, projektos un promocijas darbos (Dukulis, 2013; Pirs, 2011).

Izmēģinājumu programma izstrādāta tā, lai iegūtie rezultāti pēc iespējas tuvāk atbilstu automobiļa tipiskākajiem reālās ekspluatācijas režīmiem. Programmas shēma dota 2.11. attēlā.

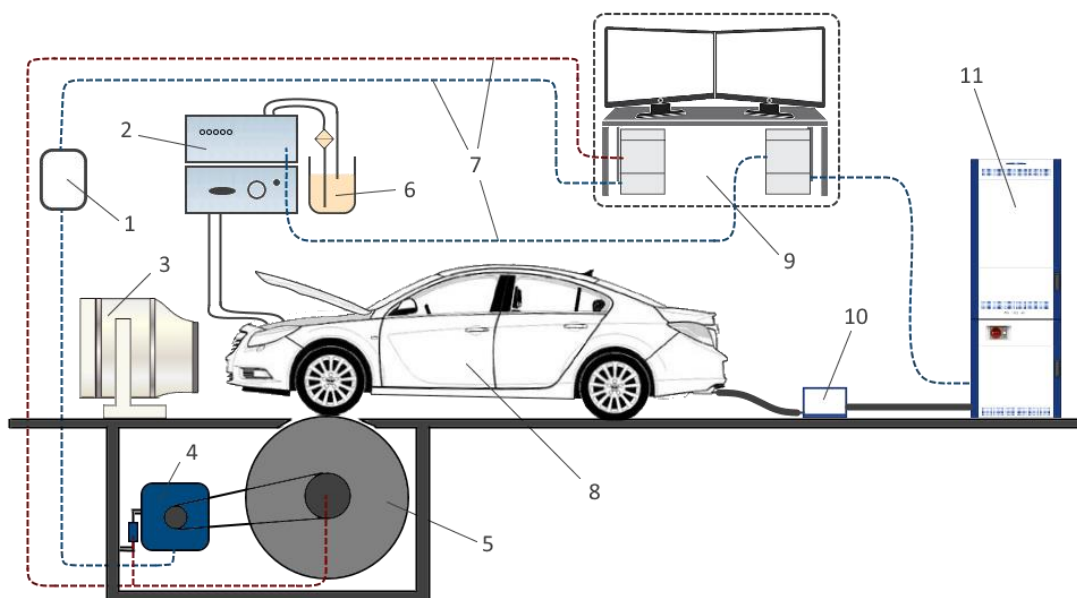


2.11. att. PP-2 un PP-3 izmēģinājumu programmas shēma

Tā kā konstantu braukšanas ātrumu un ceļa simulācijas testos vienlaikus tiek noteikts degvielas patēriņš un izplūdes gāzu sastāvs, visas iekārtas un mērierīces jāsaslēdz kopējā sistēmā (skat. 2.12. att.). Katras iekārtas vadībai un datu uzkrāšanai paredzēts atsevišķs dators.

Izmēģinājumu apstākļi

Gaisa temperatūra laboratorijā tiek uzturēta robežās no +18 °C līdz +22 °C, atgāzes tiek aizvadītas no automobiļa izplūdes sistēmas, bet motora dzesēšana tiek veikta ar papildus ventilatoru. Visu testu laikā automobilim tiek nodrošināts nemainīgs tehniskais stāvoklis.



2.12. att. Iekārtu un mērierīču izkārtojums pētījumu programmu PP-2 un PP-3 veikšanai

1 – šasijas dinamometra vadības platforma; 2 – degvielas patēriņa mēriekārta AVL KMA Mobile; 3 – ventilators; 4 – jaudas absorbcijas bloks; 5 – šasijas dinamometrs Mustang MD-1750; 6 – degvielas tvertne; 7 – datu kabeli; 8 – testējamais automobilis; 9 – datori ar speciālu programmatūru; 10 – apsildāms filtrs; 11 – daudzkomponentu izplūdes gāzu analītiskā sistēma AVL SESAM FTIR

Sagatavošanās testu veikšanai

Katra procedūra sākas ar automobiļa, iekārtu, materiālu un datorprogrammu sagatavošanu testiem. Automobilim pirms testu veikšanas pārbauda visu ekspluatācijas šķidrumu līmeņus, kā arī uzsilda to līdz normālai motora darba temperatūrai. Autobiļa barošanas sistēmai un degvielas patēriņa mēriekārtai jābūt atgaisotai un piepildītai ar konkrētajā testā izmantoto degvielu. Degvielas daudzumu tvertnē nodrošina tādā apjomā, lai testa laikā tā nebūtu jāpapildina. Mainot testējamo degvielu, jānodrošina, ka iepriekšējā degviela pilnībā aizstāta ar jauno. Šim nolūkam testējamās degvielas tvertnē tā tiek nomainīta vairākas reizes.

Veicamo testu apraksts

Jaudas testu ar dīzeļmotoru darbināmiem automobiļiem veic pilnas slodzes režīmā pie pilnībā nospiesta akseleratora pedāļa pie ieslēgta viena nemainīga pārsesuma (parasti pie tā, kuram pārsesuma attiecība ir vistuvākā attiecībai 1:1). Mērīšana sākas no vidēji zemas kloķvārpstas rotācijas frekvences (dīzeļmotoriem aptuveni 1200 – 1500 min⁻¹) līdz maksimāli pieļaujamai kloķvārpstas rotācijas frekvencei konkrētajam automobilim. Gaisa un ceļa pretestības zudumus ņem vērā atbilstoši konkrētā automobiļa modelim un masai, pirms testiem stenda programmatūrā ievadot automobiļa parametrus.

Brīvgaitas testu veic 60 s, automobilim darbojoties pie stabilas brīvgaitas kloķvārpstas rotācijas frekvences.

Konstanta ātruma testu režīmi (50, 90 un 110 km h⁻¹) izvēlēti atbilstoši tipiskākajiem konstantas kustības ātrumiem Latvijas apstākļos pilsētā un ārpus tās. Pārsesuma izvēli katram no šiem režīmiem izvēlas atkarībā no testējamā automobiļa pārsesumkārbas parametriem.

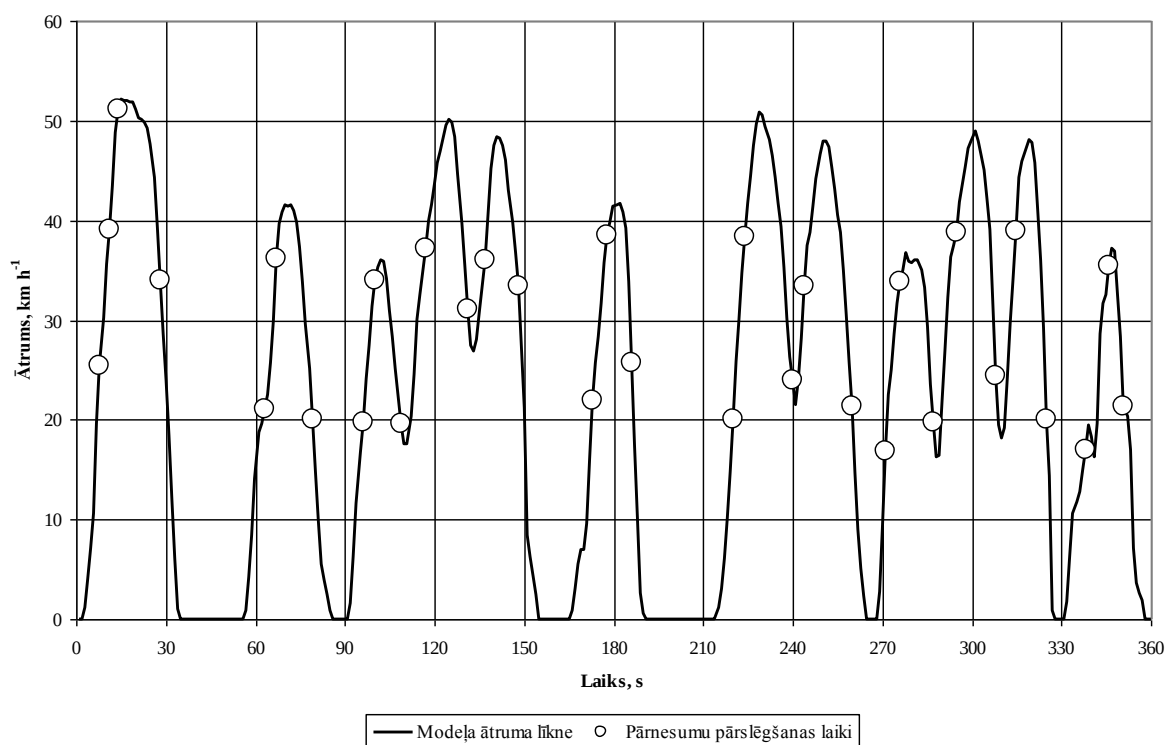
Parasti automobiļiem ar piecpakāpju pārsesumkārbu režīmu 50 km h⁻¹ veic ar ieslēgtu ceturto pārsesumu, bet 90 un 110 km h⁻¹ – ar ieslēgtu piekto pārsesumu. Automobilim ar sešpakāpju pārsesumkārbu, t.sk. testējamajam automobilim *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar ieslēgtu ceturto pārsesumu veic konstantas kustības ātruma režīmu 50 km h⁻¹, ar ieslēgtu piekto pārsesumu – 90 km h⁻¹, ar ieslēgtu sesto pārsesumu – 110 km h⁻¹.

Arī konstanta ātruma viena testa ilgums ir 60 s. Ja testa laikā ātrums mainās vairāk nekā par ±2 km h⁻¹, konkrētais atkārtojums tiek brāķēts.

Ceļa simulācijas testi imitē automobiļa kustību pa ceļu, veicot paātrināšanos, palēnināšanos, bremzēšanu, vienmērīgas kustības un brīvgaitas posmus. Šajās pētījumu programmās tiek izmantoti divi cikli – standartizētais IM-240 cikls un pašu LBTU pētnieku izstrādātais Jelgavas pilsētas cikls.

Cikla IM-240 ilgums ir 240 s, garums 3.1 km, vidējais un maksimālais braukšanas ātrums attiecīgi 47.3 un 91.2 km h⁻¹.

Jelgavas pilsētas cikls izstrādāts cita LBTU promocijas darba izstrādes laikā (Dukulis, 2013; Dukulis, Pirs, 2009) un aprobēts vairākos pētījumos un promocijas darbā (Pirs, 2011). Cikla ilgums ir 360 s, garums 2.32 km, vidējais un maksimālais braukšanas ātrums attiecīgi 23.28 un 52 km h⁻¹ (skat. 2.13. att.).



2.13. att. Jelgavas cikla ātruma līkne un pāresumu pārslēgšanas punkti

Jaudas stenda programmatūra kontrolē braukšanas ātrumu katrā cikla sekundē, un tikai tie atkārtējumi tiek uzskatīti par derīgiem, kuros netiek fiksēta neviena novirze ārpus konkrētā datu punkta ātruma pieļaujamām robežām.

Izmēģinājumos iegūto parametru vērtību ietekmējošie faktori

Iegūtos rezultātus var ietekmēt konkrētā automobiļa dažādu sistēmu darbība, piemēram, automobiļa dzesēšanas sistēmas ventilatora, izplūdes gāzu recirkulācijas sistēmas u.tml. Teorētiski ir iespējams šīs sistēmas uz laiku atslēgt, tomēr tad var tikt traucēta motora normāla darbība. Tāpēc dažādu faktoru ietekmes samazināšanai uz iegūtajiem rezultātiem strikti jāievēro pētījumu metodika un jāizvēlas pietiekams mērījumu atkārtojumu skaits.

Nepieciešamā mērījumu precizitātes un atkārtojumu skaits

Optimāls atkārtojumu skaits ir tāds, kas novērtē pētāmā parametra raksturu ar pietiekami augstu precizitāti un ticamību. Tā kā šajās pētījumu programmās izmantotās iekārtas tiek praktiski darbinātas jau vairāk nekā 10 gadus, tad personālam ir iekrāta praktiskā pieredze, veikti vairāki priekšizpētes eksperimenti, ņemta vērā katras konkrētās iekārtas precizitāte un datu ierakstīšanas biežums. Šādi noteikts viena mērījuma atkārtojuma ilgums brīvgaitas un konstanto ātrumu testiem – 60 s. Katra konkrētā mērījumu atkārtojuma rezultāts tiek noteikts, ar aprakstošās statistikas un rupjo kļūdu novēršanas metodēm apstrādājot 60 sekunžu momentānās vērtības.

Arī nepieciešamo atkārtojumu skaits noteikts priekšizpētes pētījumos. Konstatēts, ka 3 atkārtojumi ir pietiekami, lai variācijas koeficients nepārsniegtu 3%, kas liecina par mērījumu augstu precizitāti. Piebilstams, ka variācijas koeficients un līdz ar to arī standartklūdas degvielas patēriņa mērījumos ir daudz mazākas, bet atgāzu sastāva mērījumos izkļiede ir lielāka. Tā kā atgāzu komponentes ar konkrēto iekārtu tiek noteiktas miljonajās daļās no atgāzu tilpuma ppm (*parts per million*), un bieži konkrētās komponentes koncentrācija ir ļoti niecīga, tad dēļ atgāzu mērīšanas specifikas atkārtojumu skaits netiek mākslīgi palielināts, bet rezultātu ticamība tiek nodrošināta, veicot rupju kļūdu brāķēšanu datu apstrādes laikā.

Izmēģinājumu rezultātu izklāsta forma

Pēc visu testu veikšanas katrā no pētījumu programmām, darbinot automobili ar katru no degvielām, paredzēts prezentēt šādus rezultātus:

- maksimālās jaudas un griezes momenta vērtības;
- jaudas un griezes momenta raksturlīknes;
- degvielas patēriņu katrā no testiem;
- atgāzu sastāvu katrā no testiem.

Maksimālā jauda N_{max} , darbinot automobili ar katru no degvielām, tiek aprēķināta, izmantojot katra atkārtojuma i maksimālās jaudas vērtības:

$$N_{max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n N_{i\ max}, \quad (2.1)$$

kur $N_{i\ max}$ – i -tā atkārtojuma maksimālā jauda, kW;
 n – atkārtojumu skaits.

Pēc analogiskas formulas tiek aprēķināts maksimālais griezes moments M_{max} :

$$M_{max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n M_{i\ max}, \quad (2.2)$$

kur $M_{i\ max}$ – i -tā atkārtojuma maksimālais griezes moments, N m.

Jaudas un griezes momenta raksturlīknes konstruē, aprēķinot jaudas un griezes momenta vidējās vērtības pie katras no motora kloķvārpstas rotācijas frekvencēm ar soli $20\ min^{-1}$.

Konstantā ātruma testa vidējo degvielas patēriņu litros uz 100 km aprēķina, izmantojot momentāno degvielas patēriņu litros stundā, testa laiku un kustības ātrumu (Pirs, 2011):

$$Q_{(l\ uz\ 100\ km)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{v \cdot t} \cdot \sum_{i=1}^t Q_{(l \cdot h^{-1}\ mom)} \right)_i, \quad (2.3)$$

kur $Q_{(l\ uz\ 100\ km)}$ – vidējais degvielas patēriņš, l uz 100 km;
 v – kustības ātrums, km h⁻¹;
 t – viena atkārtojuma laiks, s;
 $Q_{(l \cdot h^{-1}\ mom)}$ – momentānais degvielas patēriņš, l h⁻¹.

Ceļa simulācijas testa vidējo degvielas patēriņu litros uz 100 km aprēķina pēc formulas (Pirs, 2011):

$$Q_{(l\ uz\ 100\ km)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{100 \cdot t}{3600 \cdot s} \cdot \sum_{i=1}^t Q_{(l \cdot h^{-1}\ mom)} \right)_i, \quad (2.4)$$

kur s – atkārtojuma laikā nobrauktais attālums, km.

Katras konkrētās atgāzu komponentes relatīvo daudzumu visos testos aprēķina pēc formulas (Pirs, 2011):

$$Q_{(ppm \text{ vai } \%)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^t Q_{(ppm \text{ vai } \% \text{ mom})} \right)_i, \quad (2.5)$$

kur $Q_{(ppm \text{ vai } \%)}$ – vidējais atgāzu komponentes relatīvais daudzums, ppm vai %;

$Q_{(ppm \text{ vai } \% \text{ mom})}$ – momentānais atgāzu komponentes relatīvais daudzums, ppm vai %.

Testu rezultātu uzskatāmākai atspoguļošanai to vērtības var tikt attēlotas grafiku veidā. Norādot aprēķināto lielumu iespējamo izkliedi, izmantota 95% ticamība.

2.2.2. *Pētījumu programmas PP-4 eksperimentālo pētījumu metodika*

Tā kā gan šajā pētījumu programmā, gan nākamajā tiek izmantotas tās pat degvielas patēriņa un atgāzu sastāva noteikšanas ierīces, kas pētījumu programmās PP-2 un PP-3, turklāt testi tāpat tiek veikti iekštelpās tajā pašā laboratorijā, tad vairākas darbības, kas aprakstītas 2.2.1. nodaļā, piemēram, izmēģinājumu apstākļu nodrošināšana, sagatavošanās testu veikšanai u.c., ir identiskas, tāpēc šeit netiek atkārtotas. Akcentētas tikai konkrētā pētījumu objekta un jaudas stenda lietošanas īpatnības.

Traktora jauda tiek noteikta no jūgvārpstas, izmantojot dinamometru MAHA ZW-500. Vienlaikus mēra degvielas patēriņu un izplūdes gāzu sastāva, attiecīgi izmantojot AVL KMA MOBILE degvielas patēriņa mērītāju un AVL SESAM FTIR daudzkomponentu izplūdes gāzu analītisko sistēmu (skat. 2.14. att.).



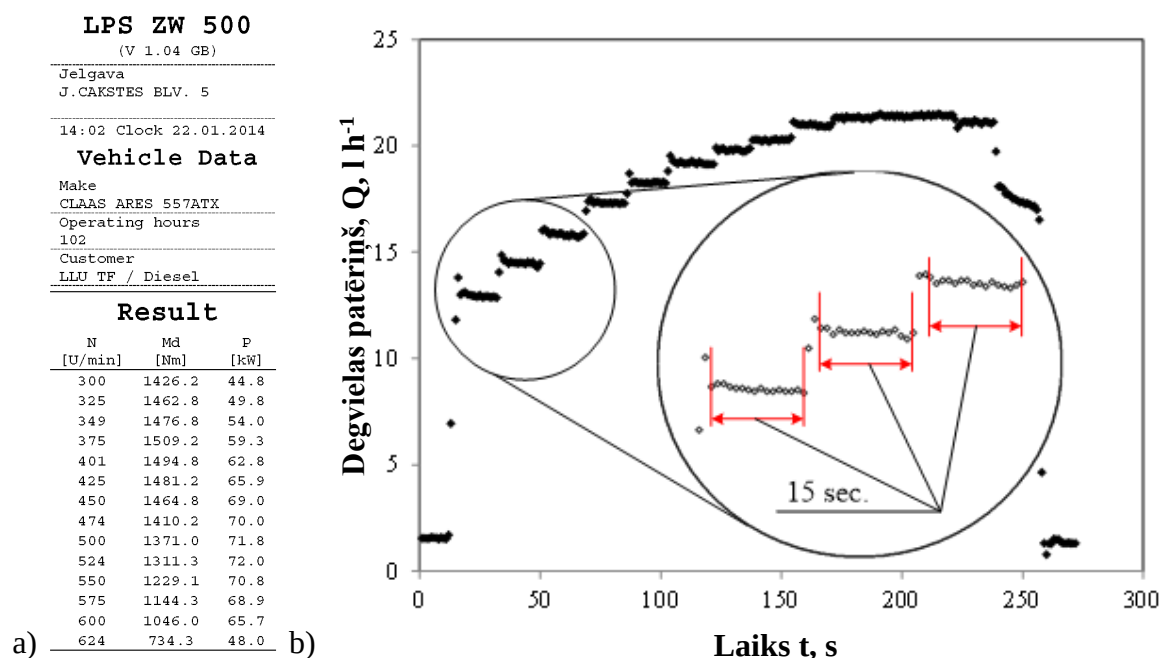
2.14. att. **Iekārtas un ierīces pētījumu programmas PP-4 veikšanai**

a – CLAAS ARES 557ATX un MAHA ZW-500; b – AVL KMA MOBILE; c – AVL SESAM FTIR

Degvielas padeve no traktora degvielas tvertnes tiek atslēgta. Tā vietā degvielas padevi nodrošina no mētrauka, kas atvieglo degvielas nomaiņas iespējas. Pēc degvielas nomaiņas veic barošanas sistēmas (degvielas sūkņu, sprauslu, filtru un cauruļvadu) skalošanu. Darbinot motoru ar jauno degvielu, degvielas atplūde jānovada atsevišķā tvertnē. Sistēmas skalošana jāveic ar vismaz 5 l jaunās degvielas.

Nemot vērā konkrētā testa objekta nominālo motora kloķvārpstas rotācijas frekvenci (2200 min^{-1}) un jūgvārpstas pārnesumu attiecību (3.67), jaudas noteikšanu paredzēts veikt pie jūgvārpstas apgriezienu diapazona no 300 līdz 625 min^{-1} ar 25 min^{-1} soli. Balstoties uz priekšizpētes rezultātiem, izturēšanas laiks katrā sloģošanas punktā iestatīts uz 15 s. Tā kā sloģošanas laikā motors ne vienmēr darbojas stabili, ar katru degvielu veic 5 atkārtojumus.

Neapstrādātu datu piemēri – izdruka no jūgvārpstas jaudas stenda *MAHA ZW-500* rokas termināļa un degvielas patēriņa grafiks – ir parādīti 2.15. attēlā.



2.15. att. Pētījumu programmas PP-4 neapstrādātu datu piemēri

a – izdruka no jūgvārpstas jaudas stenda rokas termināļa; b – degvielas patēriņa grafiks

Traktora motora kloķvārpstas rotācijas frekvenci aprēķina pēc formulas (Dukulis, 2013):

$$n = n_{jv} \cdot i, \quad (2.6)$$

kur n – traktora motora kloķvārpstas rotācijas frekvence, min^{-1} ;

i – traktora jūgvārpstas pārnese attiecība (*CLAAS ARES 557ATX* traktoram 3.67);

n_{jv} – jūgvārpstas rotācijas frekvence, min^{-1} .

Traktora motora efektīvo jaudu aprēķina pēc formulas (Dukulis, 2013):

$$N_e = \frac{N_{jv}}{\eta}, \quad (2.7)$$

kur N_e – traktora motora efektīvā jauda, kW;

η – traktora jūgvārpstas pārvada lietderības koeficients (*CLAAS ARES 557ATX* traktoram 0.95);

N_{jv} – jauda, kas mērīta no jūgvārpstas, kW.

Traktora motora griezes momentu aprēķina pēc formulas (Dukulis, 2013):

$$M_m = \frac{M_{jv}}{i \cdot \eta}, \quad (2.8)$$

kur M_m – traktora motora griezes moments, N m;

M_{jv} – griezes moments, kas mērīts no jūgvārpstas, N m.

Tā kā katra nākamā 15 s slodze pie noteiktiem jūgvārpstas apgriezieniem sākas tikai tad, kad apgriezieni kļūst stabili (apmēram pēc 3 s), lai veiktu datu analīzi, tie ir jāizgriež no neapstrādātā degvielas patēriņa datiem (skat. 2.15.b att.). Līdzīgi kā neapstrādātā degvielas patēriņa dati izskatās arī atsevišķu izplūdes gāzu komponentu mērīšanas grafiki, taču, ņemot vērā izplūdes gāzu un mērierīces specifiku, skaitlisko vērtību stabilizēšanās aizņem ilgāku laiku un ir neiespējami izgriezt 15 sekunžu datu intervālus, kā degvielas patēriņam. Tāpēc rezultātu

Degvielas patērinu aprēķina pēc formulas (Dukulis, 2013):

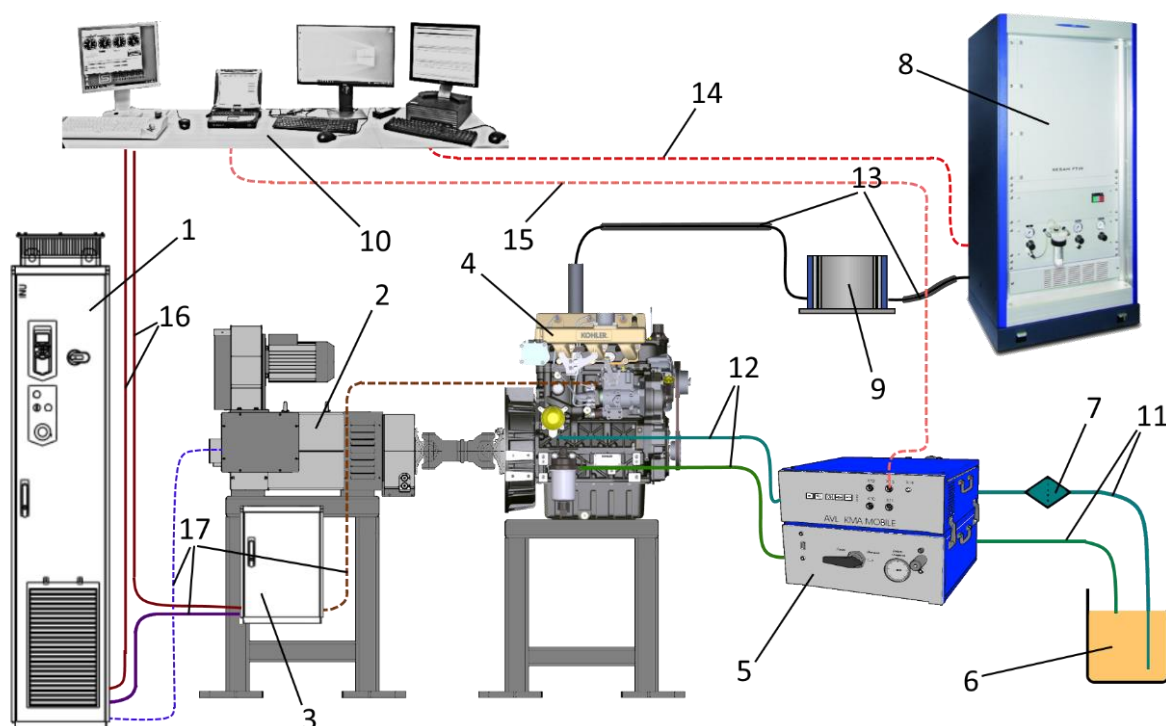
kur $Q_{(l \cdot h^{-1})}$ – degvielas patēriņš, l h⁻¹;

t – viena atkārtrojuma laiks, s;

Tā kā gan traktora dīzeļdegvielas iesmidzināšanas sistēmas, gan degvielas padeves sistēmas piegādā degvielu pēc tilpuma, īpatnējais degvielas patēriņš tiek aprēķināts nevis kā $\text{g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$, bet $\text{l kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$:

kur g_e – īpatnējais degvielas patēriņš, $\text{l kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

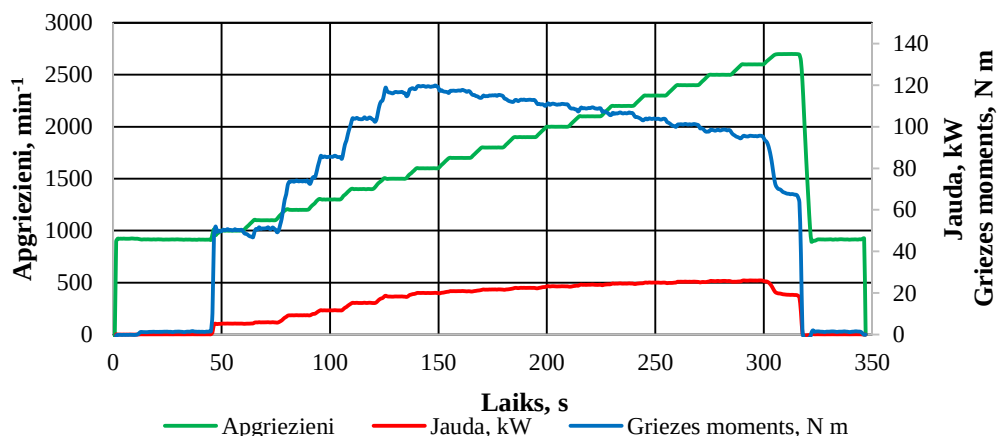
Motorstenda izmēģinājumu, t.i., pētījumu programmas PP-5 iekārtu un mērierīču izkārtojuma un slēguma shēma dota 2.16. attēlā.



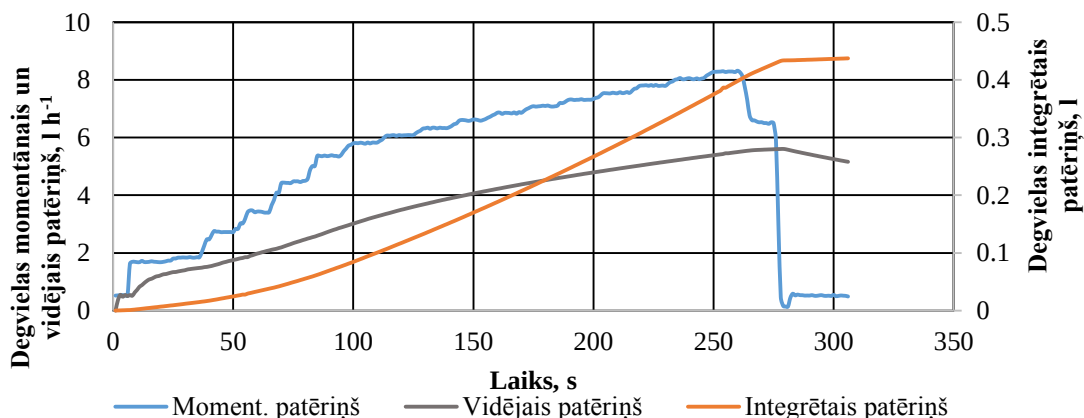
1 – reģeneratīvā piedziņa; 2 – maiņstrāvas dinamometrs; 3 – motora vadības kārbā; 4 – KOHLER motors; 5 – degvielas patēriņa mēriekārta AVL KMA Mobile; 6 – degvielas tvertne; 7 – degvielas filtrs; 8 – daudzkomponentu izplūdes gāzu analītiskā sistēma AVL SESAM FTIR; 9 – apsildāms filtrs; 10 – datori ar speciālu programmatūru; 11, 12 – degvielas cauruļvadi; 13 – izplūdes gāzu apsildes sistēma; 14, 15, 16, 17 – AVL SESAM FTIR, AVL KMA Mobile, dinamometra un motora datu kabeli.

Pētījumu programmas pamatā ir iepriekš izstrādāts sloģošanas cikls, kas nodrošina testējamā motora darbību kloķvārpstas apgriezienu diapazonā no 1000 līdz 2700 min⁻¹. Sloģošana tiek veikta ar soli 100 min⁻¹, kas konkrētajā apgriezienu diapazonā veido 18 sloģošanas soļus. Degvielas padeves svira iestatīta maksimālās degvielas padeves stāvoklī. Katra sloģošanas soļa izturēšanas laiks 10 s. Aktivizējot testu, slodzes stends automātiski notur iestatītos motora apgriezienus, vienlaikus reģistrējot motora attīstīto jaudu un griezes momentu, savukārt papildus pieslēgtās degvielas patēriņa un atgāzu sastāva mēriekārtas reģistrē attiecīgi momentānā degvielas patēriņa un izmešu sastāva datus.

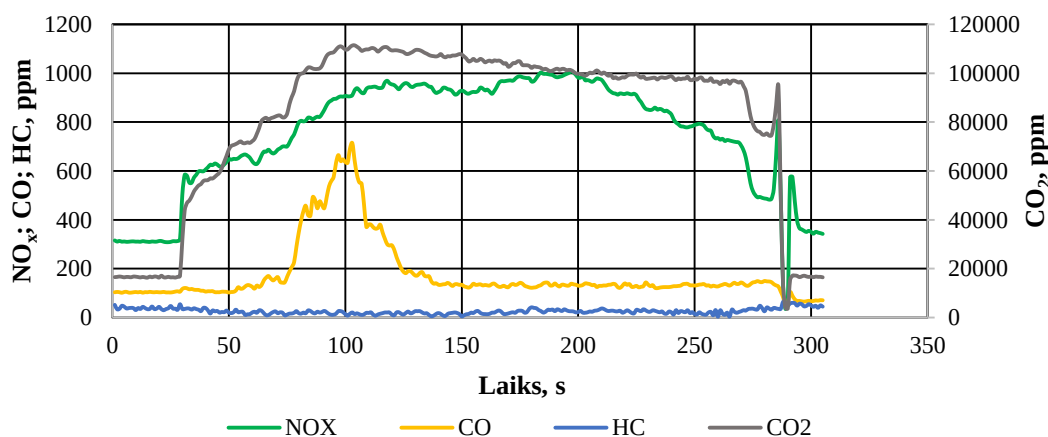
Neapstrādātu datu piemēri ir parādīti 2.17., 2.18. un 2.19. attēlā.



2.17. att. Pētījumu programmas PP-5 neapstrādātu jaudas un griezes momenta datu piemērs



2.18. att. Pētījumu programmas PP-5 neapstrādātu degvielas patēriņa datu piemērs



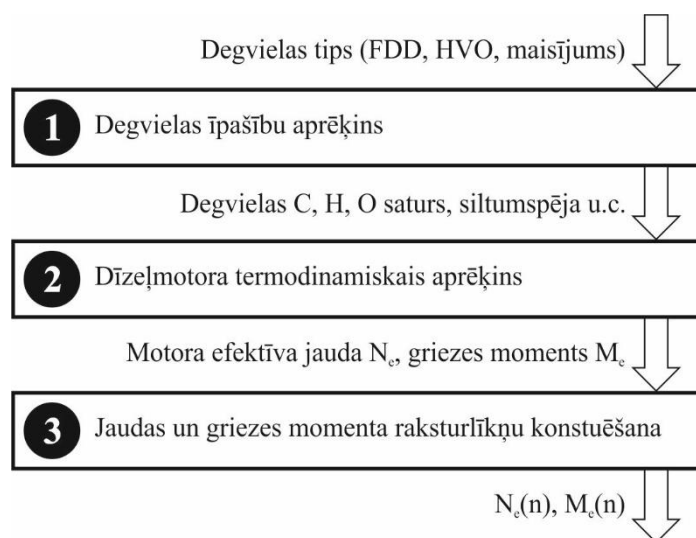
2.19. att. Pētījumu programmas PP-5 neapstrādātu izmešu datu piemērs

Ar katru no eksperimentos izmantoto degvielu veidiem tiek veikti 5 – 7 atkārtojumi. Sākotnēji no katra eksperimentu atkārtojuma tiek atlasīti katra mērījuma soļa stabilie diapazoni, t.i., aptuveni 10 s, no kā tiek aprēķinātas mērījumu soļa vidējās vērtības. Pēc datu matemātiskās apstrādes rezultāti tiek attēloti kā katra degvielas veida visu atkārtojumu vidējās vērtības.

2.3. Teorētiskā modeļa apraksts

Lai varētu veikt teorētiskos pētījumus, t.sk. dīzeļmotora darbības termodinamiskos aprēķinus, konstruētu motora efektīvās jaudas un griezes momenta līknes un aprēķinātu degvielas patēriņu, nepieciešams matemātiskais modelis. Iespējami divi risinājumi – izveidot jaunu modeli vai izmantot kādu esošu. Ja izmanto kādu tīmeklī atrodamu modeli, ir absolūti neiespējami zināt, kādas sakarības tajā ievadītas, turklāt to nevar modificēt. Ņemot vērā, ka LBTU Tehniskajā fakultātē iepriekš izstrādāti trīs ar biodegvielu pielietojumu un modelēšanu saistīti promocijas darbi – “Bioetanola izmantošana ottomotoros” (Pirs, 2011), “Rapša eļļas degvielas izmantošana dīzeļmotoros un loģistika” (Dukulis, 2013) un “Rapša eļļas degvielas izmešu sastāva normalizācija dīzeļmotoros” (Birkavs, 2014), kuros veikta modeļu izstrāde, šim nolūkam iegādājoties modelēšanas programmu *ExtendSim*, kā arī to kodi un formulas ir pieejami un modificējami, nolemts izmantot modeli, kurā veikta dīzeļmotora modelēšana (Dukulis, Birkavs, 2013), veicot pielāgošanu modeļa blokus, kur nepieciešams norādīt HVO degvielas īpašības vai izmantošanas specifiku. Tā kā oriģinālais modelis sastāv no vairākiem simtiem bloku, kur katrā no tiem ir viena vai vairākas formulas to darbināšanai, tās visas šeit nav dotas, bet pieejamas promocijas darbā “Rapša eļļas degvielas izmantošana dīzeļmotoros un loģistika” (Dukulis, 2013). Šajā darbā doti tikai attēli un formulas tiem blokiem, kuros veiktas būtiskākās izmaiņas.

Tā kā iepriekš minētais modelis ir paredzēts, lai novērtētu rapšu eļļas izmantošanu dīzeļmotoros, pirmais modulis, kas aprēķina degvielas īpašības, piemēram, oglekļa (C), ūdeņraža (H) un skābekļa (O) saturu degvielas maisījumā, degvielas siltumspēju u.c. parametrus, ir būtiski jāpārveido. Otrais modulis veic motora darbības termodinamisko aprēķinu, bet trešais – konstruē motora efektīvās jaudas un griezes momenta līknes (skat. 2.20. att.). Pēdējiem diviem moduļiem nav nepieciešamas būtiskas izmaiņas.



2.20. att. **Modeļa blokshēma**

Vispārīgā gadījumā degvielas zemāko siltumspēju Q_z (kJ kg⁻¹) aprēķina pēc formulas:

$$Q_z = (33.91 \cdot C + 103.01 \cdot H - 10.89 \cdot O) \cdot 1000, \quad (2.11)$$

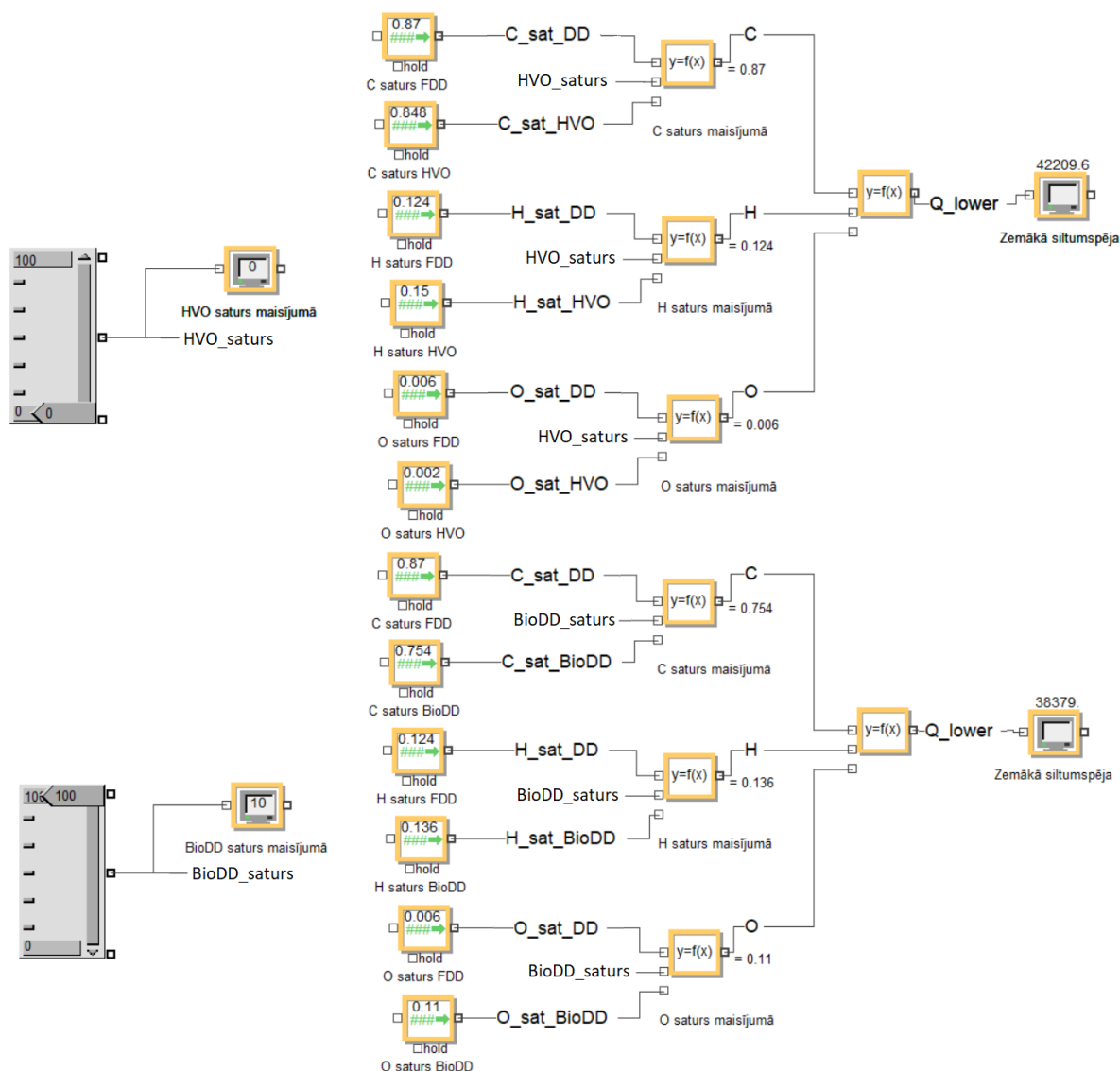
kur C – oglekļa saturs degvielā, masas daļas;
 H – ūdeņraža saturs degvielā, masas daļas;
 O – skābekļa saturs degvielā, masas daļas.

Maisījumdegvielām šos lielumus aprēķina kā vidējos svērtos (Dukulis, 2013):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_{sat-i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, H = \frac{\sum_{i=1}^n H_{sat-i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, O = \frac{\sum_{i=1}^n O_{sat-i} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (2.12)$$

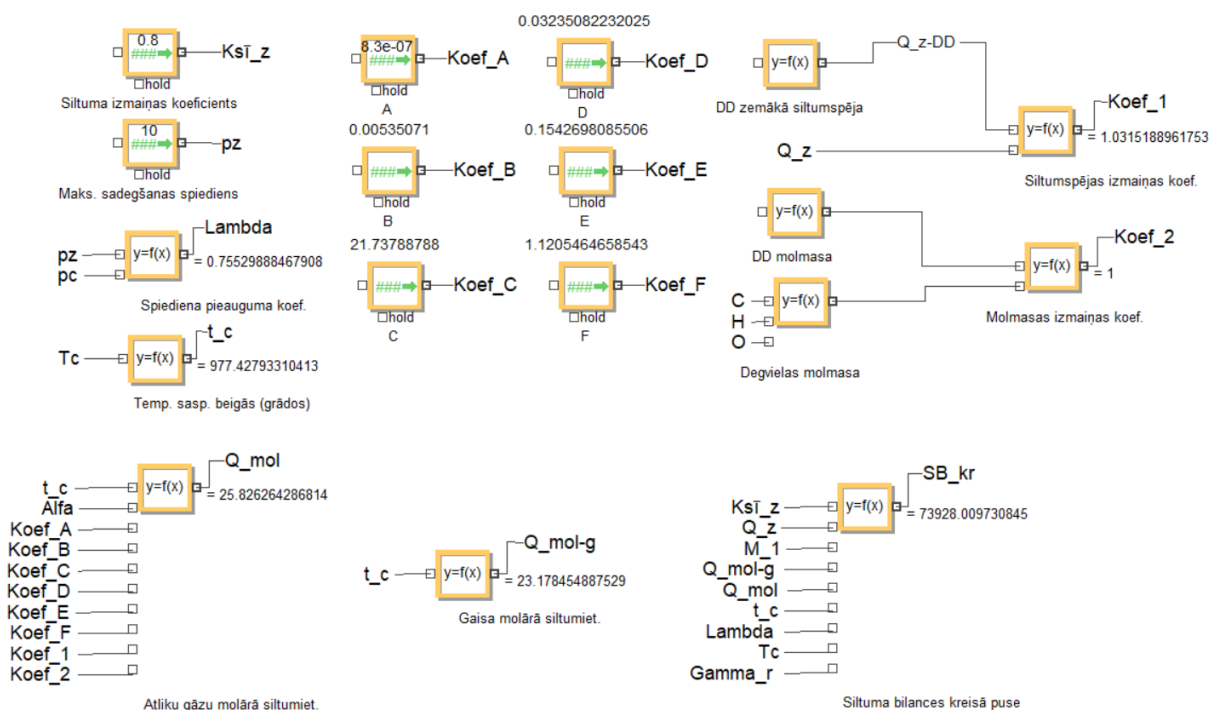
kur m_i – i -tās degvielas saturs maisījumā, masas %;
 C_{sat-i} – i -tās degvielas oglekļa saturs, masas daļas;
 H_{sat-i} – i -tās degvielas ūdeņraža saturs, masas daļas;
 O_{sat-i} – i -tās degvielas skābekļa saturs, masas daļas.

Oglekļa, ūdeņraža un skābekļa saturs fosilajā dīzeļdegvielā un biodīzeļdegvielā ir zināms jau ilgu laiku (modelēšanai tiek pieņemtas vidējās vērtības attiecīgi 0.870, 0.124 un 0.006 fosilajai dīzeļdegvielai un 0.754, 0.136 un 0.110 biodīzeļdegvielai). Tā kā HVO ir salīdzinoši jauna degviela, daudzi pētnieki visā pasaulē pēta HVO fizikāli ķīmiskās īpašības atkarībā no hidroapstrādes temperatūras un katalizatoriem. Vidējās vērtības ir – 0.848 ogleklī, 0.150 ūdeņradim un 0.002 skābeklī (Bezergianni et al., 2014; Lapuerta et al., 2011; Pinto et al., 2013). Modeļa bloki degvielas maisījuma satura un zemākās siltumspējas vērtības noteikšanai parādīti 2.21. attēlā.

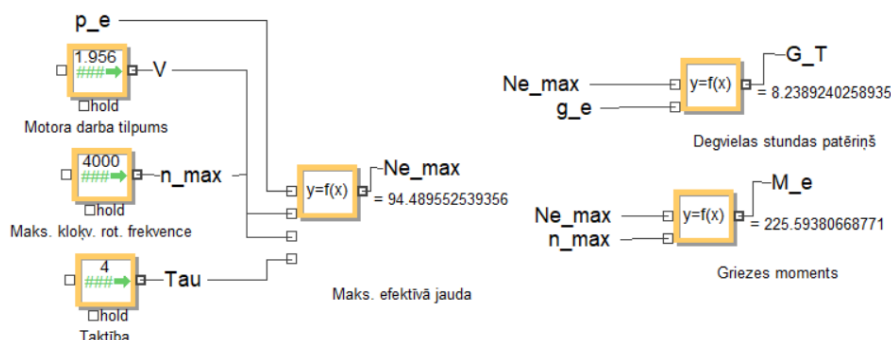


2.21. att. Modeļa bloki degvielas maisījuma satura un zemākās siltumspējas vērtības noteikšanai

Kā piemērs 2.22. attēlā parādīta modeļa daļa, kur tiek aprēķināti atsevišķi siltuma bilances vienādojuma parametri.



Modeļa otrais modulis “Dīzeļmotora termodinamiskais aprēķins” nosaka motora efektīvo jaudu un griezes momentu, pamatojoties uz visiem degvielas satura jutīgiem parametriem. Dīzeļmotora termodinamiskais aprēķins balstās uz klasiskām sakarībām, kas dotas dažādos informācijas avotos (Van Basshuysen, Schaefer, 2016; Xin, 2011), bet iepriekš izstrādātais modelis (Dukulis, 2013) papildināts ar iespēju ievadīt konkrētajam motoram raksturīgus koeficientus atkarībā no tā, vai motoram ir vai nav turbopūte, ar tiešo iesmidzināšanu vai priekšsadeģšanas kameru utt. Otrā moduļa izejas parametri ir: maksimālā efektīvā jauda N_{emax} (kW) pie motora kloķvārpstas rotācijas frekvences n_{max} (min^{-1}), degvielas patēriņš stundā G_T (kg h^{-1}) un efektīvais griezes moments M_e (N m) (skat. 2.23. att.).



2.23. att. Motora jaudas, degvielas patēriņa un griezes momenta aprēķina bloki

Ja zināma motora maksimālā efektīvā jauda $N_{e\max}$ un motora kloķvārpstas rotācijas frekvence $n_{\max}$, pie kuras šī jauda tiek sasniegta, motora jaudas līknes veidojošos punktus var aprēķināt pēc formulas (Berjoza, 2008):

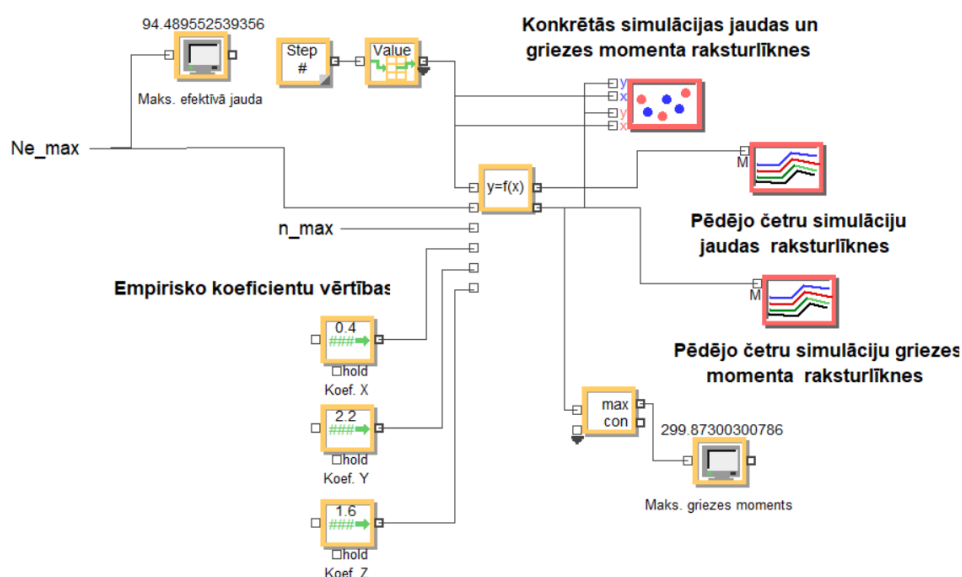
$$N_e = N_{e\max} \cdot \left[X \cdot \frac{n_e}{n_{\max}} + Y \cdot \left(\frac{n_e}{n_{\max}} \right)^2 - Z \cdot \left(\frac{n_e}{n_{\max}} \right)^3 \right], \quad (2.13)$$

kur N_e – motora efektīvā jauda pie kloķvārpstas rotācijas frekvences n_e , kW;
 n_e – motora kloķvārpstas rotācijas frekvence aprēķināmajam punktam, min^{-1} ;
 X, Y, Z – empīriskie koeficienti, kas raksturo motora tipu ($X + Y - Z = 1$).

Kad aprēķinātas maksimālās jaudas vērtības visā motora kloķvārpstas rotācijas frekvenču diapazonā, griezes momentu pie jebkuras apgriezienu n vērtības var noteikt pēc sakarības:

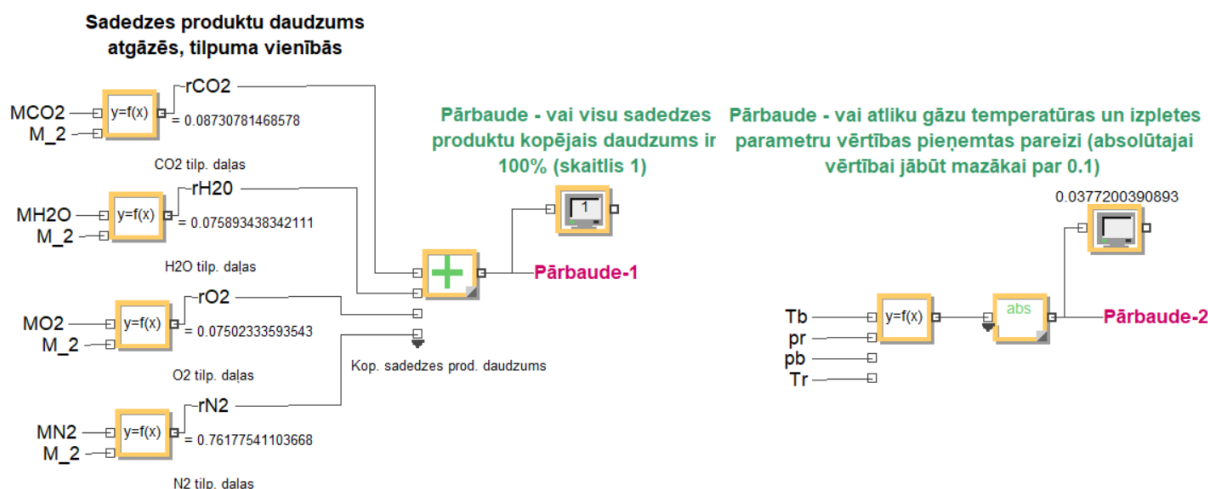
$$M_e = 9549 \cdot \frac{N_e}{n}. \quad (2.14)$$

2.24. attēlā parādīti bloki, kas konstruē jaudas un griezes momenta raksturlīknes.



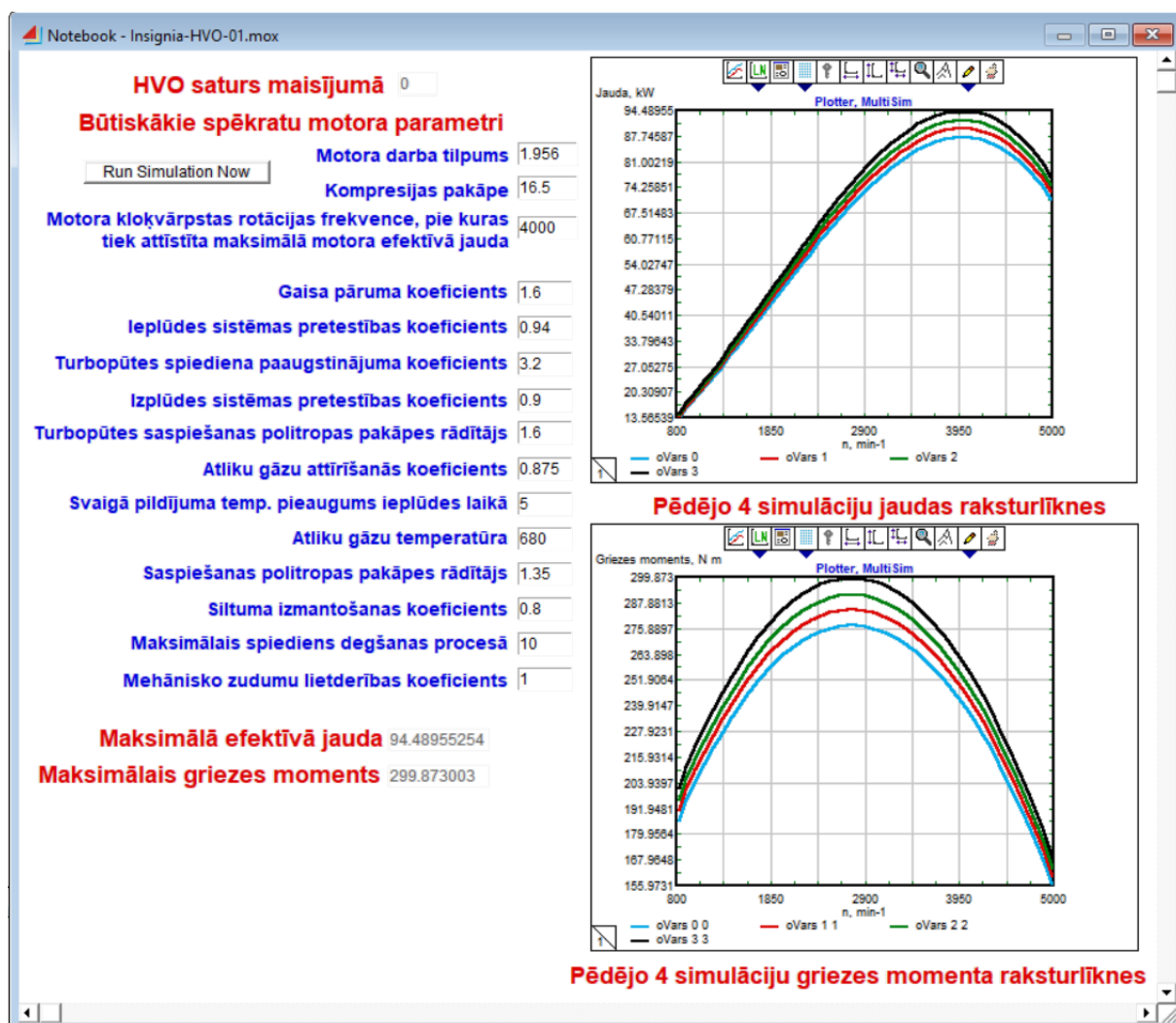
2.24. att. Modeļa bloku piemērs jaudas un griezes momenta raksturlīkņu konstruēšanai

Tā kā modelis sastāv no vairākiem simtiem bloku, kuros ievadītie parametri iespaido daudzu citu bloku vērtības, vairākās modeļa vietās izveidoti pārbaudes jeb kontroles bloki. Šādu bloku piemērs dots 2.25. attēlā.



2.25. att. Modeļa bloku piemērs aprēķinu kontrolei

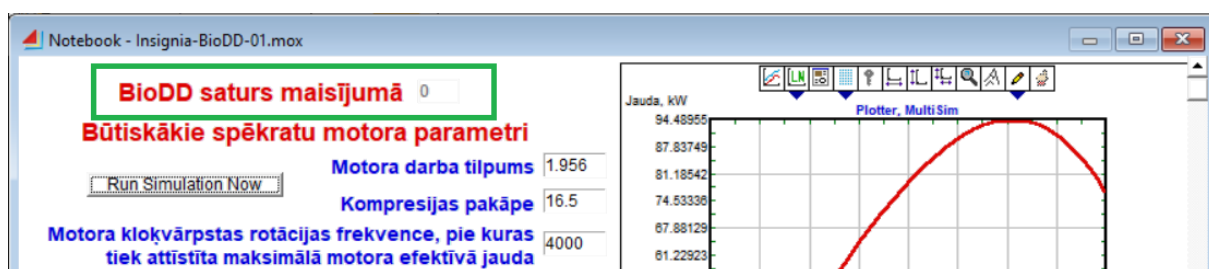
Lai motora un barošanas sistēmas parametru ievade un simulācijas rezultātu aplūkošana būtu ērtāka, izveidota ievades – izvades saskarne jeb logs (skat. 2.26. att.).



2.26. att. Modeļa mainīgo parametru ievades un simulācijas rezultātu aplūkošanas logs

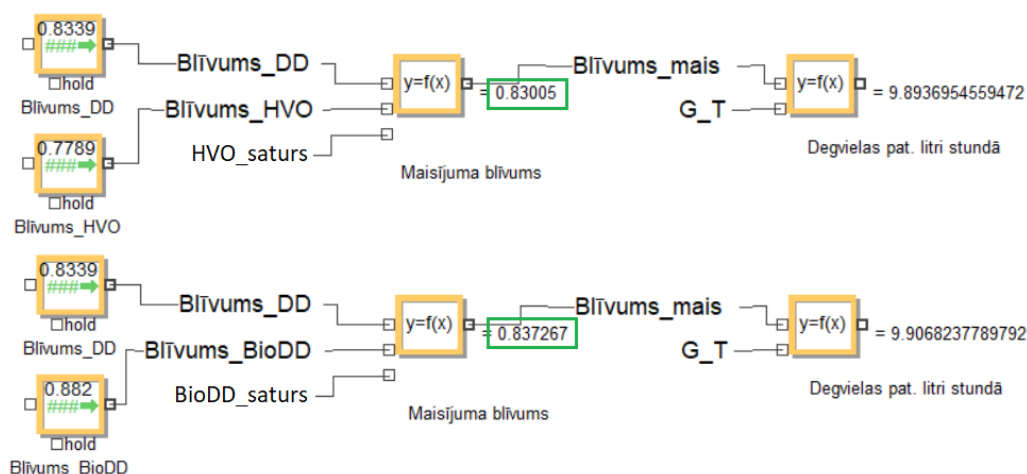
Veicot testa simulācijas (tajās netika ņemts vērā transmisijas lietderības koeficients, lai iegūtos motora datus varētu salīdzināt ar ražotāja tehnisko specifikāciju), maksimālā motora jauda 94.49 kW automobilim *Opel Insignia 2.0 CDTi*, izmantojot dīzeļdegvielu, tiek sasniegta pie 4000 min⁻¹, bet maksimālais attīstītais griezes moments ir 299.87 N m. Salīdzinot iegūtās modelēšanas vērtības ar automobiļu ražotāja sniegtajiem datiem (attiecīgi 128 Zs vai 96 kW un 300 N m), atšķirības nepārsniedz 2%. Modelēšanas pētījumiem šāda robežvērtība ir pieļaujama un netraucē identificēt atšķirības, ekspluatējot automobili ar dažādām degvielām.

Modelējot biodīzeļdegvielas piejaukumu fosilajai dīzeļdegvielai, papildus ieviestajiem blokiem degvielas siltumspējas noteikšanai (skat. 2.21. att.), arī ievades – izvades saskarnē jānodrošina viens elements (skat. 2.27. att.).



2.27. att. Modeļa mainīgo parametru ievades un simulācijas rezultātu aplūkošanas loga fragments, modelējot BioDD piejaukumu FDD

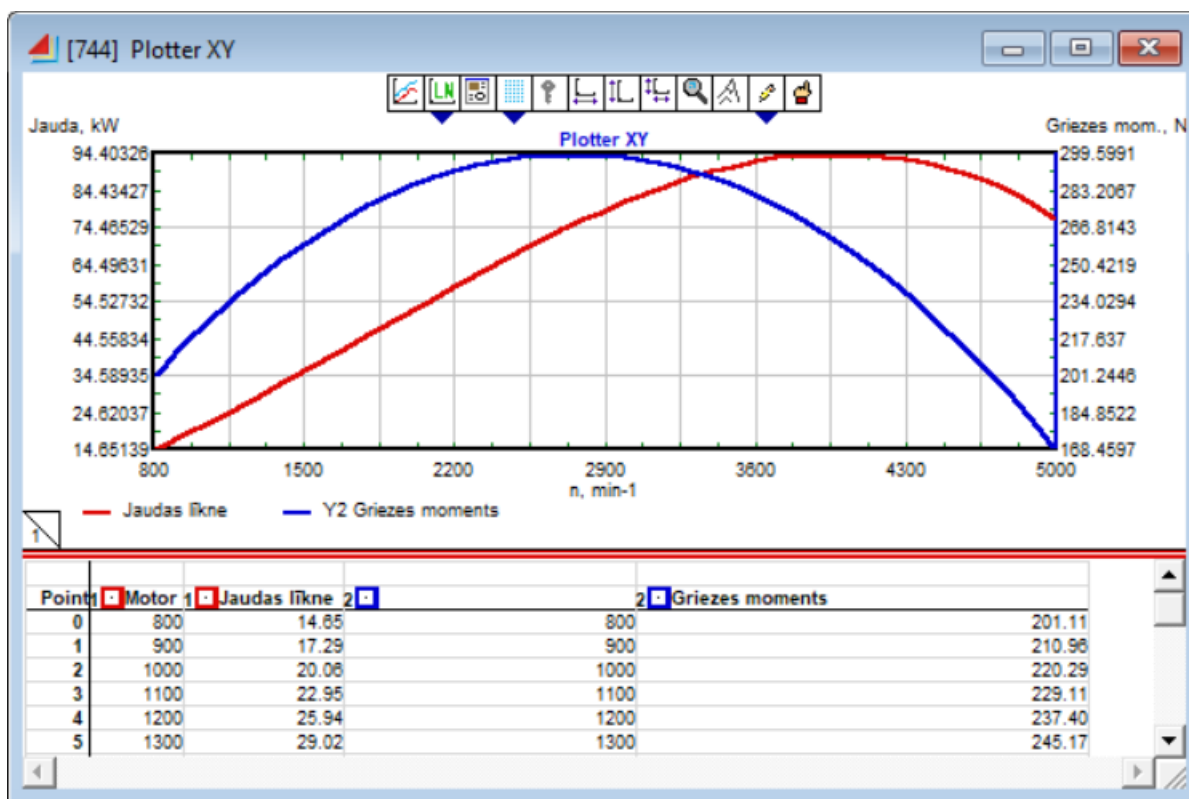
Tā kā eksperimentāli testētās degvielas ir ar atšķirīgu blīvumu, un iepriekš izstrādātais modelis degvielas patēriņu aprēķina kilogramos stundā, tad objektīvākam salīdzinājumam modelēšanas procesā izveidoti jauni bloki, kas atkarībā no maisījuma komponentu sastāva un blīvuma aprēķina gan maisījuma blīvumu, gan veic degvielas patēriņa pārrēķinu litros stundā (skat. 2.28. att.).



2.28. att. Degvielas maisījuma blīvuma un degvielas patēriņa aprēķina bloki

Veicot šo bloku testa simulācijas un salīdzinot aprēķinātos blīvumus HVO7 un BioDD7 degvielām ar datiem no 2.2. tabulas, kur eksperimentos izmantoto maisījumdegvielu blīvumi ir attiecīgi 830.0 un 837.2 kg m⁻³, var secināt, ka jaunizveidotais modulis darbojas korekti.

Ja kādam no parametriem modelēšanas laikā paredzēta detalizētāka izpēte (piemēram, jaudas un griezes momenta raksturlīkņem), aprēķināto datu izvades lauka logu var atvērt atsevišķi, dodot iespēju datu punktus iekopēt apstrādei izklājlapu lietotnē. Vienas konkrētas simulācijas jaudas un griezes momenta raksturlīkņu un tās veidojošo datu punktu vērtību piemērs dots 2.29. attēlā.



2.29. att. Konkrētas simulācijas jaudas un griezes momenta raksturlīkņu un tās veidojošo datu punktu vērtību piemērs

Modelēšanas rezultāti un to salīdzinājums ar eksperimentālajiem pētījumiem doti 3.9. un 3.10. nodaļā.

2.4. Nodaļas kopsavilkums

Izstrādātā teorētisko un eksperimentālo pētījumu vispārīgā shēma ietver piecas pētījumu programmas, aptverot dažādus pētījumu objektus (automobilis, traktors un pētnieciskais motors), vienlaikus cenšoties, ja to ļauj testējamo objektu specifika, dažādajās programmās izmantot vienas un tās pat ierīces, piemēram, degvielas patēriņa un atgāzu mērīšanai, lai pētījumu rezultātus kopumā neiespaidotu dažādu ierīču izmantošana.

Lai vēlāk varētu skaidrot iegūtos rezultātus, praktiski visām testos izmantotajām degvielām bez to ražotāju sertifikātiem veikta pilna fizikālo parametru analīze neatkarīgās sertificētās testēšanas laboratorijās.

Katrai atsevišķajai pētījumu programmai bez pētījumu objekta un iekārtu raksturojuma dota arī pētījumu veikšanas secība, izmēģinājumu apstākļu raksturojums, veikamo testu apraksts, izmēģinājumos iegūto parametru vērtību ietekmējošo faktoru analīze, nepieciešamās mērījumu precizitātes un atkārtojumu skaita pamatojums, kā arī aprakstīta izmēģinājumu rezultātu izklāsta forma.

Teorētiskā modeļa aprakstā dotas galvenās atšķirības no iepriekš izstrādātajiem modeļiem, kā arī izskaidrotas veiktās modifikācijas moduļos, formulās un parametros.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Pētījumu programma PP-2 – vieglā automobiļa testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD un HVO

Jaudas un griezes momenta mērījumu rezultāti

Automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes iegūtas, to darbinot ceturtajā pārnēsā pie pilnībā piespiesta akseleratora pedāļa. Iegūtās raksturlīknes atspoguļo automobiļa jaudu un griezes momentu uz dzenošajiem riteņiem. Neapstrādātas jaudas un griezes momenta raksturlīknes ar abām degvielām, t.i., FDD un HVO (*Neste Oil* ražoto *NExBTL*) dotas attiecīgi 10. un 11. pielikumā.

Lai visus atkārtojumus varētu savstarpēji salīdzināt, tie importēti izklājlapu lietotnē. 3.1. attēlā parādīts griezes momenta un jaudas raksturlīkņu datu apstrādes fragments.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Klokv. apgr., min ⁻¹	Griezes moments, N m				Jauda, kW				
2	Testa Nr.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.	
3	1600	190.440	199.883	198.596	196.306	29.555	30.871	30.660	30.362	
4	1620	195.336	201.951	201.330	199.539	30.606	31.498	31.405	31.170	
5	1640	198.111	208.011	207.601	204.574	31.379	32.823	32.789	32.330	
6	1660	204.685	209.693	209.598	207.992	32.817	33.418	33.415	33.217	
7	1680	206.029	215.116	214.649	211.931	33.314	34.665	34.585	34.188	
8	1700	211.073	217.065	216.236	214.791	34.415	35.371	35.114	34.967	
9	1720	213.363	221.768	221.395	218.842	35.245	36.494	36.377	36.039	
10	1740	216.215	225.661	223.299	221.725	35.982	37.563	37.088	36.878	
11	1760	221.387	228.335	227.392	225.705	37.372	38.363	38.132	37.956	
12	1780	224.117	231.903	230.030	228.683	38.158	39.448	39.046	38.884	
13	1800	228.923	234.886	232.760	232.190	39.410	40.301	39.856	39.856	
14	1820	229.725	238.653	235.819	234.732	39.940	41.424	40.886	40.750	
15	1840	233.697	239.918	238.635	237.417	41.033	42.002	41.802	41.612	
152	4580	145.135	148.180	149.817	147.711	67.912	69.313	70.117	69.114	
153	4600	142.068	145.804	147.251	145.041	66.840	68.572	69.243	68.218	
154	4620	138.678	144.246	144.897	142.607	65.594	68.178	68.470	67.414	
155	4640	137.246	141.480	142.380	140.369	65.223	67.187	67.615	66.675	
156	4660	133.545	139.574	140.069	137.729	63.809	66.625	66.835	65.756	
157	4680	132.144	136.513	137.651	135.436	63.454	65.470	66.000	64.975	
158	4700	130.588	133.824	134.800	133.071	62.978	64.510	64.969	64.152	
159										
160	1. atkārtojums	100.00%	99.89%	99.93%	99.96%	100.00%	99.95%	99.92%	99.97%	
161	2. atkārtojums	99.89%	100.00%	99.97%	99.98%	99.95%	100.00%	99.98%	99.99%	
162	3. atkārtojums	99.93%	99.97%	100.00%	99.99%	99.92%	99.98%	100.00%	99.98%	
163	vid.	99.96%	99.98%	99.99%	100.00%	99.97%	99.99%	99.98%	100.00%	
164										

3.1. att. Jaudas un griezes momenta raksturlīkņu datu tabulas fragments, darbinot automobili *Opel Insignia* ar FDD

Salīdzinot jaudas un griezes momenta vidējās vērtības ar katra atsevišķā brauciena vērtībām, griezes momenta raksturlīknēm korelācija pārsniedz 99.96%, bet jaudai – 99.97%. Šāda datu sakritība vērtējama kā ļoti augsta, līdz ar to 3 atkārtojumi jaudas un griezes momenta mērījumos ir pietiekami.

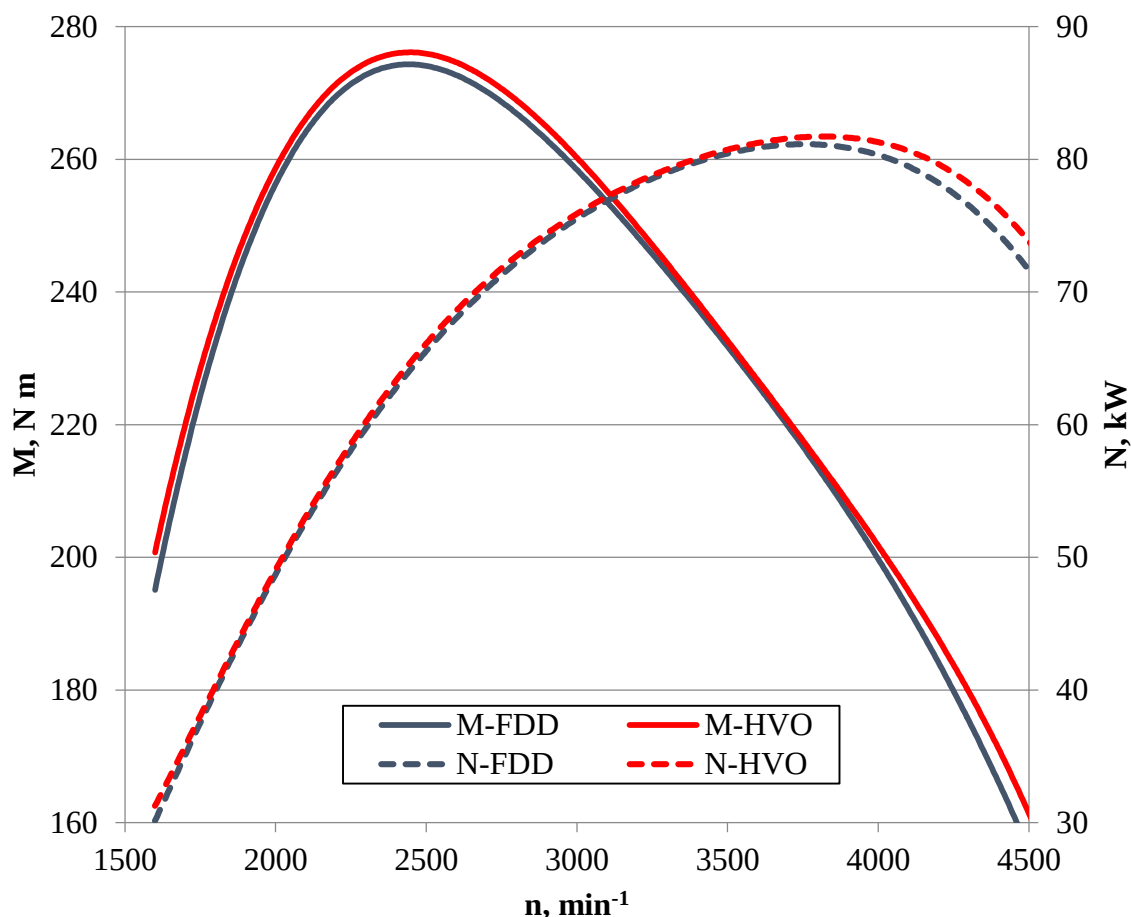
Izmantojot jaudas un griezes momenta vidējās vērtības pie konkrētajiem apgriezieniem, konstruētas jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un FDD (skat. 3.2. att.).

Eksperimentu rezultāti parāda, ka darbā ar abām degvielām automobiļa jaudas un griezes momenta raksturlīknes visā motora kloķvārpstas rotācijas frekvences diapazonā ir līdzīgas. Darbinot automobili ar HVO, vidējais jaudas un griezes momenta pieaugums, salīdzinot ar FDD, ir 1%.

Maksimālā automobiļa jauda ar HVO 82.13 kW tiek sasniegta pie 3760 min⁻¹, bet ar FDD – 81.85 kW pie 3700 min⁻¹. Maksimālās jaudas atšķirība – 0.34%. Maksimālais griezes moments ar HVO 276.85 N m tiek sasniegts pie 2400 min⁻¹, bet ar FDD – 274.49 N m pie 2360 min⁻¹. Maksimālā griezes momenta atšķirība – 0.86%. Ievērtējot iekārtas precizitāti, atšķirības uzskatāmas par nebūtiskām.

Eksperimentos izmantotā jaudas stenda specifika ļauj noteikt uz automobiļa dzenošajiem riteņiem novadīto jaudu. Šī jauda atšķiras no tās jaudas, kas tiek dota automobiļa tehniskajā specifikācijā. Tāpēc, lai varētu korekti salīdzināt eksperimentos iegūtās un tehniskajā

specifikācijā dotās maksimālās jaudas un griezes momenta vērtības, nepieciešams ievērtēt transmisijas lietderības koeficientu jeb zudumus, kas rodas automobiļa pāresumkārbā, galvenajā pārvadā, riteņu gultņos un citos saistītos mezglos. Šie zudumi dažādiem automobiļiem var būt atšķirīgi, bet to aptuvenā vērtība ir 5 – 20% pie maksimālās kloķvārpstas rotācijas frekvences. Ievērtējot transmisijas zudumus, eksperimentālajos pētījumos iegūtās jaudas un griezes momenta vērtības atbilst ražotāja tehniskajai specifikācijai.



3.2. att. Jaudas un griezes momenta raksturlieknes, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un fosilo dīzeldegvielu

Tā kā *Common Rail* degvielas sistēma izsmidzina degvielu pēc tilpuma principa, un *NExBTL* ir zemāka tilpuma siltumspēja, var sagaidīt motora maksimālā griezes momenta un jaudas samazināšanos, salīdzinot ar FDD. Tomēr šeit tā nenotiek. Lai to izskaidrotu, var pieņemt, ka maksimālās jaudas un griezes momenta testa laikā motora vadības bloks (ECU) reaģē uz vadītāja griezes momenta “pieprasījumu”, palielinot ieplūdes gaisa spiedienu, degvielas spiedienu un sprauslas atvēršanas laiku. Pie īpaši augsta degvielas spiediena (tuvu un virs 1000 bāriem), ko parasti iestata ECU, lai šādos motoros tiktu nodrošināts maksimālais griezes moments, ir jāievērtē šķidruma saspiešanas ietekme. ASV pētnieki norāda, ka parastās dīzeldegvielas un parafīna destilāta (šajā gadījumā *NExBTL*) tilpuma saspiežamības modulis ir attiecīgi 1477 un 1318 MPa pie 27.8 °C temperatūras un 6.89 MPa spiediena (Boehman et al., 2004), bet tilpuma saspiežamības moduli aprēķina pēc formulas:

$$B = (P - P_0) \cdot \frac{V_0}{V_0 - V}, \quad (3.1)$$

kur B – tilpuma saspiežamības modulis, MPa;
 P – spiediens pirms degvielas saspiešanas, MPa;
 P_0 – spiediens pēc degvielas saspiešanas, MPa;

V – sākotnējais šķidruma tilpums, mm³;
 V_0 – šķidruma tilpums pēc saspiešanas, mm³.

Jo lielāks ir saspiežamības tilpuma modulis, jo mazāks ir tilpuma samazinājums šķidruma saspiešanas laikā. Tilpuma modulis nav nemainīgs un parasti palielinās līdz ar spiedienu, jo šķidruma molekulas tiek saspiestas tuvāk viena otrai. Lai aprēķinātu abu pētīto degvielu relatīvo tilpuma samazināšanos, ja tās tiek saspiestas no 1 līdz 1000 bāriem, izmanto vienādojumu 3.1 un saspiežamības moduli (Boehman et al., 2004):

- FDD tilpums samazinās par 6.77%;
- NExBTL tilpums samazinās par 7.59%.

Konkrētās degvielas iesmidzināšanas sistēmas gadījumā faktiskais saspiestās degvielas tilpums ir nemainīgs, un degvielas masa palielinās atkarībā no šķidruma saspiežamības.

Ņemot vērā degvielu blīvumu uz zemāko masas siltumspēju, izveidots vienādojums degvielas saspiežamības novērtēšanai uz enerģijas daudzumu:

$$E = V_0 + \frac{V_0 \cdot (P - P_0)}{B} \cdot \rho \cdot LHV_m, \quad (3.2)$$

kur E – enerģijas daudzums iesmidzinātajā saspiestās degvielas tilpumā, MJ;
 ρ – degvielas blīvums, kg·mm⁻³;
 LHV_m – zemāka masas siltumspēja, MJ kg⁻¹.

Novērtējot enerģijas daudzumu sadegšanas kamerā pie 1000 bar degvielas spiediena, var secināt, ka vienādam saspiestās degvielas tilpumam degvielas enerģijas attiecība E_{NExBTL}/E_{FDD} ir 0.946 jeb vienādā saspiestās degvielas tilpumā ir par 5.37% mazāk enerģijas pie 1000 bar, salīdzinot NExBTL ar dīzeļdegvielu.

Kā redzams, tad enerģijas daudzums katrā degvielā un saspiežamības atšķirības nevar izskaidrot novērotās griezes momenta un jaudas līdzības. Izskaidrojums, kāpēc griezes momenta vai jaudas līknes ir tik tuvas šajā eksperimentā, ir turpmāka degvielas patēriņa analīze citos testos. Pretēji maksimālā griezes momenta un jaudas pārbaudei konstantos motora apgriezienos brīvgaitā un pie nemainīga braukšanas ātruma (50, 90 un 110 km h⁻¹) degvielu padod nevis konstantā tilpumā, bet pietiekamā masas plūsmā (vai enerģijas plūsmā), lai radītu nepieciešamo griezes momentu. Tas pats attiecas uz IM-240 un Jelgavas braukšanas ciklu testiem. Un visos šajos testos vērojamas atšķirības abu degvielu patēriņos.

Degvielas patēriņa mērījumu rezultāti

Visu atkārtojumu vidējais dīzeļdegvielas patēriņš brīvgaitā ir 0.499±0.003 l h⁻¹, bet HVO – 0.505±0.003 l h⁻¹. Atšķirība ir 1.02%. Ņemot vērā to, ka brīvgaitas degvielas patēriņu visvairāk iespaido dažādi testēšanas apstākļi (piemēram, motora temperatūra), šo atšķirību nevar uzskatīt par būtisku.

Tāpēc objektīvāk degvielas patēriņa izmaiņas raksturo tieši dažādie braukšanas režīmi. Visu atkārtojumu rezultātu vidējo vērtību apkopojums dots 3.1. tabulā.

3.1. tabula. **Degvielas patēriņš litros uz 100 km dažādos braukšanas režīmos, lietojot FDD un HVO degvielu**

Režīms	FDD	HVO	Atšķirība
50 km h ⁻¹	3.682	3.686	0.10%
90 km h ⁻¹	5.001	5.376	7.50%
110 km h ⁻¹	6.024	6.219	3.22%
Cikls IM-240	6.441	6.641	3.11%
Jelgavas cikls	9.397	9.954	5.93%
Vidēji:			3.97%

Abu ciklu ātruma un nobrauktā attāluma līknes dotas 12. – 15. pielikumā.

Kā redzams no 3.1. tabulas datiem, tad vidējais HVO degvielas patēriņš par aptuveni 4% pārsniedz FDD patēriņu. Lai to izskaidrotu, jāaplūko būtiskākās abu izmantoto degvielu īpašības (skat. 3.2. tabulu).

3.2. tabula. **FDD un HVO degvielas būtiskākās īpašības**

Rādītāji	FDD	HVO	Atšķirība
Blīvums pie 15 °C, kg m ⁻³	836.3	778.9	7.37%
Siltumspēja, MJ kg ⁻¹	44.0	43.9	0.23%
Siltumspēja, MJ l ⁻¹	36.8	34.2	7.61%

Kā redzams no tabulas datiem, tad abu degvielu siltumspēja MJ uz kilogramu praktiski neatšķiras, taču vairāk nekā par 7% atšķiras degvielu blīvums. Tas arī rada 7.6% atšķirību siltumspējā uz vienu litru degvielas. Ņemot vērā arī iepriekš veiktos aprēķinus, kur noskaidrots, ka vienādā saspīestās degvielas tilpumā HVO ir par 5.37% mazāk enerģijas nekā FDD, aptuveni tikpat procentus var prognozēt maksimālo degvielas patēriņa pieaugumu.

Lai novērtētu vidējo vērtību iespējamo kļūdu, izmantota vispārpieņemtā statistisko datu apstrādes metodika. Statistisko rādītāju aprēķinu piemērs, darbinot automobili ar HVO degvielu un braucot ar ātrumu 50 km h⁻¹, parādīts 3.3. tabulā.

3.3. tabula. **Degvielas patēriņa rezultātu kļūdas novērtēšanas aprēķinu piemērs**

Parametrs	Vērtība
Vidējā vērtība	3.6858
Standartkļūda	0.0073
Mediāna	3.6557
Moda	3.8150
Standartnovirze	0.1136
Amplitūda	0.5184
Minimālā vērtība	3.4400
Maksimālā vērtība	3.9584
Mērījumu punktu skaits	240
Variācijas koeficients	0.20%
Kļūda pie ticamības līmeņa 95.0%	0.0144

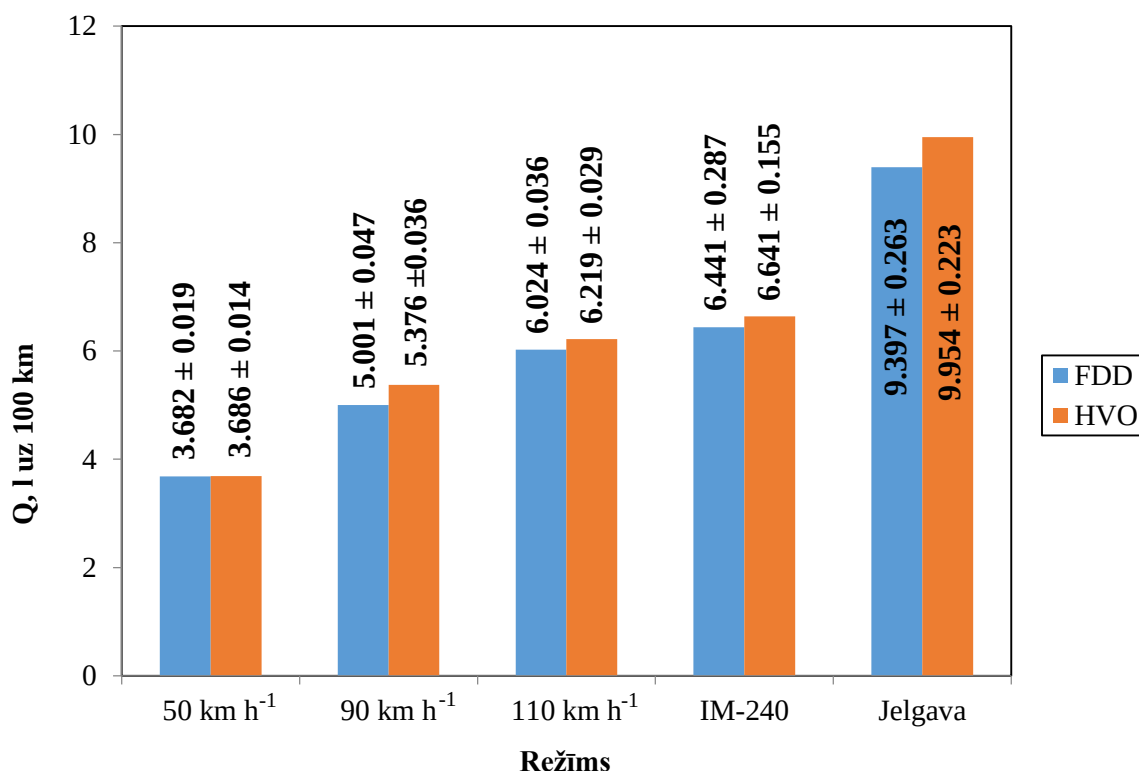
Variācijas koeficienta vērtība (0.20%) liecina, ka mērījumu precizitāte ir ļoti augsta. Aprēķinātā degvielas patēriņa kļūda pie ticamības līmeņa 95% konkrētajā aprēķinu piemērā ir aptuveni 0.014 litri uz 100 km. Tādējādi, piemēram, HVO degvielas patēriņš, braucot ar ātrumu 50 km h⁻¹, ir 3.686±0.014 litri uz 100 km. Analogiski aprēķini abām degvielām veikti visos režīmos un to rezultāti parādīti 3.3. attēlā. Identiska metodika vidējo vērtību iespējamo kļūdu novērtēšanai izmantota arī katrai izplūdes gāzu komponentei, kā arī citās pētījumu programmās visiem parametriem, kurus var uzskatīt par viena parametra atkārtotiem mērījumiem.

Kā redzams no 3.3. attēla datiem, tad HVO patēriņš, salīdzinot ar FDD, ir lielāks visos režīmos pat, ievērtējot iespējamo mērījumu kļūdu.

Kā jau tika minēts iepriekš, šis lielākais HVO degvielas patēriņš izskaidrojams ar mazāku tilpumisko siltumspēju, ko rada mazāks šīs degvielas blīvums, salīdzinot ar FDD. Tāpēc lietderīgi aplūkot, kā izskatītos 3.1. tabulā un 3.3. attēlā atspoguļotie rezultāti, ja degvielas patēriņš tiktu pārrēķināts kilogramos uz 100 km (sk. 3.4. tabulu).

HVO degvielas masas patēriņš ir par 3.2% mazāks salīdzinājumā ar dīzeļdegvielu, taču atsevišķos testa režīmos atšķirība ir statistiski nenozīmīga. Tā kā braukšanai vienmērīgā ātrumā un braukšanas ciklos ir nepieciešams līdzīgs griezes moments, izmantojot abas degvielas, var pieņemt, ka enerģijas pārveidošanas efektivitāte testējamā automobiļa motoram raksturīgos apstākļos ir augstāka parafīna sintētiskajai degvielai HVO, salīdzinot ar FDD. Tas arī izskaidro,

kāpēc pie atšķirīgā degvielas patēriņa maksimālā griezes momenta un jaudas testa braucienos griezes momenta/jaudas līknes ir tik tuvu viena otrai.



3.3. att. Degvielas patēriņš dažādos braukšanas režīmos, darbinot automobili Opel Insignia ar HVO un FDD

3.4. tabula. Degvielas patēriņš kg uz 100 km dažādos braukšanas režīmos, lietojot FDD un HVO degvielu

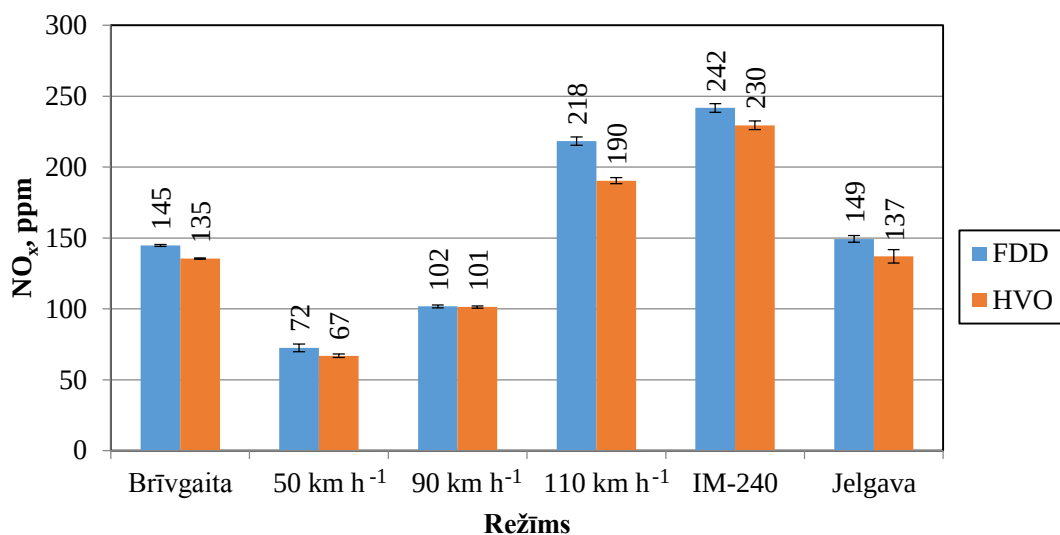
Režims	FDD	HVO	Atšķirība
50 km h ⁻¹	3.079	2.871	-6.77%
90 km h ⁻¹	4.182	4.188	0.13%
110 km h ⁻¹	5.038	4.844	-3.86%
Cikls IM-240	5.387	5.173	-3.97%
Jelgavas cikls	7.858	7.754	-1.34%
Vidēji:			-3.16%

Degvielas patēriņa atšķirību salīdzinājums ļauj secināt, ka no enerģētiskā viedokļa HVO ir līdzvērtīga degviela fosilajai dīzeļdegvielai. Tomēr, tā kā degvielas uzpildes mērvienība tomēr ir litrs, bet ne kilograms, tad ar nelielu degvielas patēriņa palielinājumu jārēķinās.

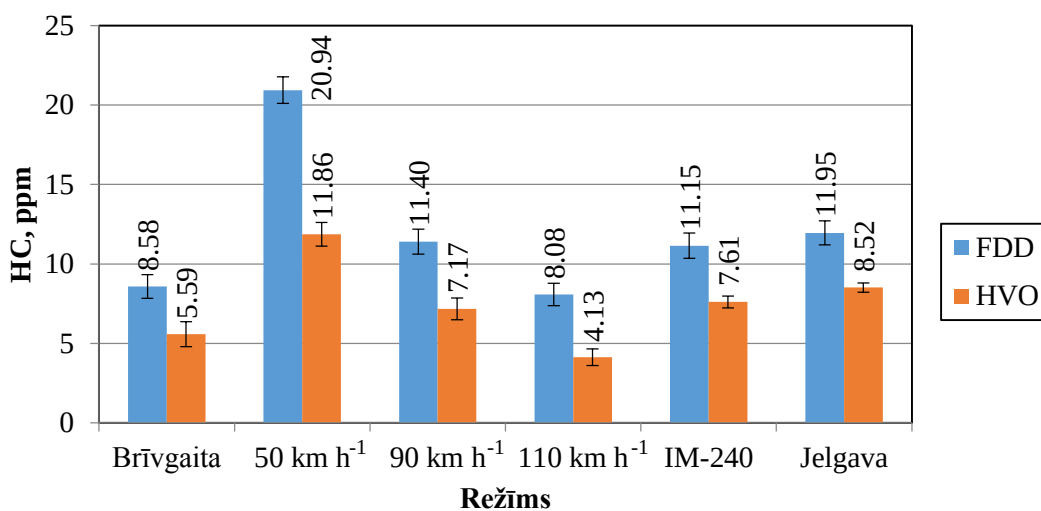
Atgāzu sastāva mērījumu rezultāti

NO_x, nesadegušo ogļūdeņražu HC, SO₂, CO₂ un CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili ar abām degvielām, dotas 3.4. līdz 3.8. attēlā. Visām atgāzu komponentēm saturs dots ppm (*parts per million*) mērvienībās (1 ppm = 0.0001%), izņemot CO₂, kur tas tiek parādīts procentos, lai nodrošinātu labāku diagrammas lasāmību. Kļūdu noteikšanai izmantota tāda pat metodika, kā degvielas patēriņam, tikai atgāzu komponentu kļūdas attēlotas nevis kā skaitliskās vērtības, bet kļūdu nogriežņi.

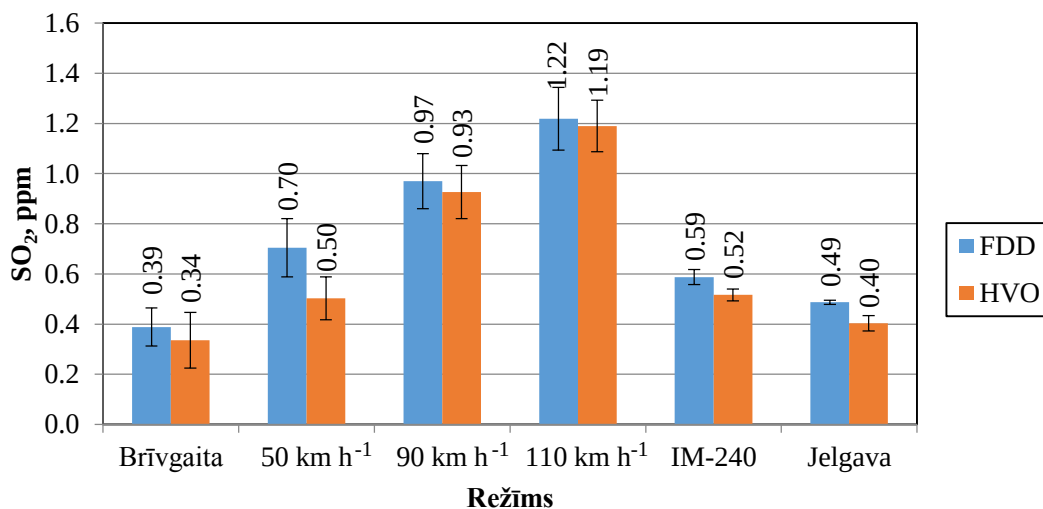
Kā jau minēts eksperimentu metodikā, tad dažādu komponentu daudzums atgāzēs ir ļoti mainīgs lielums ne tikai, salīdzinot dažādus atkārtojumus, bet arī viena atkārtojuma robežās. Jāatzīmē, ka vienas komponentes samazināšanās ar kādu no degvielas paraugiem var izraisīt citas komponentes nelielu palielinājumu, un dažādos režīmos tendences var būt atšķirīgas.



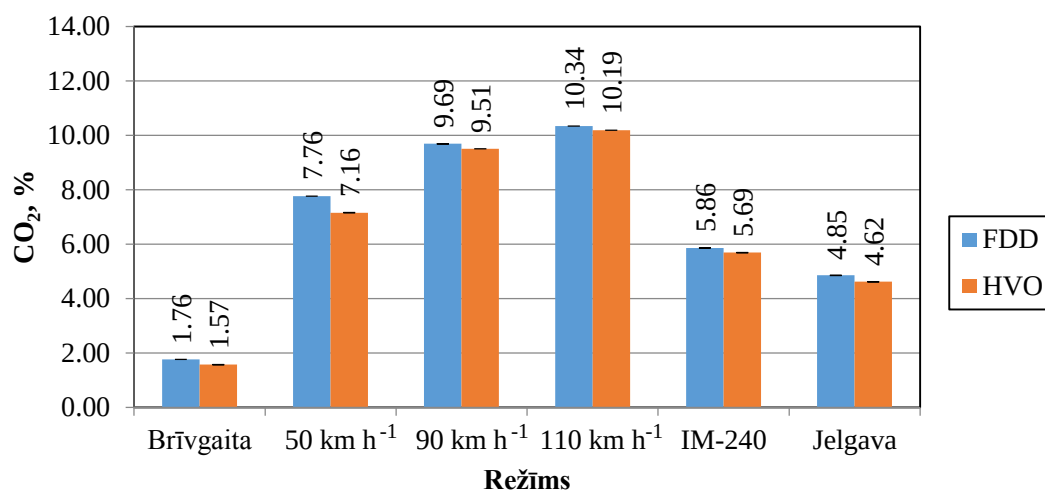
3.4. att. NO_x saturs atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un FDD



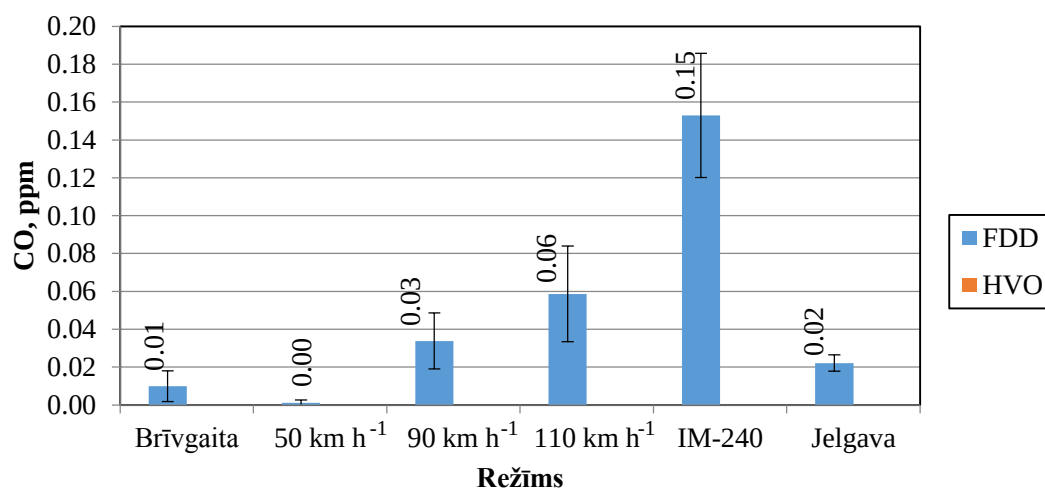
3.5. att. Nesadegušo oglekļa dioksīda saturs atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un FDD



3.6. att. SO₂ saturs atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un FDD



3.7. att. CO₂ satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un FDD



3.8. att. CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO un FDD

Šajā pētījumā visām atgāzu komponentēm, kas parasti tiek salīdzinātas dažādu degvielu pētījumos, izmantojot HVO degvielu, ir tendence samazināties, salīdzinot pret FDD. Turklāt samazinājums konstatēts visos testētajos kustības režīmos (skat. 3.5. tabulu).

3.5. tabula. Atgāzu satura komponentu samazinājums dažādos braukšanas režīmos, lietojot HVO degvielu, salīdzinot pret FDD

Komponente	Režīms						
	Brīvgaita	50 km h ⁻¹	90 km h ⁻¹	110 km h ⁻¹	Cikls IM-240	Jelgavas cikls	Vidēji
NO _x	-6.4%	-7.6%	-0.4%	-12.8%	-5.1%	-8.2%	-6.8%
HC	-34.9%	-43.4%	-37.1%	-48.9%	-31.7%	-28.8%	-37.5%
SO ₂	-13.7%	-28.6%	-4.6%	-2.4%	-12.1%	-17.2%	-13.1%
CO ₂	-11.0%	-7.8%	-1.9%	-1.5%	-3.0%	-4.8%	-5.0%
CO	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

NO_x dažādos režimos samazinājās vidēji par 6.8%, nesadegušie ogļūdeņraži – par 37.5%, SO₂ – par 13.1%, CO₂ – par 5.0%. Tvana gāzes (CO) atgāzēs, izmantojot HVO degvielu, nebija vispār. Jāpiebilst, ka arī ar fosilo dīzeļdegvielu CO daudzums atgāzēs bija niecīgs.

CO₂ koncentrācijas samazinājums skaidrojams ar to, ka ūdeņraža un oglekļa attiecība HVO degvielā ir 2.14, t.i., ievērojami augstāka, salīdzinot ar tipisko dīzeļdegvielu, t.i., 1.88 (Labeckas et al., 2017; Sugiyama et al., 2012). Pilnīgas HVO sadegšanas laikā, salīdzinot ar FDD, rodas salīdzinoši vairāk H₂O un mazāk CO₂.

HVO izmantošana FDD vietā izraisa arī SO₂ emisiju samazinājumu. Naftas produkti, piemēram, FDD, satur sēru, kas degvielas ražošanas laikā tiek atdalīts līdz attiecīgā standarta noteiktajam līmenim. Sintētiskā degviela, piemēram, HVO, kas izgatavota no bioloģiskiem resursiem, parasti satur ļoti maz sēra savienojumu. Saskaņā ar Japānas pētnieku analītiskajiem datiem, dīzeļdegvielā ir 6 ppm sēra, bet HVO parasti mazāk nekā 3 ppm (Sugiyama et al., 2012). Tas izskaidro šī pētījuma rezultātus. Mazāks sēra saturs izmešos var pagarināt izplūdes gāzu pēcapstrādes ierīču lietderīgās kalpošanas laiku. Tas var arī samazināt cieto daļiņu (PM) emisijas (Wang et al., 2009).

HVO ietekme uz NO_x emisijām šajā pētījumā bija mazāk izteikta. Vislielākais samazinājums tika konstatēts tikai lielākās slodzes apstākļos, vienmērīgi braucot ar ātrumu 110 km h⁻¹. Tā kā HVO ir augstāks cetānskaitlis nekā dīzeļdegvielai, sadegšana sākas agrāk motora darba cikla laikā. Parasti tas var radīt paaugstinātu spiedienu un temperatūru, kas var izraisīt palielinātu NO veidošanos.

Mazos un vidējos motora apgriezienos parasti tiek izmantota degvielas pilotiesmidzināšana, un to var attiecināt arī uz motoru šajā pētījumā. Degvielas cetānskaitļa pieaugums izpaužas kā īsāks aizdegšanās kavējums degvielas pilotiesmidzināšanas laikā un mazāks pēc galvenās iesmidzināšanas. Aprakstīto pilotiesmidzināšanas efektu un šķietamo siltuma izdalīšanās ātruma līkņu salīdzinājumu starp HVO un FDD snieguši Japānas pētnieki (Sugiyama et al., 2012). Saskaņā ar iekšdedzes motoru darbības pamatprincipiem (Heywood, 2018), galvenais NO rašanās avots dīzeļmotorā ir difūzijas sadegšanas fāze, kas sākas pēc pilotsadegšanas un tiek pabeigta nākamās galvenās iesmidzināšanas iepriekšējās sajaukšanās fāzē. Detalizēti NO_x satura rezultāti nav apkopoti grafikos, bet NO₂ bija aptuveni 55% un NO tikai 45% no kopējā slāpekļa oksīdu tilpuma abām pārbaudītajām degvielām. Parasti NO₂ ir jābūt no 10 līdz 30% no slāpekļa oksīdu emisijām no dīzeļmotora (Heywood, 2018). Tas nozīmē, ka šajā pētījumā slāpekļa oksīdu sastāvu izplūdes gāzēs ietekmē gāzu pēcapstrādes sistēmas.

Lietojot HVO, novērots ievērojams HC emisiju samazinājums par aptuveni 38%. Ir divi galvenie faktori, kā ogļūdeņraži var "izvairīties" no sadegšanas dīzeļmotoros – degvielas maisījums kļūst pārāk liess, lai aizdegtos iepriekšējās sajaukšanās degšanas fāzē, kas seko aizdegšanās kavējuma fāzei, un degvielas un gaisa maisījums kļūst pārāk bagāts, lai aizdegtos sajaukšanās kontrolētajā degšanas fāzē (Heywood, 2018). Tā kā HVO ir ievērojami augstāks cetānskaitlis, tas izraisa īsāku aizdegšanās kavējumu un mazāk izteiktu iepriekšējās sajaukšanās degšanas fāzi. Tas var izraisīt HC emisiju samazināšanos.

HC rezultātu aprēķina AVL SESAM FTIR gāzes analizatora programmatūra, izmantojot formulu:

$$HC = CH_4 + 2 \cdot C_2H_2 + 2 \cdot C_2H_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 7.5 \cdot C_7H_8 + 10 \cdot C_8H_{18}, \quad (3.3)$$

kur CH₄ – metāna koncentrācija;
C₂H₂ – etīna (*ethine*) koncentrācija;
C₂H₄ – etēns (*ethene*) koncentrācija;
C₂H₆ – etāna (*ethane*) koncentrācija;
C₃H₈ – propāna koncentrācija;
C₇H₈ – toluola koncentrācija;
C₈H₁₈ – n-oktāna koncentrācija.

Šim parametram ir nepieciešama padziļināta izpēte turpmākajos pētījumos, jo dažas ogļūdeņražu grupas var netikt ņemtas vērā. Turklāt jāatzīmē, ka gāzes paraugi tiek ņemti no automobiļa izplūdes caurules, un izmešu komponentu koncentrāciju būtiski maina katalītiskais neutralizators un cieto daļiņu filtrs (DPF).

Salīdzinot iegūtos rezultātus ar citiem pētījumiem, apstiprinās, kas tika minēts situācijas apskatā, t.i., dažādu parametru izmaiņu tendences atšķiras atkarībā no izmantotās degvielas īpašībām un testa objektiem. Līdzīgi kā Vācijā veiktajā pētījumā (Singer et al., 2015), HC izplūdes gāzēs samazinās, bet NO_x pieaugums netiek novērots. Salīdzinot ar Čehijā veikto pētījumu (Bortel et al., 2019), iegūti ļoti līdzīgi rezultāti CO_2 un NO_x samazinājumam, bet HC samazinājums ir aptuveni divas reizes mazāks. Degvielas patēriņa pieaugums ir ļoti līdzīgs Lietuvas pētnieku konstatētajam (Rimkus et al., 2019). HC izmaiņu tendences ir tuvas, bet NO_x un CO_2 koncentrācijas samazinājums ir mazāks. CO_2 izmaiņas ir tuvas, salīdzinot ar itāļu pētnieku datiem (Suarez-Bertoa et al., 2019), taču tur netika konstatētas būtiskas izmaiņas citās izplūdes gāzu komponentēs. Fakts, ka ar HVO netika novērota jaudas un griezes momenta samazināšanās, atbilst Japānā veiktajiem testiem (Sugiyama et al., 2012), kur konstatēts, ka HVO iesmidzināšanas daudzumam ir jābūt par 3 līdz 5% lielākam nekā FDD, taču tas neizraisa jaudas zudumus, darbinot motoru, aprīkotu ar *Common Rail* sistēmu, lai gan tīlpuma enerģijas saturs HVO degvielai ir aptuveni par 5% mazāks.

Būtiskākie pētījumu programmas PP-2 rezultāti publicēti (Sondors et al., 2021).

3.2. Pētījumu programmas PP-2 kopsavilkums

1. Eksperimentu rezultāti parāda, ka darbā ar *NexBTL* jeb HVO un fosilo dīzeļdegvielu automobiļa *Opel Insignia 2.0 CDTi* jaudas un griezes momenta raksturliķnes visā motora kloķvārpstas rotācijas frekvences diapazonā ir līdzīgas. Darbinot automobili ar HVO, vidējais jaudas un griezes momenta pieaugums, salīdzinot ar FDD, ir 1%. Maksimālā automobiļa jauda ar HVO 82.13 kW tiek sasniegta pie 3760 min^{-1} , bet ar FDD – 81.85 kW pie 3700 min^{-1} . Maksimālās jaudas atšķirība – 0.34%. Maksimālais griezes moments ar HVO 276.85 N m tiek sasniegts pie 2400 min^{-1} , bet ar FDD – 274.49 N m pie 2360 min^{-1} . Maksimālā griezes momenta atšķirība – 0.86%. Ievērtējot iekārtas precizitāti, atšķirības uzskatāmas par nebūtiskām.
2. Vidējais HVO degvielas patēriņš par aptuveni 4% pārsniedz FDD patēriņu. Tas izskaidrojams ar abu degvielu fizikālo īpašību atšķirībām. Abu degvielu siltumspēja MJ uz kilogramu praktiski neatšķiras, taču vairāk nekā par 7% atšķiras degvielu blīvums. Tas arī rada 7.6% atšķirību siltumspējā uz vienu litru degvielas. Tā kā aprēķinos noskaidrots, ka vienādā saspiešanās degvielas tīlpumā HVO ir par 5.37% mazāk enerģijas nekā FDD, aptuveni tikpat procentus var prognozēt maksimālo degvielas patēriņa pieaugumu.
3. Ja degvielas patēriņu pārrēķina kilogramos uz 100 km, var secināt, ka no enerģētiskā viedokļa *NexBTL* jeb HVO ir absolūti līdzvērtīga degviela fosilajai dīzeļdegvielai. Tomēr, tā kā degvielas uzpildes mērvienība tomēr ir litrs, nevis kilograms, tad ar nelielu degvielas patēriņa palielinājumu jārēķinās.
4. Analizējot izplūdes gāzes, visām atgāzu komponentēm, kas parasti tiek salīdzinātas dažādu degvielu pētījumos, izmantojot HVO degvielu, ir tendence samazināties, salīdzinot pret FDD. Turklāt samazinājums tika konstatēts visos testētajos kustības režīmos. NO_x dažādos režīmos samazinājās vidēji par 6.8%, HC – par 37.5%, SO_2 – par 13.1%, CO_2 – par 5.0%. Tvaika gāzes (CO) atgāzēs, izmantojot HVO degvielu, nebija vispār.
5. Eksperimentālie pētījumi, darbinot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar *NexBTL* jeb HVO, ļauj secināt, ka minētā degviela nākotnē varētu konkurēt ar fosilo dīzeļdegvielu. To apliecina gan jaudas, gan degvielas patēriņa, gan arī atgāzu sastāva mērījumi.
6. Tā kā viena konkrēta automobiļa pētījumi nedod iespēju viennozīmīgi novērtēt jebkuras degvielas izmantošanas potenciālu, turpmāk būtu lietderīgi veikt pētījumus arī ar citiem spēkratu veidiem, piemēram, traktoriem, kravas automobiļiem, vieglajiem automobiļiem ar atšķirīgām degvielas padeves sistēmām, motoriem uz sloģšanas stenda u.tml.

3.3. Pētījumu programma PP-3 – vieglā automobiļa testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD, HVO7 un BioDD7

Pētījumu programmas PP-3 uzdevums obligātā biodegvielu piejaukuma kontekstā bija izvērtēt perspektīvu pirmās paaudzes biodīzeļdegvielas piejaukumu aizvietot ar pēc tilpuma līdzvērtīgu HVO piejaukumu. Tāpēc bez tīras fosilās dīzeļdegvielas tika testēta FDD ar 7% (pēc tilpuma) biodīzeļdegvielas piejaukumu (BioDD7) un FDD ar 7% (pēc tilpuma) HVO (Neste Oil ražotās NExBTL) piejaukumu (HVO7).

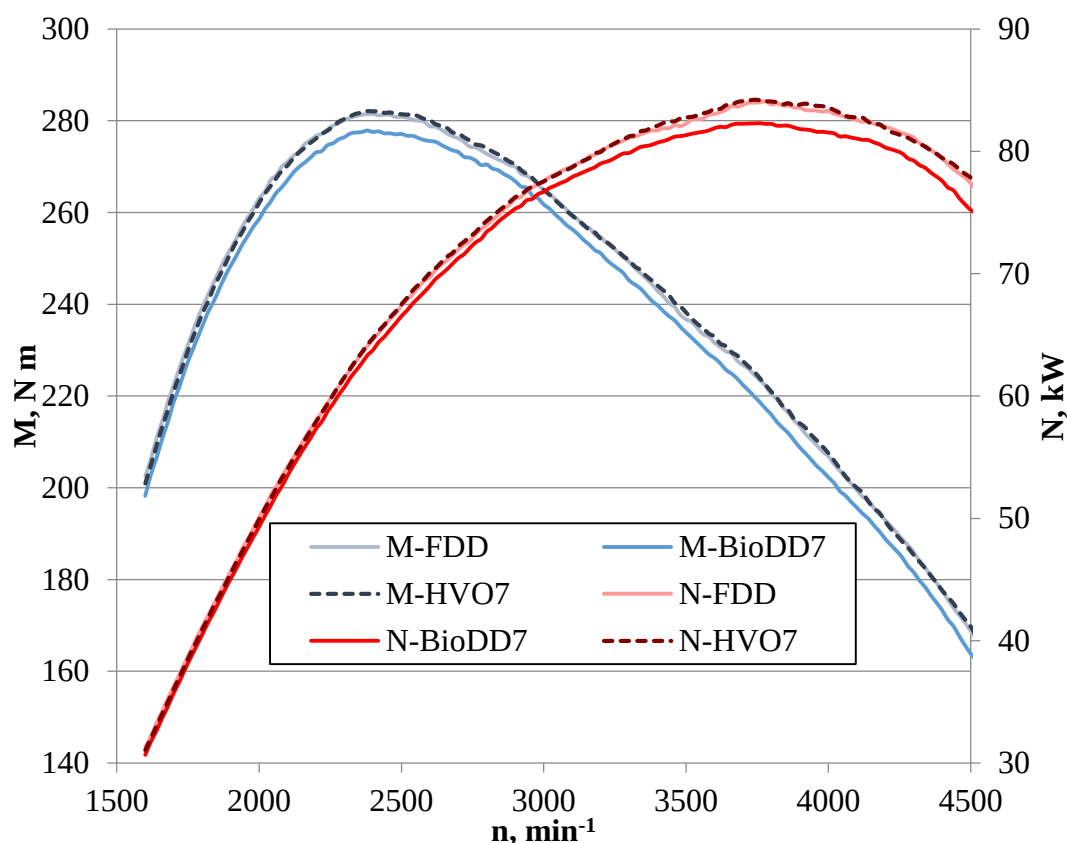
Jaudas un griezes momenta mērījumu rezultāti

Automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes iegūtas, to darbinot ceturtajā pārnēsā pie pilnībā piespiesta akseleratora pedāļa. Neapstrādātas jaudas un griezes momenta raksturlīknes ar visām degvielām dotas attiecīgi 16., 17. un 18. pielikumā.

Lai visus atkārtojumus varētu savstarpēji salīdzināt, tie importēti izklājlapu lietotnē. 19. pielikumā parādīti griezes momenta un jaudas raksturlīkņu datu apstrādes fragmenti.

Salīdzinot jaudas un griezes momenta vidējās vērtības ar katra atsevišķā brauciena vērtībām, kā arī savstarpēji atsevišķo atkārtojumu vērtības, griezes momenta raksturlīknēm korelācija pārsniedza 99.8%, bet jaudai – 99.9%. Šāda datu sakritība vērtējama kā ļoti augsta, līdz ar to 3 atkārtojumi jaudas un griezes momenta mērījumos ir pietiekami.

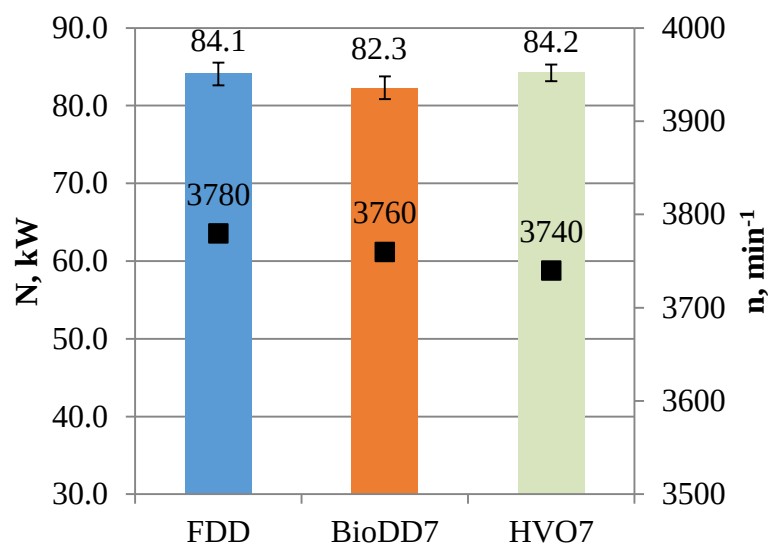
Izmantojot jaudas un griezes momenta vidējās vērtības pie konkrētajiem apgriezieniem, konstruētas jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām (tās turpmāk attēlos un tabulās apzīmētas ar FDD, BioDD7 un HVO7) (skat. 3.9. att.).



3.9. att. Jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām

Eksperimentu rezultāti parāda, ka darbā ar FDD un dīzeļdegvielu, kurai piejaukti 7% HVO degvielas, automobiļa jaudas un griezes momenta raksturlīknes visā motora kloķvārpstas rotācijas frekvences diapazonā ir līdzīgas – jaudas un griezes momenta vērtību izmaiņas nevienā no mērītajiem datu punktiem nepārsniedz 0.8%.

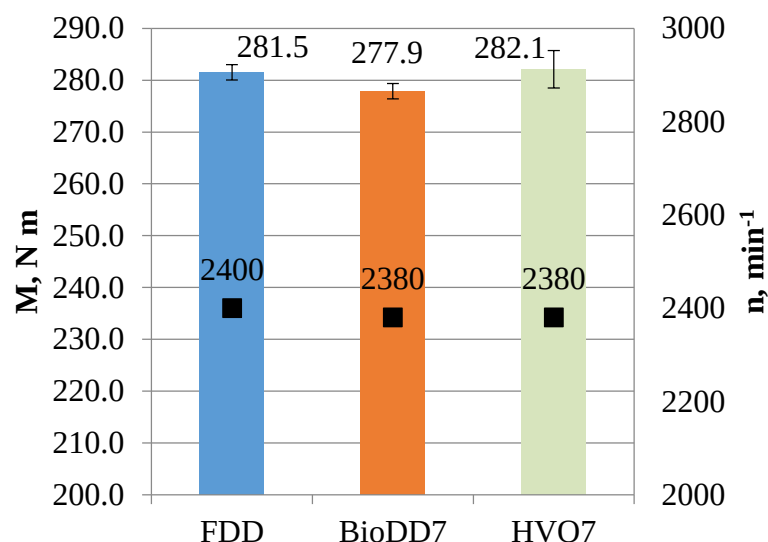
Maksimālā automobiļa jauda ar FDD 84.1 kW tiek sasniegta pie 3780 min⁻¹, ar BioDD7 – 82.3 kW pie 3760 min⁻¹, bet ar HVO7 – 84.2 kW pie 3740 min⁻¹ (skat. 3.10. att.).



3.10. att. **Maksimālās jaudas vērtības un tām atbilstošās kloķvārpstas rotācijas frekvences, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām**

Maksimālās jaudas atšķirība fosilajai dīzeļdegvielai un dīzeļdegvielai, kurai piejaukti 7% HVO degvielas, ir 0.16%, kas uzskatāma par nebūtisku. Savukārt, darbinot automobili ar dīzeļdegvielu, kurai piejaukti 7% biodīzeļdegvielas, tiek attīstīta par 2.12% mazāka maksimālā jauda, salīdzinot ar FDD, un par 2.28% mazāka jauda, salīdzinot ar HVO7 degvielu.

Maksimālais griezes moments ar FDD 281.5 N m tiek sasniegts pie 2400 min⁻¹, ar BioDD7 – 277.9 N m pie 2380 min⁻¹, bet ar HVO7 – 282.1 N m pie 2380 min⁻¹ (skat. 3.11. att.).



3.11. att. **Maksimālā griezes momenta vērtības un tām atbilstošās kloķvārpstas rotācijas frekvences, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām**

Maksimālās griezes momenta atšķirība fosilajai dīzeļdegvielai un dīzeļdegvielai, kurai piejaukti 7% HVO degvielas, ir 0.20%, kas uzskatāma par nebūtisku. Savukārt, darbinot automobili ar dīzeļdegvielu, kurai piejaukti 7% biodīzeļdegvielas, tiek attīstīts par 1.3% mazāks griezes moments, salīdzinot ar FDD, un par 1.5% mazāks griezes moments, salīdzinot ar HVO7 degvielu.

Degvielas patēriņa mērījumu rezultāti

Lai novērtētu vidējo vērtību iespējamo kļūdu, izmantota vispārpieņemtā statistisko datu apstrādes metodika tāpat, kā pētījumu programmā PP-2 (skat. 3.3. tabulu).

Tā kā šajā pētījumu programmā katras atsevišķās datu sērijas izkliede un variācijas koeficienti bija lielāki, pirms aprakstošās statistikas rīku izmantošanas vispirms katrā no atkārtojumiem ar katru degvielu tika brāķēti rupjo kļūdu datu punkti (ja tādi bija), t.i., tie datu punkti, kuriem izpildījās sakarība:

$$|x_i - x'| \geq \beta S, \quad (3.4)$$

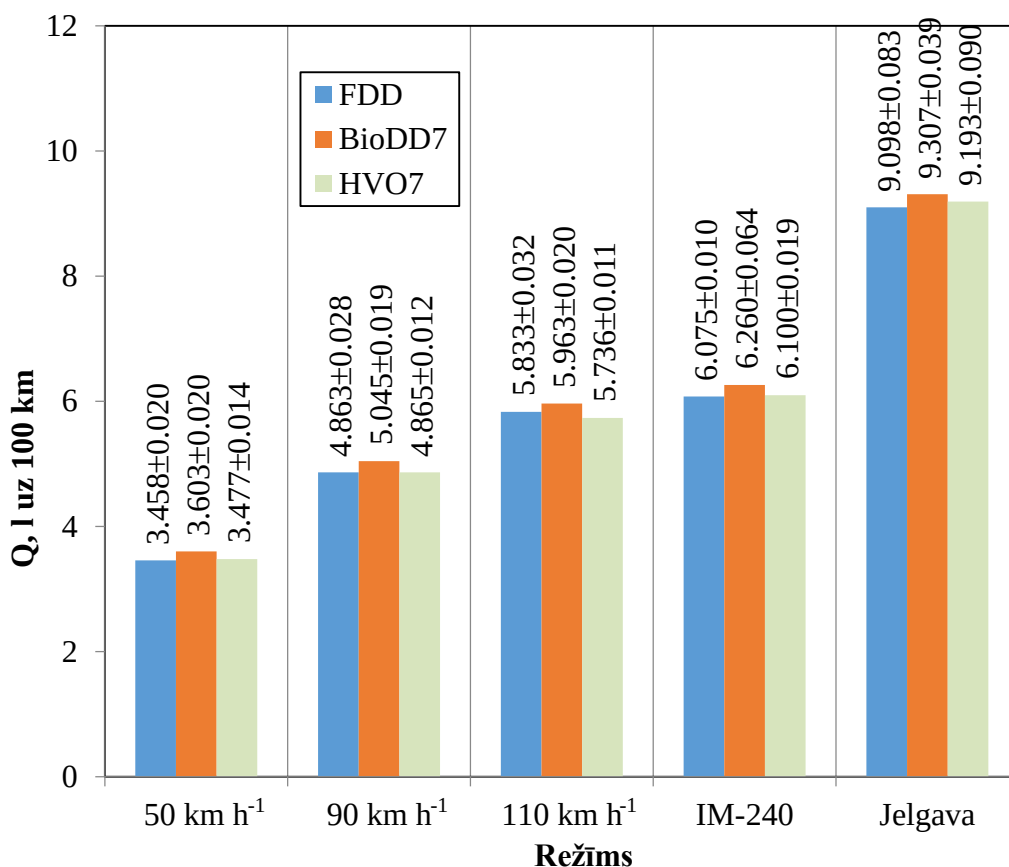
kur x_i – i -tā datu punkta degvielas patēriņa vērtība;

x' – konkrētā atkārtojuma degvielas patēriņa vidējā aritmētiskā vērtība;

β – *Stjudenta* koeficients, ko aprēķina atkarībā no mērījumu punktu skaita un nepieciešamās ticamības varbūtības, izmantojot *Excel* funkciju *TINV*, vai izvēlas no tabulas (Turney, 2022);

S – mērījumu sērijas standartklūda.

Degvielas patēriņa aprēķinu rezultāti parādīti 3.12. attēlā.



3.12. att. Degvielas patēriņš dažādos braukšanas režīmos, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām

Visu atkārtojumu vidējais dīzeļdegvielas patēriņš brīvgaitā ir 0.536 ± 0.003 l h⁻¹, HVO7 – 0.531 ± 0.003 l h⁻¹, bet BioDD7 – 0.538 ± 0.003 l h⁻¹. Ņemot vērā to, ka brīvgaitas degvielas patēriņu visvairāk iespaido dažādi testēšanas apstākļi (piemēram, motora temperatūra), šīs atšķirības (1% robežās) nevar uzskatīt par būtiskām.

Tāpēc objektīvāk dīzeļdegvielas patēriņa izmaiņas raksturo tieši dažādie braukšanas režīmi. Visu atkārtojumu rezultātu vidējo vērtību apkopojums dots 3.6. tabulā.

3.6. tabula. Degvielas patēriņš dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas

Režīms	FDD	BioDD7	HVO7	Atšķirība (BioDD7 pret FDD)	Atšķirība (HVO7 pret FDD)	Atšķirība (HVO7 pret BioDD7)
50 km h ⁻¹	3.458	3.603	3.477	4.22%	0.57%	-3.63%
90 km h ⁻¹	4.863	5.045	4.865	3.74%	0.04%	-3.70%
110 km h ⁻¹	5.833	5.963	5.736	2.24%	-1.68%	-3.96%
Cikls IM-240	6.075	6.260	6.100	3.04%	0.40%	-2.63%
Jelgavas cikls	9.098	9.307	9.193	2.30%	1.04%	-1.24%
Vidēji:				3.11%	0.07%	-3.03%

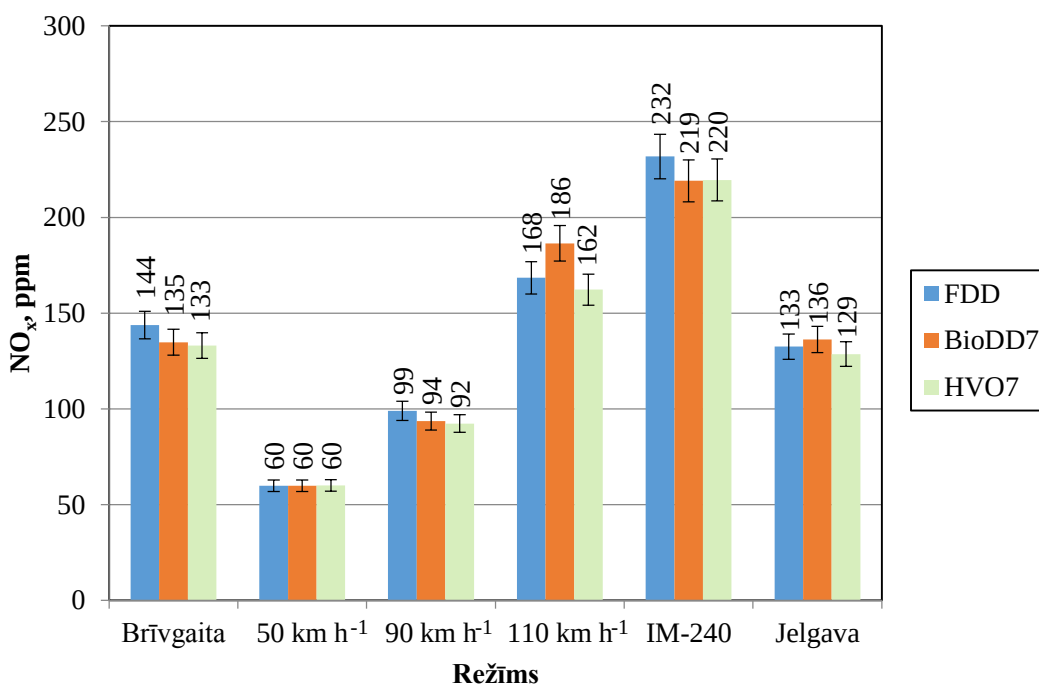
Abu ciklu ātruma un nobrauktā attāluma līknes dotas 20. – 25. pielikumā.

Kā redzams no 3.6. tabulas datiem, tad vidējais FDD un HVO7 patēriņš atšķiras tikai par 0.07%, kas uzskatāms par nebūtisku atšķirību. Savukārt, darbinot automobili ar BioDD7, patēriņš vidēji ir par 3.11% lielāks, salīdzinot ar FDD, un vidēji par 3.03% lielāks, salīdzinot ar HVO7 degvielu.

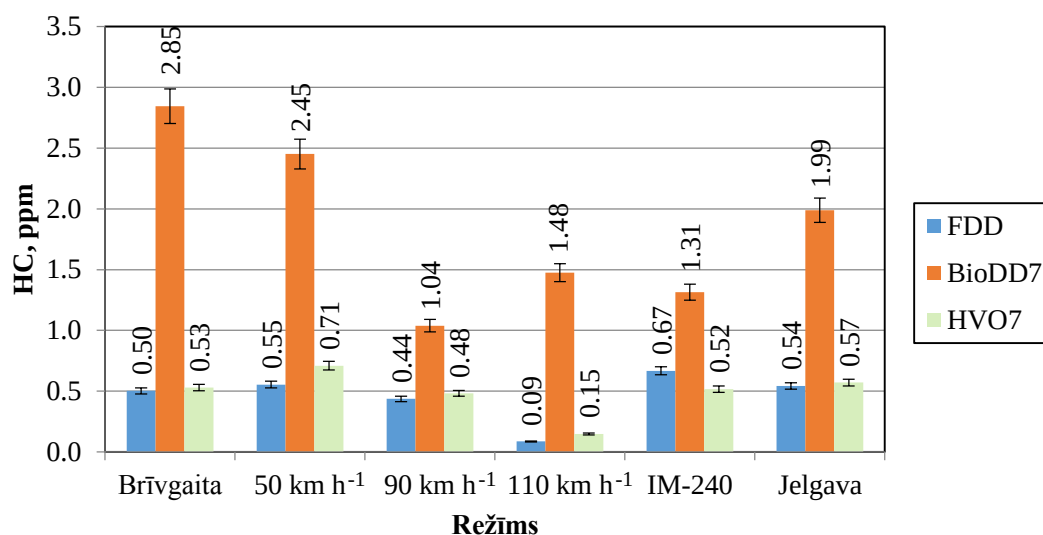
Atgāzu sastāva mērījumu rezultāti

NO_x, nesadegušo ogļūdeņražu HC, SO₂, CO₂ un CO saturs izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili ar visām trim degvielām, dotas 3.13. līdz 3.17. attēlā. Visām atgāzu komponentēm saturs dots ppm (*parts per million*) mērvienībās (1 ppm = 0.0001%), izņemot CO₂, kur tas tiek parādīts procentos, lai nodrošinātu labāku diagrammas lasāmību. Kļūdu noteikšanai izmantota tāda pat metodika, kā degvielas patēriņam, tikai atgāzu komponentu kļūdas attēlotas nevis kā skaitliskās vērtības, bet kļūdu nogriežņi pie ticamības līmeņa 95.0%.

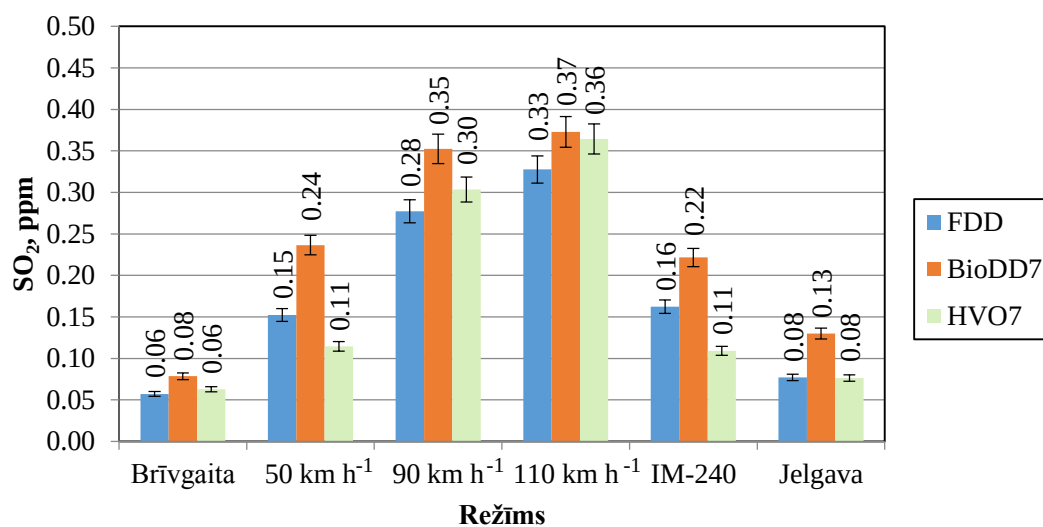
Kā jau tika minēts eksperimentu metodikā, tad dažādu komponentu daudzums atgāzēs ir ļoti mainīgs lielums ne tikai, salīdzinot dažādus atkārtojumus, bet arī viena atkārtojuma robežās. Jāatzīmē, ka vienas komponentes samazināšanās ar kādu no degvielas paraugiem, var izraisīt citas komponentes nelielu palielinājumu. Turklāt dažādos braukšanas režīmos izmaiņu tendences var būt atšķirīgas.



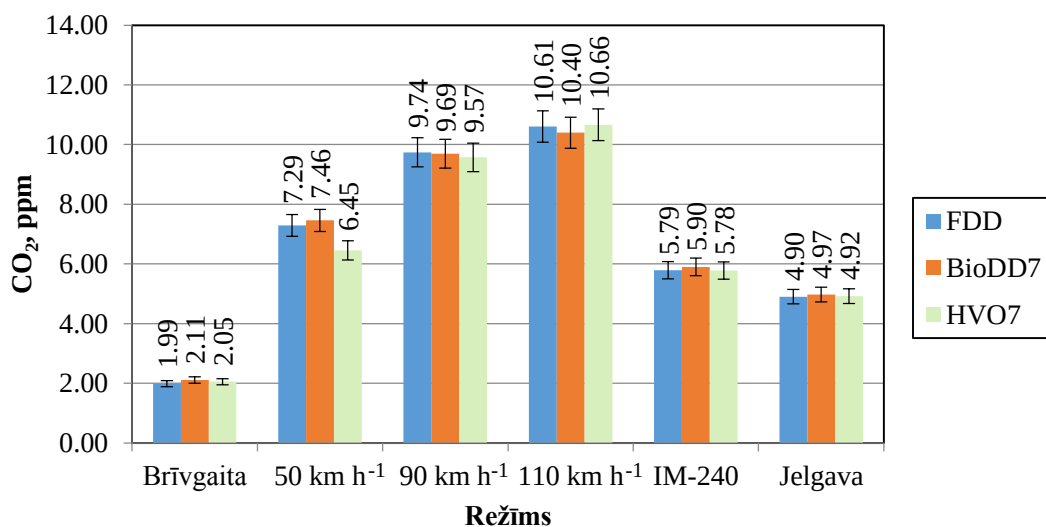
3.13. att. NO_x saturs izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili Opel Insignia ar trīs dažādām degvielām



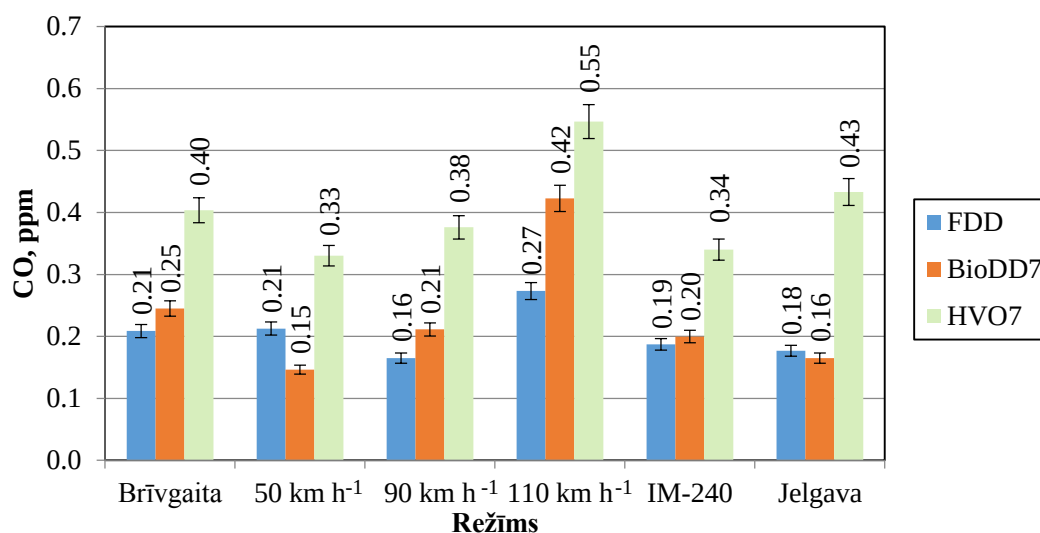
3.14. att. Nesadegušo oglekļa dioksīda saturs atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām



3.15. att. SO₂ saturs atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām



3.16. att. CO₂ saturs atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām



3.17. att. CO saturs izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām

3.7. – 3.11. tabulā dotas attiecīgi NO_x, nesadeģušo HC, SO₂, CO₂ un CO saturs izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot BioDD7 un HVO7 degvielas, salīdzinot tās gan pret fosilo dīzeļdegvielu, gan savstarpēji.

3.7. tabula. NO_x saturs izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas

Atšķirība	Režīms						
	Brīvgaite	50 km h ⁻¹	90 km h ⁻¹	110 km h ⁻¹	Cikls IM-240	Jelgavas cikls	Vidēji
BioDD7 pret FDD	-6.64%	-0.10%	-5.66%	10.67%	-5.81%	2.78%	-0.79%
HVO7 pret FDD	-8.05%	0.30%	-7.17%	-3.82%	-5.58%	-3.08%	-4.57%
HVO7 pret BioDD7	-1.33%	0.40%	-1.43%	-14.90%	0.22%	-5.94%	-3.83%

Lietojot BioDD7 degvielu, NO_x saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD, praktiski nemainās (vidējais samazinājums 0.79%). Arī, lietojot HVO7 degvielu, salīdzinot ar FDD, šīs komponentes vidējais samazinājums ir neliels – 4.57%, bet, salīdzinot ar BioDD7 degvielu – 3.83%. Tā kā pētījumu programmās PP-2 un PP-3 tika testēts tas pats automobilis, kā arī tika izmantotas tās pat iekārtas, tad, salīdzinot ar pirmo testu sēriju, kur tīras HVO degvielas izmantošana samazināja NO_x emisijas vidēji par 6.8%, salīdzinot ar tīru FDD, var secināt, ka šīs atgāzu komponentes samazinājumu nodrošina pat neliels (šajā gadījumā 7%) HVO piejaukums. Tomēr jāņem vērā, ka starp testu sērijām bija 6 mēnešu pārtraukums, tāpēc rezultātus var ietekmēt arī automobiļa tehniskā stāvokļa izmaiņas.

3.8. tabula. Nesadeģušo ogļūdeņražu saturs izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas

Atšķirība	Režīms						
	Brīvgaite	50 km h ⁻¹	90 km h ⁻¹	110 km h ⁻¹	Cikls IM-240	Jelgavas cikls	Vidēji
BioDD7 pret FDD	466.61%	342.01%	138.02%	1610.70%	96.97%	266.63%	486.82%
HVO7 pret FDD	5.26%	27.85%	10.49%	71.55%	-29.07%	5.23%	15.22%
HVO7 pret BioDD7	-438.28%	-245.71%	-115.41%	-897.18%	-154.23%	-248.40%	-349.87%

Lietojot BioDD7 degvielu, būtiski pieaug nesadegušo ogļūdeņražu saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD (vidējais palielinājums – 4.9 reizes). Salīdzinājumam, lietojot HVO7 degvielu, šīs komponentes vidējais palielinājums ir neliels – 15.22%. Lietojot HVO7 degvielu, salīdzinot ar BioDD7 degvielu, samazinājums ir aptuveni 3.5 reizes.

Salīdzinot ar pirmo testu sēriju, kur tīras HVO degvielas izmantošana samazināja HC emisijas vidēji par 13.1%, salīdzinot ar tīru FDD, šajā gadījumā tendence bija pretēja. Apstiprinās Ķīnas pētnieku konstatētais (Szeto, Leung, 2022), ka maisījumos ar mazu HVO procentuālo daļu šīs degvielas priekšrocības (piemēram, augstais cetānskaits) netiek izmantotas.

3.9. tabula. **SO₂ satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas**

Atšķirība	Režīms						
	Brīvgaite	50 km h ⁻¹	90 km h ⁻¹	110 km h ⁻¹	Cikls IM-240	Jelgavas cikls	Vidēji
BioDD7 pret FDD	37.31%	55.28%	27.10%	13.78%	36.56%	68.20%	39.71%
HVO7 pret FDD	9.89%	-32.88%	9.45%	11.19%	-48.76%	-1.04%	-8.69%
HVO7 pret BioDD7	-24.95%	-106.35%	-16.12%	-2.33%	-103.15%	-69.94%	-53.81%

Lietojot BioDD7 degvielu, pieaug arī SO₂ saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD (vidējais palielinājums aptuveni 40%). Lietojot HVO7 degvielu, šai komponentei konstatēts aptuveni 8.7% samazinājums. Salīdzinot ar BioDD7 degvielu, samazinājums ir aptuveni 54%.

Salīdzinot ar pirmo testu sēriju, kur tīras HVO degvielas izmantošana samazināja SO₂ emisijas vidēji par 13%, salīdzinot ar tīru FDD, var secināt, ka arī šīs atgāzu komponentes samazinājumu nodrošina pat neliels HVO piejaukums.

3.10. tabula. **CO₂ satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas**

Atšķirība	Režīms						
	Brīvgaite	50 km h ⁻¹	90 km h ⁻¹	110 km h ⁻¹	Cikls IM-240	Jelgavas cikls	Vidēji
BioDD7 pret FDD	6.06%	2.37%	-0.46%	-1.98%	1.95%	1.41%	1.56%
HVO7 pret FDD	3.25%	-12.97%	-1.75%	0.53%	-0.10%	0.45%	-1.76%
HVO7 pret BioDD7	-2.72%	-15.65%	-1.29%	2.52%	-2.05%	-0.96%	-3.36%

3.11. tabula. **CO satura izmaiņas dažādos braukšanas režīmos, lietojot trīs dažādas degvielas**

Atšķirība	Režīms						
	Brīvgaite	50 km h ⁻¹	90 km h ⁻¹	110 km h ⁻¹	Cikls IM-240	Jelgavas cikls	Vidēji
BioDD7 pret FDD	17.40%	-45.41%	28.22%	54.75%	6.72%	-7.24%	9.07%
HVO7 pret FDD	93.34%	55.27%	128.18%	100.07%	81.70%	144.83%	100.56%
HVO7 pret BioDD7	64.68%	125.78%	77.96%	29.29%	70.25%	162.54%	88.42%

Lietojot BioDD7 degvielu, CO₂ saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD, mainās maz (vidējais palielinājums 1.56%). Arī, lietojot HVO7 degvielu, salīdzinot ar FDD, šīs komponentes izmaiņas ir nelielas – vidējais samazinājums 1.76%, bet, salīdzinot ar BioDD7 degvielu –

3.36%. Salīdzinot ar pirmo testu sēriju, kur tīras HVO degvielas izmantošana samazināja CO₂ emisijas vidēji par 5%, salīdzinot ar tīru FDD, var secināt, ka arī šīs atgāzu komponentes samazinājumu nodrošina pat neliels HVO piejaukums. To nodrošina lielāka ūdeņraža un oglekļa attiecība HVO, salīdzinot ar FDD.

Lietojot BioDD7 degvielu, nedaudz palielinās CO saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD (vidējais palielinājums aptuveni 9%). Jūtamāks tas ir, lietojot HVO7 degvielu – aptuveni 2 reizes, bet, salīdzinot ar BioDD7 degvielu – pieaugums ir aptuveni 88%. Tā kā 1 ppm = 0.0001%, bet CO atgāzēs šim automobilim mērāms ppm desmitdaļās, tad absolūtajās vienībās CO pieaugums, lietojot HVO7 degvielu, salīdzinot ar FDD, ir no 0.00002 uz 0.00004%, kas ir ļoti nebūtisks. Jāpiebilst, ka pirmajā testu sērijā tvana gāzes (CO) atgāzēs, izmantojot HVO degvielu, nebija vispār, bet ar fosilo dīzeļdegvielu CO izmeši bija niecīgi. Skaitliskās vērtības šajā 6 mēnešu laikā ir pieaugušas, ko var izskaidrot arī ar minimālām automobiļa tehniskā stāvokļa izmaiņām.

Salīdzinot iegūtos rezultātus ar citiem pētījumiem, kur veikta maisījumdegvielu izpēte, var secināt, ka reizēm rezultāti sakrīt viena vai vairāku parametru izmaiņu tendencēs, bet citiem parametriem nesakrīt vai nu tendences vai arī skaitliskās vērtības. Saturiski līdzīgs veikspējas pētījums, salīdzinot HVO un BioDD maisījumus ar fosilo dīzeļdegvielu, vienlaikus nosakot arī degvielas patēriņa un izplūdes gāzu satura izmaiņas, tika veikts Korejā (Kim et al., 2014).

Jaudas samazinājums, izmantojot BioDD7 (Korejā veiktajā pētījumā BioDD10) bija identisks. Izmantojot HVO10, tika iegūta aptuveni par 1% mazāka jauda, tomēr, ņemot vērā iespējamo kļūdu, to varētu vērtēt kā nebūtisku. Ļoti līdzīgas ir arī degvielas patēriņa izmaiņu tendences, taču skaitliski tās HVO maisījumdegvielas izmantošanas gadījumā bija lielākas, bet BioDD – mazākas. Atšķirības, salīdzinot abus pētījumus, nepārsniedza 1%. Atšķīrās tendences izmešu sastāvā – Korejā veiktajā pētījumā HVO maisījumdegvielas izmantošanas gadījumā HC un CO satura tendences bija pretējas, tāpat kā BioDD izmantošanas gadījumā CO un HC koncentrācijā.

Ar Portugālē veikto pētījumu (Serrano et al., 2021), kur testēja FDD, BioDD7 un HVO15, sakritība ir salīdzinoši nelielajā degvielas patēriņa pieaugumā, lietojot HVO, bet tur tika konstatēts degvielas patēriņa samazinājums BioDD7 izmantošanā, kas ir diezgan apšaubāms, jo visi pārējie maisījumi, kur biodīzeļdegvielas saturs maisījumā bija virs 15%, deva būtisku patēriņa palielinājumu. Līdzīgas tendences BioDD7 izmantošanā bija CO un NO_x saturā, bet HVO15 – NO_x un HC satura izmaiņu tendencēs, bet ne skaitliskajās vērtībās.

Lietuvā veiktajos *Audi 1.9 TDI* motora testos (Rimkus et al., 2019) viena no testētajām degvielām bija ar 10% HVO piejaukumu. Tur CO izmaiņas bija nebūtiskas, kas atšķiras no šī pētījuma, bet līdzīgi rezultāti konstatēti NO_x satura izmaiņu tendencēs un procentuālajās vērtībās.

Citā LBTU veiktajā pētījumā (Birzietis et al., 2017) tika salīdzināta FDD un maisījums, kas saturēja 9.15% HVO. Pētījumā tika izmantots 2015. gadā ražots pilnpiedziņas automobilis *Mazda CX-5*, bet testi un mērījumi tika veikti, izmantojot tās pat iekārtas, kas pētījumu programmā PP-3. Abos pētījumos tika konstatētas līdzīgas tendences jaudas un griezes momenta izmaiņās, bet degvielas patēriņa sakritība bija tikai vienā testētajā režīmā, t.i., aptuveni 2% samazinājums, izmantojot HVO saturošu degvielu, pie konstanta braukšanas ātruma 110 km h⁻¹.

Būtiskākie pētījumu programmas PP-3 rezultāti publicēti (Sondors et al., 2019).

3.4. Pētījumu programmas PP-3 kopsavilkums

1. Eksperimentu rezultāti parāda, ka darbinot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar fosilo dīzeļdegvielu un dīzeļdegvielu, kurai piejaukts 7% HVO degvielas, jaudas un griezes momenta raksturlīknes visā motora kloķvārpstas rotācijas frekvences diapazonā ir līdzīgas – jaudas un griezes momenta vērtību izmaiņas nevienā no mērītajiem datu punktiem nepārsniedz 0.8%.

2. Maksimālā automobiļa jauda ar FDD 84.1 kW tiek sasniegta pie 3780 min⁻¹, ar BioDD7 – 82.3 kW pie 3760 min⁻¹, bet ar HVO7 – 84.2 kW pie 3740 min⁻¹. Maksimālās jaudas atšķirība FDD un HVO7 degvielai ir 0.16%, kas uzskatāma par nebūtisku. Darbinot automobili ar BioDD7, tiek attīstīta par 2.12% mazāka maksimālā jauda, salīdzinot ar FDD, un par 2.28% mazāka jauda, salīdzinot ar HVO7 degvielu.
3. Maksimālais griezes moments ar FDD 281.5 N m tiek sasniegts pie 2400 min⁻¹, ar BioDD7 – 277.9 N m pie 2380 min⁻¹, bet ar HVO7 degvielu – 282.1 N m pie 2380 min⁻¹. Maksimālās griezes momenta atšķirība FDD un HVO degvielai ir 0.20%, kas uzskatāma par nebūtisku. Darbinot automobili ar BioDD7, tiek attīstīts par 1.3% mazāks griezes moments, salīdzinot ar FDD, un par 1.5% mazāks griezes moments, salīdzinot ar HVO7 degvielu.
4. Vidējais (trīs konstantu kustības ātruma testu – 50, 90 un 110 km h⁻¹ un divu ciklu – kombinētā cikla IM-240 un Jelgavas pilsētas cikla) FDD un HVO7 degvielas patēriņš atšķiras tikai par 0.07%, kas uzskatāms par nebūtisku atšķirību. Darbinot automobili ar BioDD7, patēriņš vidēji ir par 3.11% lielāks, salīdzinot ar FDD, un vidēji par 3.03% lielāks, salīdzinot ar HVO7 degvielu.
5. Lietojot BioDD7 degvielu, NO_x un CO₂ saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD, praktiski nemainās. Aptuveni par 9% pieaug CO, par 40% SO₂ un aptuveni 5 reizes nesadegušo oglekļa dioksīda saturs.
6. Lietojot HVO7 degvielu, CO₂ saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD, praktiski nemainās, aptuveni par 4.5% samazinās NO_x un par 9% SO₂ saturs. Nesadegušie oglekļa dioksīda palielinās aptuveni par 15%, bet CO – aptuveni 2 reizes.
7. Lietojot HVO7 degvielu, salīdzinot ar BioDD7 degvielu, aptuveni par 4% samazinās NO_x, par 3% CO₂, par 55% SO₂ un nesadegušo oglekļa dioksīda saturs (aptuveni 3.5 reizes), bet CO palielinās aptuveni par 90%.
8. Eksperimentālie pētījumi, darbinot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar trīs dažādām degvielām, ļauj secināt, ka HVO piejaukšana fosilajai dīzeļdegvielai varētu būt laba alternatīva līdz šim realizētajai biodīzeļdegvielas piejaukšanai. To apliecina gan jaudas, gan degvielas patēriņa, gan arī atgāzu sastāva mērījumi.

3.5. Pētījumu programma PP-4 – traktora testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD un HVO

Pētījumu programmā veikti eksperimentālie pētījumi, darbinot traktoru *Class Ares 557ATX*, lietojot tīras degvielas DD un HVO. Jauda un griezes moments, degvielas patēriņš un atgāzu sastāvs noteikts attiecīgi ar *MAHA ZW-500*, *AVL KML MOBILE* un *AVL SESAM FTIR* iekārtām.

Jaudas un griezes momenta mērījumu rezultāti

Jūgvārpstas jaudas stenda *MAHA ZW-500* rokas termināļa izdruku piemēri parādīti 3.18. attēlā.

Lai datus varētu apstrādāt un attēlot grafiski, no šiem datiem aprēķināta traktora motora kļūgvārpstas rotācijas frekvence, traktora motora efektīvā jauda un griezes moments, attiecīgi izmantojot formulas (2.6), (2.7) un (2.8) (skat. 56. lpp.).

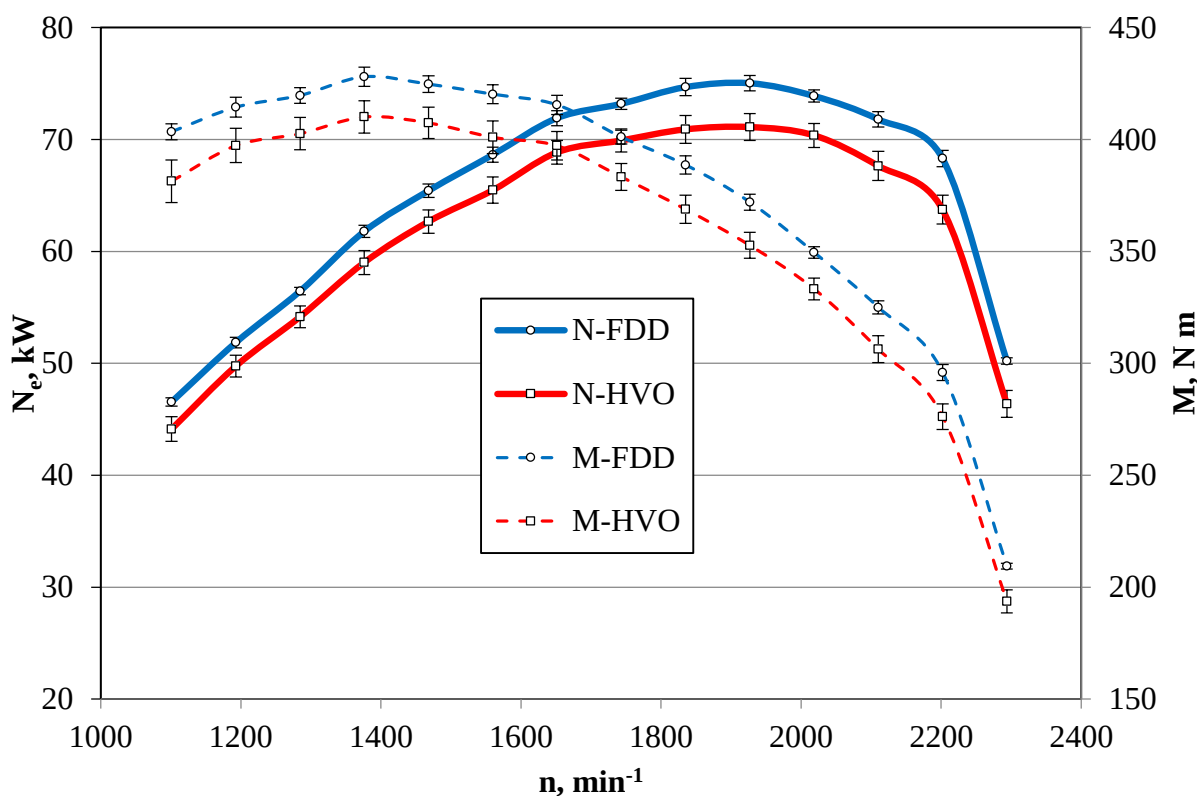
Motora efektīvās jaudas un griezes momenta raksturlīknes pēc datu apstrādes (ticamības līmenis – 95%) dotas 3.19. attēlā.

Motora efektīvā jauda un griezes moments, izmantojot HVO degvielu, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, samazinājās – vidējā jaudas un griezes momenta samazinājums visā jūgvārpstas apgrieziena diapazonā bija aptuveni 5.0%.

Šī vērtība ir tuvu procentuālajai atšķirībai, kas aprēķināma no abu izmantoto degvielu zemākās tilpuma siltumspējas vērtībām (36.4 MJ l⁻¹ fosilajai dīzeļdegvielai un 34.4 MJ l⁻¹ HVO degvielai), t.i., 5.5%.

LPS ZW 500 (V 1.04 GB)	LPS ZW 500 (V 1.04 GB)	LPS ZW 500 (V 1.04 GB)	LPS ZW 500 (V 1.04 GB)	LPS ZW 500 (V 1.04 GB)
Jelgava J.CAKSTES BLV. 5	Jelgava J.CAKSTES BLV. 5	Jelgava J.CAKSTES BLV. 5	Jelgava J.CAKSTES BLV. 5	Jelgava J.CAKSTES BLV. 5
14:02 Clock	14:15 Clock	14:26 Clock	14:32 Clock	14:43 Clock
Vehicle Data	Vehicle Data	Vehicle Data	Vehicle Data	Vehicle Data
Make CLAAS ARES 557ATX	Make CLAAS ARES 557ATX	Make CLAAS ARES 557ATX	Make CLAAS ARES 557ATX	Make CLAAS ARES 557ATX
Operating hours 102	Operating hours 102	Operating hours 102	Operating hours 102	Operating hours 102
Customer LLU TF / Diesel	Customer LLU TF / Diesel	Customer LLU TF / Diesel	Customer LLU TF / Diesel	Customer LLU TF / Diesel
Result	Result	Result	Result	Result
N [U/min]	N [U/min]	N [U/min]	N [U/min]	N [U/min]
Md [Nm]	Md [Nm]	Md [Nm]	Md [Nm]	Md [Nm]
P [kW]	P [kW]	P [kW]	P [kW]	P [kW]
300 1426.2 44.8	299 1414.3 44.3	301 1404.4 44.3	301 1396.6 44.0	300 1391.1 43.7
325 1462.8 49.8	325 1462.8 49.8	326 1440.8 49.2	326 1429.9 48.8	326 1427.6 48.7
349 1476.8 54.0	349 1476.8 54.0	350 1461.6 53.6	351 1452.7 53.4	351 1447.6 53.2
375 1509.2 59.3	375 1509.2 59.3	376 1490.8 58.7	376 1477.9 58.2	376 1474.2 58.0
401 1494.8 62.8	401 1494.8 62.8	401 1481.0 62.2	400 1470.5 61.6	401 1462.3 61.4
425 1481.2 65.9	425 1481.2 65.9	425 1464.8 65.2	425 1452.8 64.7	425 1445.3 64.3
450 1464.8 69.0	450 1464.8 69.0	450 1444.7 68.1	451 1441.7 68.1	451 1426.2 67.4
474 1410.2 70.0	474 1410.2 70.0	476 1396.8 69.6	475 1391.9 69.2	475 1382.7 68.8
500 1371.0 71.8	500 1371.0 71.8	500 1351.3 70.8	500 1345.5 70.5	500 1335.9 69.9
524 1311.3 72.0	524 1311.3 72.0	527 1293.7 71.4	524 1288.8 70.7	525 1279.6 70.4
550 1229.1 70.8	550 1229.1 70.8	550 1213.3 69.9	550 1215.1 70.0	550 1206.5 69.5
575 1144.3 68.9	575 1144.3 68.9	575 1133.0 68.2	575 1124.5 67.7	574 1119.0 67.3
600 1046.0 65.7	600 1046.0 65.7	600 1028.0 64.6	600 1020.9 64.1	603 1017.1 64.2
624 734.3 48.0	624 734.3 48.0	624 730.1 47.7	624 728.1 47.6	624 722.7 47.2
Signature:				
Stamp:				

3.18. att. Jūgvārpstas jaudas stenda rokas termināļa izdruku piemēri

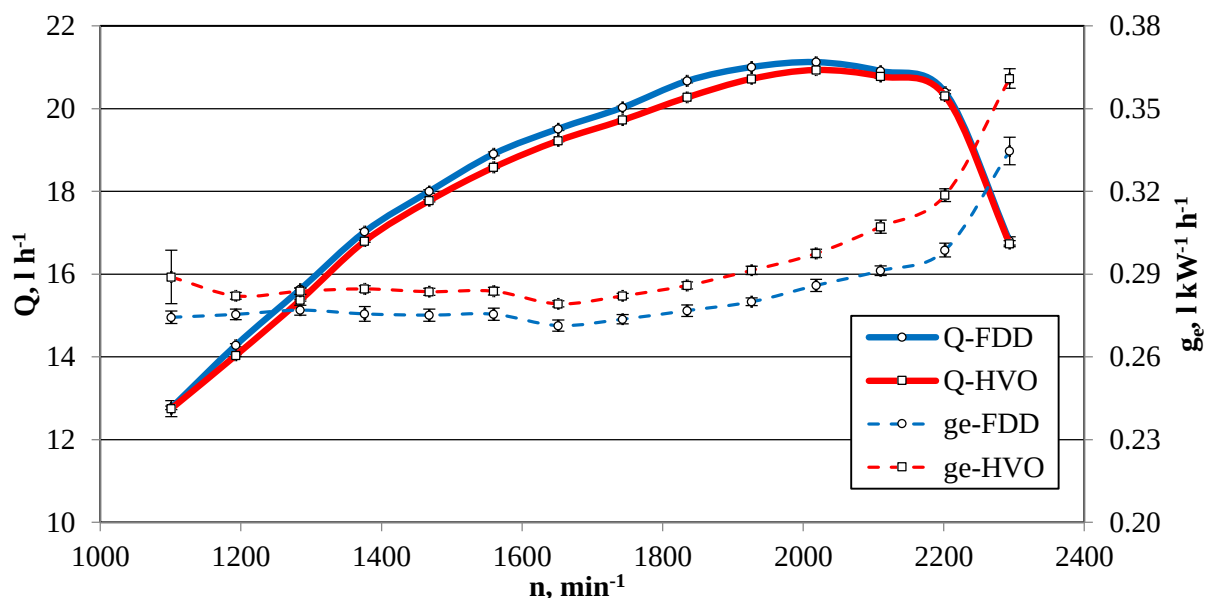


3.19. att. Motora efektīvās jaudas un griezes momenta raksturlieknes, darbinot traktoru Class Ares 557ATX ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu

Degvielas patēriņa mērījumu rezultāti

Degvielas stundas patēriņa Q un īpatnējā degvielas patēriņa g_e līknes pēc datu apstrādes (ticamības līmenis – 95%) dotas 3.20. attēlā.

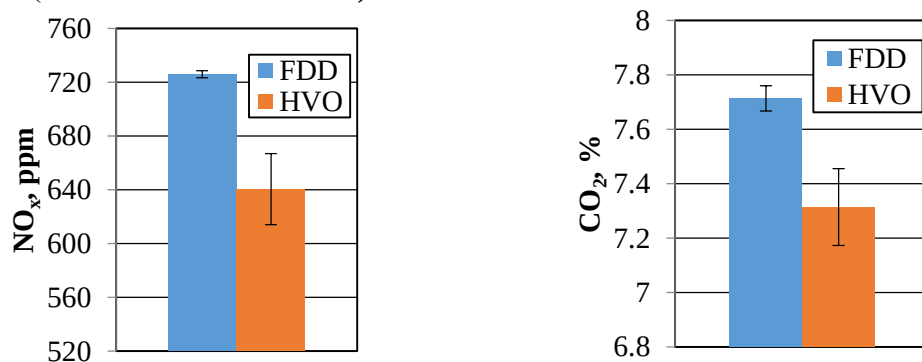
Neskatoties uz to, ka stundas degvielas patēriņš, izmantojot HVO, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, ir samazinājies aptuveni par 1%, mazāka attīstītā motora efektīvā jauda ar šo degvielu ir iemesls īpatnējā degvielas patēriņa pieaugumam vidēji par 4.1%.



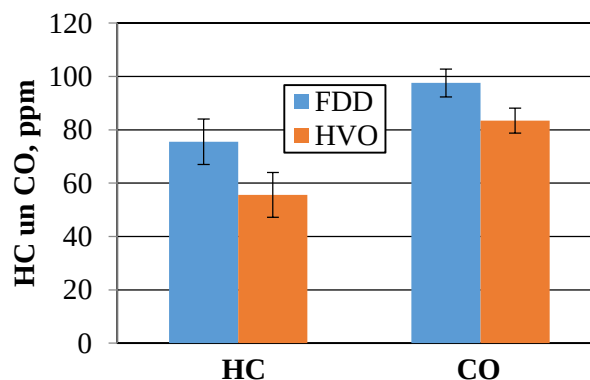
3.20. att. Degvielas patēriņš visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, darbinot traktoru *Class Ares 557ATX* ar HVO un fosilo dīzeldegvielu

Atgāzu sastāva mērījumu rezultāti

Pētījumu metodikā jau tika minēts, ka, ņemot vērā izplūdes gāzu un mērierīces specifiku, skaitlisko vērtību stabilizēšanās aizņem ilgāku laiku un ir neiespējami izgriezt 15 sekunžu datu intervālus datu apstrādei, kā tas tika darīts degvielas patēriņam. Tāpēc rezultātu prezentācijai tiek ņemts katras izplūdes gāzu komponentes vidējais daudzums visā jūgvārpstas un tiem atbilstošo motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā. NO_x , CO_2 , HC un CO saturs izmaiņas atgāzēs, darbinot traktoru *Class Ares 557ATX* ar HVO un fosilo dīzeldegvielu, pēc datu apstrādes (ticamības līmenis – 95%) dotas 3.21. un 3.22. attēlā.



3.21. att. NO_x un CO_2 saturs izmaiņas atgāzēs, darbinot traktoru *Class Ares 557ATX* ar HVO un fosilo dīzeldegvielu



3.22. att. HC un CO saturs izmaiņas atgāzēs, darbinot traktoru *Class Ares 557ATX* ar HVO un fosilo dīzeldegvielu

Darbinot traktoru ar HVO, vidējais NO_x samazinājums ir 11.8%, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu. Arī citu svarīgu vidi saudzējošo komponentu – kopējo nesadegušo ogļūdeņražu (HC), CO un CO_2 daudzums, izmantojot HVO, samazinās – attiecīgi par 26.4, 14.5 un 5.2%.

Apkopojot šajā pētījumu programmā iegūtos datus, var secināt, ka HVO ir videi draudzīga degviela ar nelielu degvielas patēriņa ekonomiju stundā, bet lietotājam jābūt gatavam jaudas un griezes momenta samazinājumam, kas procentuāli ir tuvs HVO un fosilās dīzeļdegvielas zemāko tilpuma siltumspēju vērtību atšķirībai. Tā kā HVO izmantošana traktortehnikā pētīta salīdzinoši maz, tad iegūtie rezultāti salīdzināti arī ar citiem liela darba tilpuma (vismaz 4 litru) motoru pētījumiem, piemēram, autobusu un apvidus transportlīdzekļu.

Čehijā veiktajā pētījumā par 100% HVO ietekmi uz traktora *Zetor Foretrra 8641* iekšdedzes motora (darba tilpums 4.2 l) ekspluatācijas parametriem, tika konstatēts, ka ar HVO degvielu motora maksimālais griezes moments samazinās par aptuveni 0.9%, bet maksimālā jauda par aptuveni 6%, taču to ir grūti izskaidrot, jo abiem skaitļiem būtu jābūt vienādiem, tāpēc ka visu jūgvārpsta stendu specifika ir tikai viena parametra, t.i., griezes momenta mērīšana, bet jauda tiek aprēķināta, izmantojot griezes momenta un apgriezienu vērtības. Pieņemot par ticamu otro vērtību, t.i., 6%, tad abos pētījumus tendences ir līdzīgas. Tomēr īpatnējā degvielas patēriņa izmaiņu tendences un skaitliskās vērtības nesakrīt (Pexa et al., 2015).

Tīras HVO degvielas patēriņa un skaitliskās vērtības sakrīt ar Somijā veikto 11 autobusu testēšanu (Makinen et al., 2011), kur tika konstatēts degvielas patēriņa pieaugums, salīdzinot ar vasaras un ziemas klases fosilo dīzeļdegvielu, attiecīgi 5.2 un 3.5%.

Sešcilindru dīzeļmotora ar turbopūti (darba tilpums 5.9 l) pētījumos Indijā, salīdzinot ar FDD, tika konstatēts NO_x emisiju pieaugums par 26%, kas ir pretēji gan pēc tendences, gan skaitliskās vērtības. Samazinājums salīdzinājumā ar FDD tika konstatēts CO emisijām (par 16%) un HC emisijām (par 16%), kas ir tuvu traktora *Class Ares 557ATX* eksperimentos konstatētajam (Singh et al., 2015).

Citā Somijā veiktajā 17 autobusu testēšanā, izmantojot 100% HVO degvielu, vidējais NO_x emisiju samazinājums bija 10%, CO 29% un HC 39%, salīdzinot ar FDD. Tas tika konstatēts galvenokārt *Euro II* un *Euro III* normām atbilstošiem autobusiem (Erkkilam et al., 2011). Un šo gan pēc tendencēm, gan skaitliskajām vērtībām var novērtēt kā vistuvāko promocijas darba ietvaros veiktajam pētījumam.

NO_x , HC un CO samazinājuma tendences sakrīt arī ar Indijā veikto pētījumu (Kumar et al., 2021), tomēr tur tika konstatēts, ka HC un CO emisijas samazinās maisījumiem ar HVO saturu līdz pat 30%, bet, kad HVO procentuālais daudzums tiek vēl vairāk palielināts, emisijas sāk pieaugt. Ar šo pētījumu pilnībā sakrīt NO_x emisiju izmaiņu tendences.

Tāpat tendence, bet ar aptuveni trīs reizes mazāku skaitlisko samazinājumu, sakrīt ar Somijā pētīto apvidus transportlīdzekļa dīzeļmotoru (darba tilpums 4.4 l), kur tika novērots 4.3% NO_x emisiju samazinājums, izmantojot FDD vietā HVO (Ovaska et al., 2019).

Būtiskākie pētījumu programmas PP-4 rezultāti publicēti (Sondors et al., 2014).

3.6. Pētījumu programmas PP-4 kopsavilkums

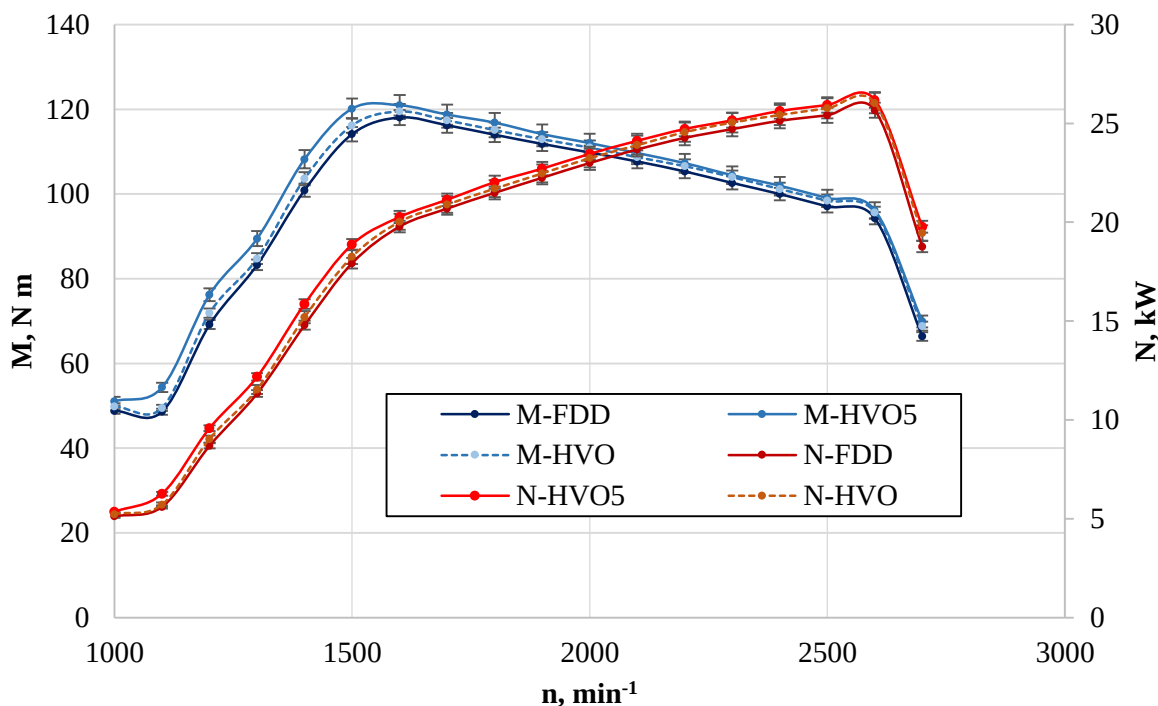
1. Veicot traktora *Class Ares 557ATX* eksperimentālos pētījumus, konstatēts, ka motora efektīvā jauda un griezes moments, izmantojot HVO degvielu, samazinās, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu. Vidējais jaudas un griezes momenta samazinājums visā jūgvārpstas apgriezienu diapazonā bija aptuveni 5.0%. Tas izskaidrojams ar 5.5% atšķirību abu degvielu zemākās tilpuma siltumspējas vērtībās.
2. Vidējais stundas degvielas patēriņš visā jūgvārpstas apgriezienu diapazonā, izmantojot HVO, bija par aptuveni 1% mazāks, salīdzinot ar dīzeļdegvielu, bet zemākas attīstītās motora jaudas dēļ īpatnējā degvielas patēriņa pieaugums bija par 4.1% lielāks.
3. Darbinot traktoru ar HVO, vidējais NO_x samazinājums, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, bija 11.8%. Samazinājās arī kopējo nesadegušo ogļūdeņražu HC, CO un CO_2 daudzums – attiecīgi par 26.4, 14.5 un 5.2%.

3.7. Pētījumu programma PP-5 – motora testēšanas rezultāti, darbinot to ar FDD, HVO un HVO5

Tā kā pētīt automobili (pētījumu programmās PP-2 un PP-3) vai traktoru kopumā (pētījumu programmā PP-4), iegūtos jaudas un griezes momenta, kā arī degvielas patēriņu rezultātus iespaido zudumi, kas rodas automobiļa pārnenumkārbā, galvenajā pārvadā, riteņu gultņos, traktora jūgvārpstas pārvadā un citos saistītos mezglos, bet atgāzu sastāvu ietekmē spēkratu atgāzu neitralizācijas sistēmas, pētījumu programmā PP-5 uz stenda testēts motors. Šajā gadījumā tiek iegūti salīdzinoši “tīri” jaudas, griezes momenta un atgāzu dati, jo iepriekšminēto rezultātus ietekmējošo sistēmu motoram nav. Pētāmais motors attiecināms uz bezceļu spēkratu motoriem, t.i., izmantošanai iekrāvējos, buldozeros, ekskavatoros, bezceļu kravas automobiļos, sniega tīrītājos, celtnos u.tml., kā arī lauksaimniecības un mežsaimniecības traktoros, līdz ar to visās eksperimentālo pētījumu programmās izmantotie spēkrati vai to motori aptver pēc iespējas plašas pielietojuma jomas. Savukārt to pašu degvielas patēriņa un atgāzu sastāva noteikšanas iekārtu izmantošana, kas bija P-2, P-3 un P-4 programmās, nodrošina, ka rezultātus pēc iespējas maz ietekmē iespējami citu mēriekārtu izmantošana. Tā kā pētījumu programma PP-5 tika realizēta ziemas apstākļos, tad testētas trīs šajā laikā komerciāli pieejamās degvielas – 2. arktiskās klases FDD, tīra HVO (*Neste My*), un FDD ar 5.21% HVO piejaukumu pēc tilpuma (*Pro Diesel*) jeb turpmāk tekstā HVO5.

Jaudas un griezes momenta mērījumu rezultāti

Datu apstrāde veikta līdzīgi kā traktora pētījumos, t.i., no katra eksperimentu atkārtojuma atlasīti katra mērījuma soļa stabilie diapazoni, t.i., aptuveni 10 s, no kā aprēķinātas mērījumu soļa vidējās vērtības. Pēc datu matemātiskās apstrādes rezultāti attēloti kā katra degvielas veida visu atkārtojumu vidējās vērtības. Motora jaudas un griezes momenta raksturlīknes pēc datu apstrādes (ticamības līmenis – 95%) dotas 3.23. attēlā. Salīdzinot jaudas un griezes momenta katra atsevišķā atkārtojuma vērtības pie noteiktiem apgriezieniem, korelācija FDD vērtībām pārsniedz 98.1%, HVO – 99.6%, bet HVO5 – 98.0% (no ar katru degvielu veiktajiem 5 – 7 atkārtojumiem datu apstrādei tika atstāti vismaz četri ar visaugstāko savstarpējo jaudas, apgriezienu un griezes momenta datu punktu korelāciju).



3.23. att. Eksperimentālā motora jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar trīs dažādām degvielām

Augstākā jauda un griezes moments iegūts, motoru darbinot ar HVO5 degvielu, bet zemākie – ar tīru fosilo dīzeļdegvielu. Darbinot motoru ar HVO5, iegūta maksimālā jauda 26.2 kW pie 2600 min⁻¹ un maksimālais griezes moments 120.9 N m pie 1600 min⁻¹. Maksimālās jaudas pieaugums ir 2% un maksimālā griezes momenta pieaugums 2.4%, salīdzinot FDD (25.7 kW pie 2600 min⁻¹ un 118.1 N m pie 1600 min⁻¹).

Darbinot motoru ar tīru HVO degvielu, iegūta maksimālā jauda 26.0 kW pie 2600 min⁻¹ un maksimālais griezes moments 119.5 N m pie 1600 min⁻¹. Maksimālās jaudas pieaugums ir 1.4% un maksimālā griezes momenta pieaugums 1.2%, salīdzinot ar FDD. Tā kā degvielām ir atšķirīgas īpašības (degvielas blīvums, siltumspēja, cetānskaitlis u.c.) (skat. 2.3. tabulu), tad jaudas un griezes momenta izmaiņas jāaplūko kopā ar degvielas patēriņa izmaiņām.

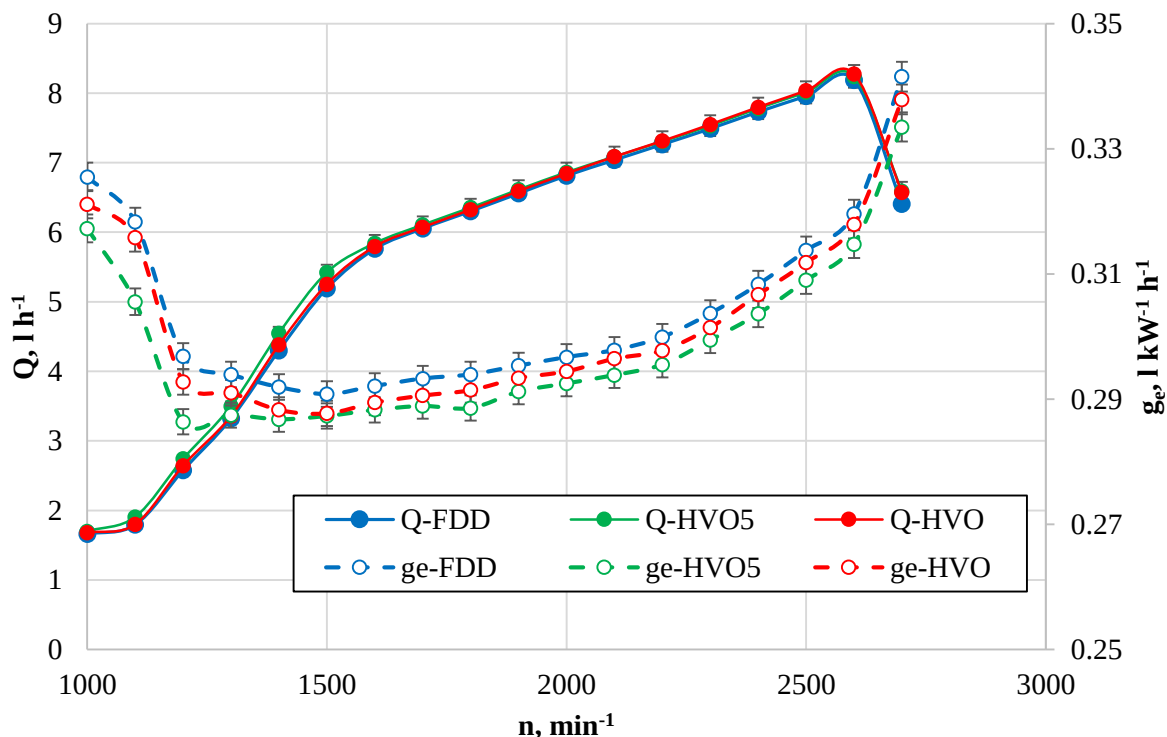
Salīdzinot ar pētījumu programmu PP-2, kur automobilis *Opel Insignia* tika darbināts ar HVO un fosilo dīzeļdegvielu, jaudas un griezes momenta izmaiņu tendences ir līdzīgas. Skaitliski izmaiņu atšķirības nepārsniedz 1%. Salīdzinot ar pētījumu programmu PP-4, kur ar tām pat degvielām tika darbināts traktors *Class Ares 557ATX*, tendences ir pretējas, jo tur, izmantojot HVO degvielu, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, jaudas un griezes momenta samazinājums bija aptuveni 5.0%.

Arī salīdzinot ar pētījumu programmu PP-3, kur automobiļa *Opel Insignia* darbināšanai tika izmantota HVO7 un fosilā dīzeļdegviela, jaudas un griezes momenta izmaiņu tendences ir līdzīgas, tomēr tur atšķirības nepārsniedza 0.2%.

Salīdzinot ar citu pētnieku iegūtajiem rezultātiem, kur pētījumi veikti uz motorstenda, dažkārt vērojamas atšķirības. Piemēram, Korejā (Kim et al., 2014) veiktajā pētījumā, piejaucot līdzīgu daudzumu HVO fosilajai dīzeļdegvielai, tika iegūts aptuveni 1% jaudas samazinājums, salīdzinot ar FDD, bet ar tīru HVO degvielu vairāk nekā 2% jaudas samazinājums.

Degvielas patēriņa mērījumu rezultāti

Degvielas stundas patēriņa Q un īpatnējā degvielas patēriņa g_e līknes pēc datu apstrādes (ticamības līmenis – 95%) dotas 3.24. attēlā. Salīdzinot degvielas patēriņa katra atsevišķā atkārtojuma vērtības pie noteiktiem apgriezieniem, korelācija visām degvielām bija vismaz 99.8% (no ar katru degvielu veiktajiem 5 – 7 atkārtojumiem tika atstāti vismaz četri – tie paši, kuri jaudas un griezes momenta analīzei).



3.24. att. Degvielas patēriņš visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, darbinot to ar trīs dažādām degvielām

Momentāno degvielas patēriņu tendence ir līdzīga kā jaudas datiem. Zemākais degvielas stundas patēriņš iegūts, motoru darbinot ar fosilo degvielu, bet lielākais – ar HVO5 degvielu.

Darbinot motoru ar HVO5, maksimālais vidējais stundas degvielas patēriņš visā kloķvārpstas apgriezienu diapazonā ir par 2.34% lielāks nekā FDD, bet tīrai HVO tas ir par 1.00% lielāks nekā FDD.

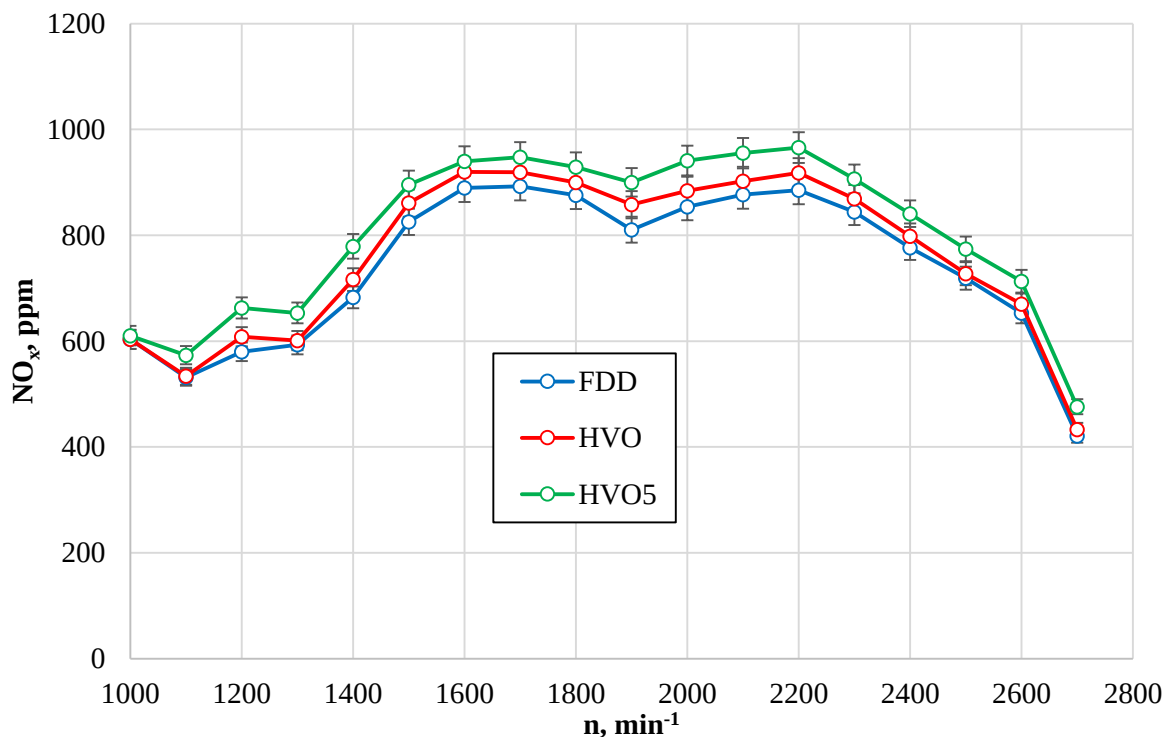
Tomēr objektīvāk ir salīdzināt īpatnējā degvielas patēriņa datus, kas iegūti aprēķinu ceļā momentāno degvielas patēriņu konkrētā apgriezienu punktā izdalot uz šajā punktā attīstīto jaudu. Neskatoties uz to, ka, darbinot motoru ar HVO5, iegūts augstākais stundas degvielas patēriņš, īpatnējais degvielas patēriņš, motoru darbinot ar šo degvielu, ir vismazākais. Tas nozīmē, ka vienas jaudas vienības attīstīšanai nepieciešams mazāks degvielas daudzums, nekā tas ir FDD vai tīras HVO izmantošanas gadījumā. Vidēji visā analizētajā motora apgriezienu diapazonā īpatnējā degvielas patēriņa samazinājums HVO5 izmantošanas gadījumā ir 1.88%, bet HVO izmantošanas gadījumā – 0.86%, salīdzinot ar tīru fosilo dīzeļdegvielu.

Tā kā arī pētījumu programmā PP-4 ar tīru HVO un FDD tika darbināts traktors *Class Ares 557ATX*, nosakot īpatnējo degvielas patēriņu, var konstatēt, ka tur, izmantojot HVO, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, īpatnējais degvielas patēriņš pieauga vidēji par 4.1%. Un tas kārtējo reizi apliecina situācijas apskatā konstatēto, ka rezultāti ir atšķirīgi, ja atšķiras testētie spēkrati, to motori, degvielas iesmidzināšanas sistēmas u.tml.

Korejā (Kim et al., 2014) veiktajā pētījumā, piejaucot līdzīgu daudzumu HVO fosilajai dīzeļdegvielai, tika iegūts aptuveni 0.1 līdz 0.3% degvielas pieaugums, salīdzinot ar FDD. Lietuvā testējot motoru uz stenda (Rimkus et al., 2019), 10 – 30% HVO piejaukums samazināja degvielas masas patēriņu par 2 – 3%. Taču, vērtējot degvielas tilpuma patēriņa rādītājus, tika konstatēta pretēja tendence – rezultāti uzrādīja degvielas patēriņa pieaugumu līdz aptuveni 6% visos kloķvārpstas rotācijas ātruma un slodzes punktos.

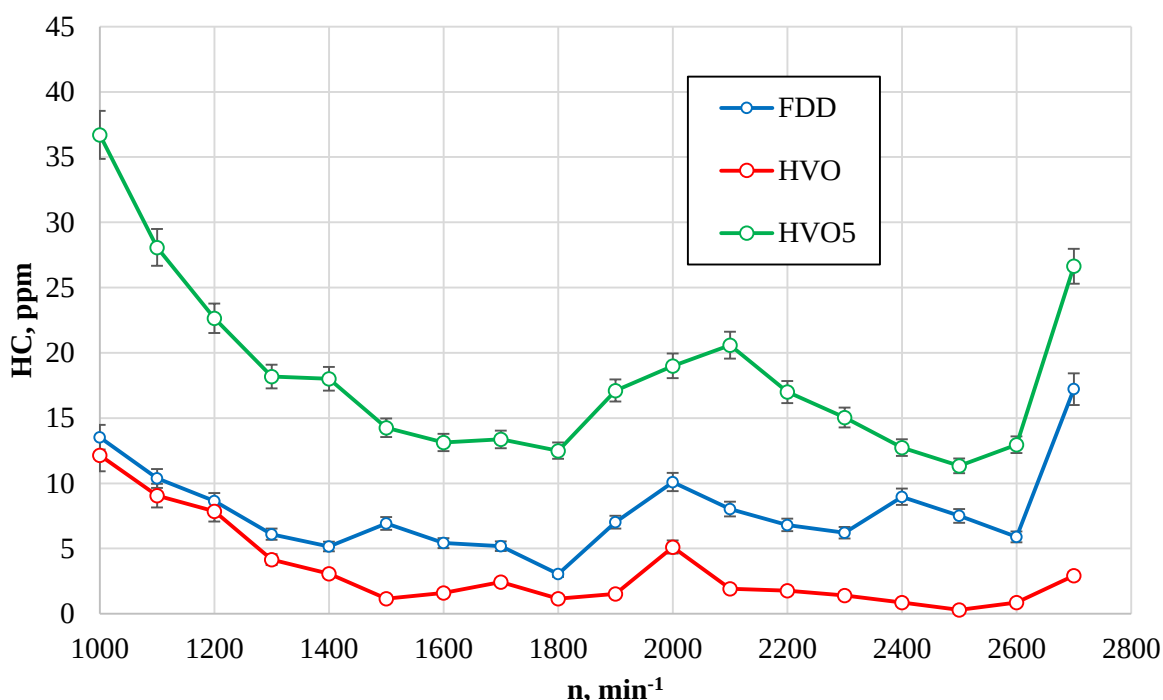
Atgāzu sastāva mērījumu rezultāti

NO_x , HC, CO_2 un CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot motoru ar trīs dažādām degvielām, pēc datu apstrādes (ticamības līmenis – 95%) dotas 3.25. – 3.28. attēlā. No ar katru degvielu veiktajiem 5 – 7 atkārtojumiem datu apstrādei tika atstāti vismaz četri – tie paši, kuri jaudas, griezes momenta un degvielas patēriņa analīzei.



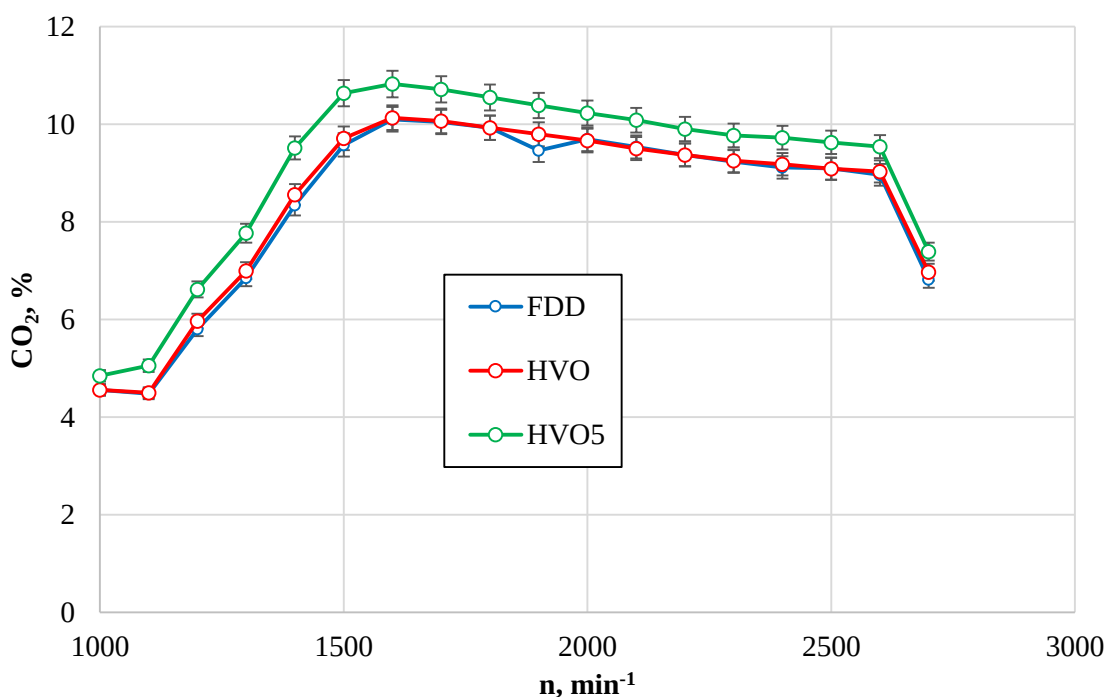
3.25. att. NO_x satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām

Ja par atskaites punktu pieņem NO_x saturu, darbinot motoru ar FDD, tad tīras HVO izmantošanas gadījumā NO_x saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā palielinājies vidēji par 3.0%, bet, izmantojot HVO5 degvielu, vidēji par 8.8%. NO_x izmešu maksimumi, izmantojot visas degvielas, veidojas pie apgriezieniem, kas sakrīt ar griezes momenta maksimumu, un 300 min^{-1} pirms apgriezieniem, kad tiek sasniegta maksimālā jauda.



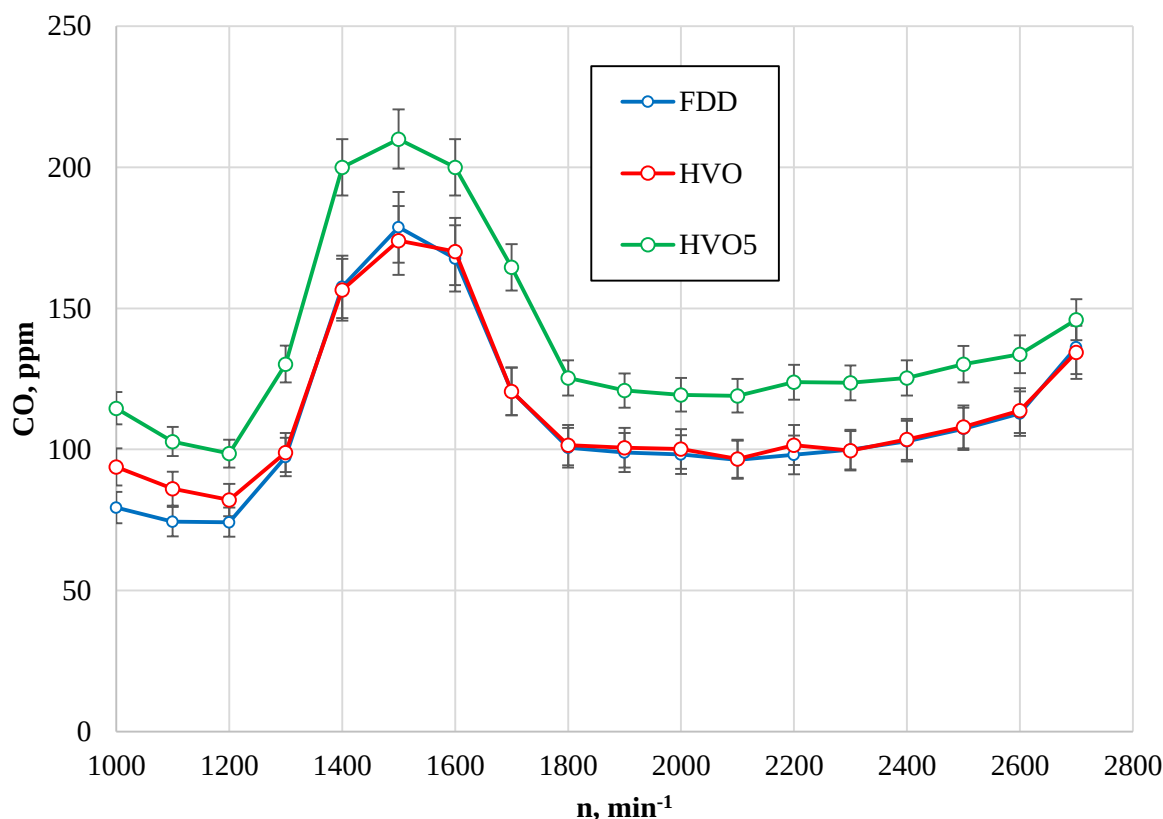
3.26. att. Nesadegušo ogļūdeņražu satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām

Tīras HVO izmantošanas gadījumā HC saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, samazinājies vidēji par 60%, bet, izmantojot HVO5 degvielu, palielinājies vidēji 1.45 reizes.



3.27. att. CO_2 satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām

Tīras HVO izmantošanas gadījumā CO₂ saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, palielinājies vidēji par 0.9% un šī atšķirība vērtējama kā nebūtiska bet, izmantojot HVO5 degvielu, vidēji par 8.4%. Salīdzinot CO₂ izmešu grafiku ar 3.23. attēla jaudas un griezes momenta raksturlīkņiem, redzams, ka šīs izmešu komponentes saturs tieši “seko” motora attīstītajam griezes momentam.



3.28. att. CO satura izmaiņas atgāzēs, darbinot eksperimentālo motoru ar trīs dažādām degvielām

Tīras HVO izmantošanas gadījumā CO saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, palielinājies vidēji par 3.0%, bet, izmantojot HVO5 degvielu, vidēji par 36%. Arī CO izmešu grafikam ir tieša sakarība ar griezes momenta raksturlīkni – šīs izmešu komponentes maksimums, izmantojot visas degvielas, veidojas pie apgriezieniem, kas sakrīt ar griezes momenta maksimumu.

Aplūkojot 3.25. – 3.28. attēlā dotos grafikus, sākotnēji iegūtie rezultāti šķiet pretēji loģikai, t.i., tiek sajauktas divas degvielas, kurām visu izmešu komponentu saturs ir praktiski vienāds (3% atšķirība izmešu pētījumos praksē netiek uzskatīta par nozīmīgu), bet maisījumdegviela tiek iegūta ar būtiski sliktākiem visu izmešu rādītājiem.

Tomēr, atgriežoties pie situācijas apskata, arī Portugālē veiktajos eksperimentos (Serrano et al., 2021), pētot degvielas ar nelielu biokomponentu piejaukumu, iegūtie izmešu rezultāti bija tikpat pretrunīgi. Turklāt apjomīgos pētījumu apkopojumos (No, 2014; Sonthalia, Kumar, 2019; Sunde et al., 2011; Szeto, Leung, 2022) akcentēts, ka visas HVO priekšrocības, izmantojot HVO un fosilās dīzeļdegvielas maisījumus, netiek izmantotas, kā arī izmešu tendences ir ļoti dažādas atkarībā no izmantotā motora veida, testa apstākļiem, konkrēto degvielu īpašībām, kā arī no tā, vai eksperimenti tiek veikti, izmantojot motorstendus vai spēkratus kopumā. Un arī šajā konkrētajā pētījumā atšķirīgās tendences no pārējās pētījumu programmās iegūtajiem rezultātiem varētu rasties dēļ tā, ka motors nav aprīkots ar atgāzu neitralizācijas sistēmu.

Būtiskākie pētījumu programmas PP-5 rezultāti publicēti (Smigins et al., 2023).

3.8. Pētījumu programmas PP-5 kopsavilkums

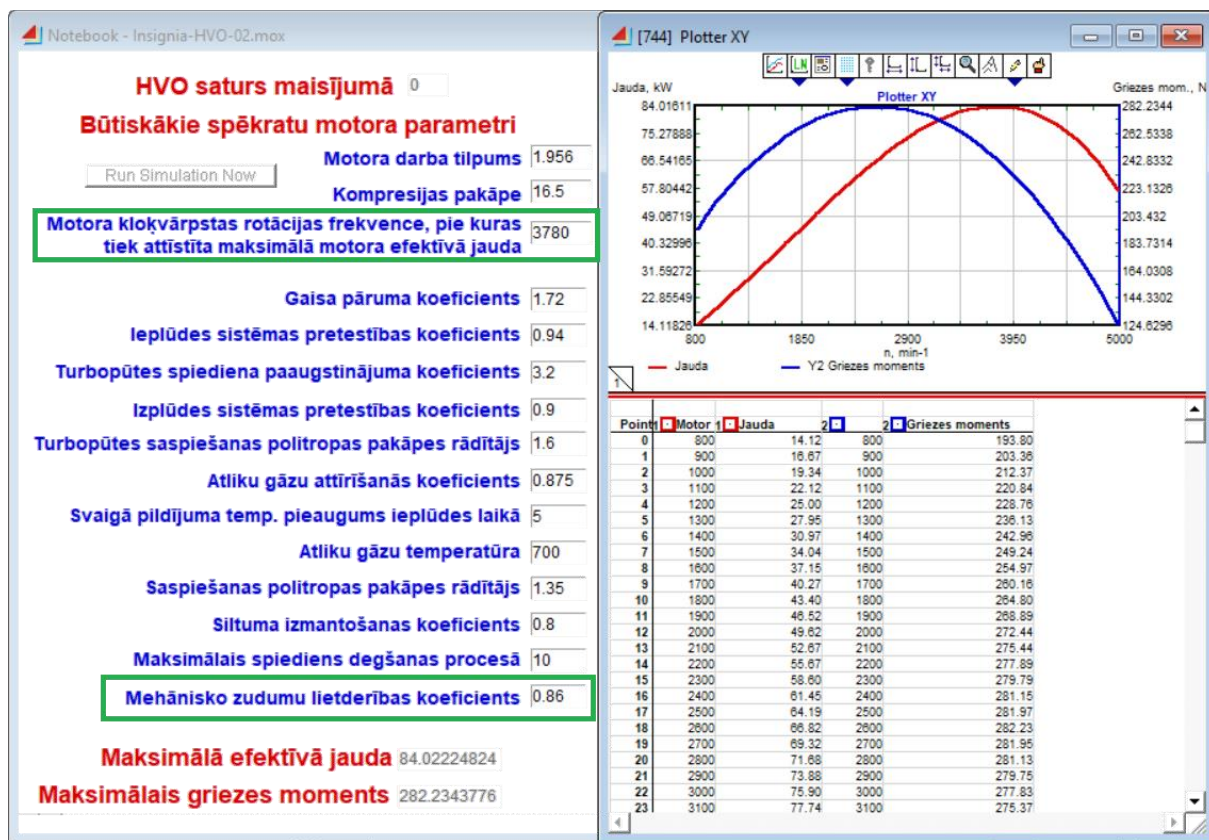
1. Eksperimentu rezultāti parāda, ka, darbinot motoru *KOHLER KDI 1903* ar HVO5, iegūta maksimālā jauda 26.2 kW pie 2600 min⁻¹ un maksimālais griezes moments 120.9 N m pie 1600 min⁻¹. Maksimālās jaudas pieaugums ir 2% un maksimālā griezes momenta pieaugums 2.4%, salīdzinot FDD (25.7 kW pie 2600 min⁻¹ un 118.1 N m pie 1600 min⁻¹). Darbinot motoru ar tīru HVO degvielu, iegūta maksimālā jauda 26.0 kW pie 2600 min⁻¹ un maksimālais griezes moments 119.5 N m pie 1600 min⁻¹. Maksimālās jaudas pieaugums ir 1.4% un maksimālā griezes momenta pieaugums 1.2%, salīdzinot ar FDD.
2. Darbinot motoru ar HVO5, maksimālais vidējais stundas degvielas patēriņš visā kloķvārpstas apgriezienu diapazonā ir par 2.34% lielāks nekā FDD, bet tīrai HVO tas ir par 1.00% lielāks nekā FDD. Salīdzinot īpatnējā degvielas patēriņa datus, vidēji visā analizētajā motora apgriezienu diapazonā īpatnējā degvielas patēriņa samazinājums HVO5 izmantošanas gadījumā ir 1.88%, bet HVO izmantošanas gadījumā – 0.86%, salīdzinot ar tīru fosilo dīzeļdegvielu.
3. Tīras HVO izmantošanas gadījumā NO_x saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, palielinājies vidēji par 3.0%, bet, izmantojot HVO5 degvielu, vidēji par 8.8%. HC saturs izmešos HVO izmantošanas gadījumā visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, samazinājies vidēji par 60%, bet, izmantojot HVO5 degvielu, palielinājies vidēji 1.45 reizes.
4. Tīras HVO izmantošanas gadījumā CO₂ saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, palielinājies vidēji par 0.9% un šī atšķirība vērtējama kā nebūtiska, bet, izmantojot HVO5 degvielu, vidēji par 8.4%. CO saturs izmešos HVO izmantošanas gadījumā visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, palielinājies vidēji par 3.0%, bet, izmantojot HVO5 degvielu, vidēji par 36%.
5. NO_x, CO₂ un CO izmešu grafikiem ir tieša sakarība ar griezes momenta raksturlīkni – šo izmešu komponentu maksimumi, izmantojot visas degvielas, veidojas pie apgriezieniem, kas sakrīt ar griezes momenta maksimumu.

3.9. Pētījumu programma PP-1 – teorētiskie pētījumi un to rezultāti

Automobiļa *Opel Insignia 2.0 CDTi* motora modelēšanas pētījumos vispirms analizētas degvielas, kas atbilst eksperimentālo pētījumu programmā PP-3 testētajām degvielām, t.i., tīra fosilā dīzeļdegviela un tās 7% maisījumi ar biodīzeļdegvielu un hidrogenēto augu eļļu (FDD, BioDD7 un HVO7).

Pēc tam modelēti HVO 15, 25 un 50% maisījumi ar dīzeļdegvielu, kā arī tīra hidrogenētā augu eļļa. Šādas maisījumu koncentrācijas modelēšanai izvēlētas, balstoties uz citās valstīs veikto pētījumu ieteikumiem, piemēram, Spānijas, Kolumbijas un ASV zinātnieki (Lapueta et al., 2011) uzskata, ka kompromiss starp HVO sliktākām eļļošanas īpašībām un augstāku cetānskaitli ir ieteikums lietot zemas vai vidējas HVO koncentrācijas (līdz 50%) maisījumus līdz brīdim, kad automobiļu ražotāji būs veikuši motoru vadības bloku kalibrēšanu, t.i., pielāgošanu tīras HVO izmantošanai (Hunicz et al., 2020). Aukstākos reģionos, t.sk. Latvijā īpaši ziemas laikā jāņem vērā arī degvielas maisījumu aukstās plūstamības īpašības. Katri 10% HVO degvielas maisījumā pasliktina aukstā filtra aizsprostošanos un saduļķošanās temperatūras attiecīgi par aptuveni 4.0 un 1.5 °C (Lapueta et al., 2011). Taču prakse pierāda, ka, pareizi izvēloties degvielas piedevas, šī problēma tiek atrisināta (skat. 2.3. tabulu). Pētījumu programmā PP-5 izmantotajai tīrajai HVO degvielai CFPP temperatūra bija tikai par 2 °C augstāka nekā tīrai dīzeļdegvielai (-38 °C pret -40 °C), bet saduļķošanās temperatūra pat par 6 °C zemāka (-34 °C pret -28 °C). Tomēr tīras HVO degvielas lietošana tuvākajā nākotnē ir mazāk iespējams scenārijs, jo šī degviela ir daudz dārgāka, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu (skat. 4.4. nodaļu).

3.29. attēlā parādīts modelēšanas ievades parametru piemērs tīras FDD izmantošanas gadījumā, ņemot vērā arī transmisijas lietderības koeficientu un ievadot motora kloķvārpstas rotācijas frekvenci, pie kuras tiek attīstīta maksimālā motora efektīvā jauda atbilstoši eksperimentālajiem pētījumiem (skat. 3.10. att.).



3.29. att. Modeļa mainīgo parametru ievades logs un jaudas un griezes momenta raksturlīknes un tās veidojošo datu punktu vērtības tīras FDD izmantošanas gadījumā

Salīdzinot ar eksperimentālajos pētījumos iegūto jaudu 84.10 kW, modeļa aprēķinātā (84.02 kW) atšķirība ir 0.1%. Savukārt, salīdzinot modelēšanas rezultātā un eksperimentos iegūtos griezes momentus (282.23 un 281.50 N m), atšķirība nepārsniedz 0.3%, tādējādi var secināt, ka modelis darbojas korekti.

Jaudas un griezes momenta modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili *Opel Insignia* ar FDD, BioDD7 un HVO7, doti 3.12. tabulā.

3.12. tabula. Jaudas un griezes momenta modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili *Opel Insignia* ar trīs dažādām degvielām

Parametrs	FDD	BioDD7	BioDD7 pret FDD	HVO7	HVO7 pret FDD	HVO7 pret BioDD7
N_{max} , kW	84.022	82.384	-1.99%	83.927	-0.11%	1.84%
M_{max} , N m	282.234	276.731	-1.99%	281.913	-0.11%	1.84%

Eksperimentālajos pētījumos (skat. 3.10. un 3.11. att.) tika konstatēts, ka maksimālās jaudas un griezes momenta atšķirības fosilajai dīzeļdegvielai un dīzeļdegvielai, kurai piejaukti 7% HVO degvielas, uzskatāmas par nebūtiskām, bet, darbinot automobili ar dīzeļdegvielu, kurai piejaukti 7% biodīzeļdegvielas, tiek attīstīta par 2.28% mazāka maksimālā jauda un par 1.5% mazāks griezes moments, salīdzinot ar HVO7 degvielu. Kā redzams no 3.12. tabulā aprēķinātajiem datiem, tad modeļpētījumu rezultāti ir tuvi eksperimentālajiem, t.i., HVO7 jaudas un griezes momenta atšķirība, salīdzinot ar FDD (0.11%), ir nebūtiska, bet, salīdzinot ar BioDD7, tiek attīstīta gandrīz par 2% augstāka jauda un griezes moments.

Tā kā būtisks spēkratu ekspluatācijas parametrs ir degvielas patēriņš, kas savukārt atkarīgs no degvielu maisījumu siltumspējas un blīvuma, veikti modeļpētījumi, izmantojot modelim pievienotos blokus, kas parādīti 2.21. un 2.28. attēlā. Modelēšanas rezultāti doti 3.13. tabulā.

3.13. tabula. **Zemākās siltumspējas, blīvuma un degvielas patēriņa modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili Opel Insignia ar trīs dažādām degvielām**

Parametrs	FDD	BioDD7	BioDD7 pret FDD	HVO7	HVO7 pret FDD	HVO7 pret BioDD7
Q_z , kJ kg ⁻¹	42210	41942	-0.64%	42348	0.33%	0.96%
ρ , kg m ⁻³	833.9	837.3	0.41%	830.1	-0.46%	-0.87%
G_T , kg h ⁻¹	7.243	7.292	0.67%	7.219	-0.33%	-1.01%
g , l h ⁻¹	8.685	8.709	0.28%	8.697	0.14%	-0.14%

Lai gan aprēķinātās (teorētiskās) zemākās siltumspējas vērtības tīrām degvielām ir krasi atšķirīgas (FDD – 42210 kJ kg⁻¹, HVO – 44185 kJ kg⁻¹, BioDD – 38380 kJ kg⁻¹), tomēr neliela satura piejaukumiem (šajā gadījumā 7%) maisījumu siltumspēju atšķirības nav lielas. Salīdzinot ar FDD, HVO7 maisījumam tā ir par 0.33% augstāka, bet BioDD7 par 0.64% zemāka. Šīs starpības transformējas skaitliski līdzīgās degvielas stundas patēriņa izmaiņās – HVO7 0.33% samazinājums, bet BioDD7 0.67% palielinājums. Tomēr šāda uz degvielas masu balstīta interpretācija nav korekta, jo dīzeļdegvielas iesmidzināšanas un padeves sistēmas piegādā degvielu pēc tilpuma. Pārrēķinot stundas degvielas patēriņu uz litriem stundā (pie motora kloķvārpstas griešanās frekvences n_{max} , kad tiek attīstīta maksimālā efektīvā motora jauda N_{max}), īpatnējais degvielas patēriņa samazinājums pārvēršas nelielā pieaugumā – 7% HVO degvielas maisījuma lietošanas gadījumā aptuveni 0.14%, kas ir tuvu eksperimentos vidējai visos braukšanas režīmos konstatētajai atšķirībai. Degvielas patēriņa modeļpētījumi apliecina, ka HVO ir perspektīva biodegviela, lai aizstātu tradicionālo biodīzeļdegvielu degvielas maisījumos. Piebilstams, ka eksperimentālajos pētījumos HVO7 un BioDD7 degvielas patēriņa atšķirības bija lielākas, salīdzinot ar modeļpētījumiem.

Jaudas, griezes momenta, zemākās siltumspējas, blīvuma un degvielas patēriņa modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili Opel Insignia ar FDD, HVO15, HVO25, HVO50 un HVO, doti 3.14. tabulā.

3.14. tabula. **Modeļpētījumu rezultāti, darbinot automobili Opel Insignia ar piecām dažādām degvielām**

Parametrs	FDD	HVO15	HVO15 pret FDD	HVO25	HVO50	HVO	HVO pret FDD
N_{max} , kW	84.022	83.820	-0.24%	83.692	83.396	82.916	-1.33%
M_{max} , N m	282.234	281.557	-0.24%	281.127	280.132	278.519	-1.33%
Q_z , kJ kg ⁻¹	42210	42506	0.70%	42704	43198	44185	4.47%
ρ , kg m ⁻³	833.9	825.7	-0.99%	820.2	806.4	778.9	-7.06%
G_T , kg h ⁻¹	7.243	7.193	-0.70%	7.160	7.078	6.922	-4.64%
g , l h ⁻¹	8.685	8.711	0.30%	8.730	8.778	8.886	2.26%

Simulācijas rezultāti liecina, ka katri 5% HVO degvielas maisījumā samazina maksimālo jaudu un griezes momentu aptuveni par 0.07%, sasniedzot maksimālo jaudas un griezes momenta starpību 100% HVO izmantošanas gadījumā – 1.33%. Ņemot vērā, ka 15% HVO un 85% fosilās dīzeļdegvielas maisījums ir visreālākais scenārijs tuvākajā nākotnē (to arī praktizē degvielas tirgotāji vasaras mēnešos), paredzamais jaudas un griezes momenta samazinājums (0.24%) ir nenozīmīgs transportlīdzekļu ekspluatācijā.

Modeļpētījumu rezultāti liecina, ka tīras HVO izmantošanas gadījumā var prognozēt 2.26% degvielas patēriņa pieaugumu, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu. Aplūkojot visreālāko tuvākās nākotnes scenāriju, t.i., HVO15 maisījumu, prognozētais degvielas patēriņa pieaugums ir 0.30%. Tas nozīmē, ka no abiem galvenajiem darbības aspektiem – dinamikas un ekonomijas,

arī teorētiskie pētījumi HVO identificē kā perspektīvu biodegvielu, lai aizstātu biodīzeļdegvielu degvielas maisījumos un veicinātu ES direktīvās un regulās noteikto mērķu sasniegšanu.

Arī eksperimentālo pētījumu programmā PP-2 (skat. 3.2. att. un 3.1. tabulu) tika konstatēts, ka maksimālās jaudas un griezes momenta atšķirības fosilajai dīzeļdegvielai un tīrai HVO uzskatāmas par nebūtiskām, bet degvielas patēriņa eksperimentālie rezultāti ir par 1.7% sliktāki nekā modeļa prognozētie.

Būtiskākie pētījumu programmas PP-1 rezultāti publicēti (Sondors, Dukulis, 2014).

3.10. Pētījumu programmas PP-1 kopsavilkums

1. Izmantojot *ExtendSim* programmatūru, ir pielāgots iepriekš LBTU Tehniskajā fakultātē izstrādāts matemātiskais modelis, kas piemērots, lai prognozētu dīzeļmotoru darbības parametrus, kad tos darbina ar HVO, biodīzeļdegvielu un to maisījumiem ar fosilo dīzeļdegvielu.
2. Modeļpētījumu rezultāti ir tuvi eksperimentālajā pētījumu programmā PP-3 iegūtajiem, t.i., HVO7 jaudas un griezes momenta atšķirība, salīdzinot ar FDD, ir nebūtiska, bet, salīdzinot ar BioDD7, tiek attīstīta gandrīz par 2% augstāka jauda un griezes moments. Modelējot degvielas patēriņu, HVO7 un FDD atšķirību tendences ir līdzīgas eksperimentos konstatētajām, bet eksperimentālajos pētījumos HVO7 un BioDD7 degvielas patēriņa atšķirības bija lielākas, salīdzinot ar modeļpētījumiem.
3. Simulācijas rezultāti liecina, ka tīras HVO izmantošanas gadījumā, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, maksimālās jaudas un griezes momenta samazinājums var sasniegt 1.33%, bet degvielas patēriņa pieaugums – 2.26%.
4. Aplūkojot reālāko tuvākās nākotnes scenāriju, t.i., maisījumdegvielas HVO15 izmantošanu, prognozētais jaudas un griezes momenta samazinājums 0.24% un degvielas patēriņa pieaugums 0.30% ir nenoīmīgi transportlīdzekļu ekspluatācijā.

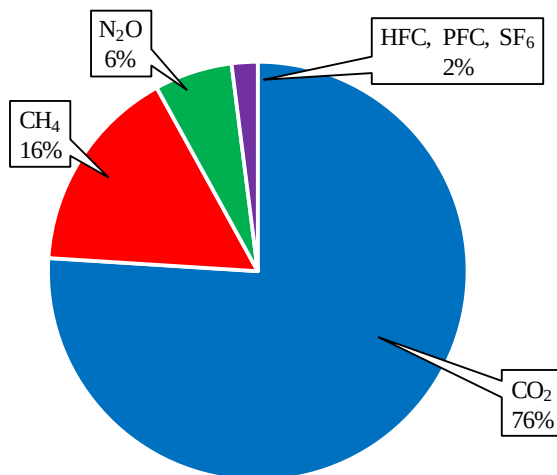
4. HIDROGENĒTAS AUGU EĻĻAS IZMANTOŠANAS EKOLOĢISKAIS UN EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS

Apkārtējā gaisa piesārņojums ir būtiskākais vides veselības riska faktors pasaulē. Aptuveni 3.5 miljoni priekšlaicīgas nāves gadījumi 2017. gadā no insulta, plaušu vēža, diabēta un apakšējo elpceļu infekcijām saistīti ar gaisa piesārņojumu. Transporta nozares radītais piesārņojams attiecināms uz 361000 un 385000 priekšlaicīgiem nāves gadījumiem 2010. un 2015. gadā. 2015. gadā 84% no priekšlaicīgiem nāves gadījumiem, kas saistīti ar transporta nozares radīto piesārņojumu, bija G20 valstīs (Anenberg et al., 2019).

Vērtējot jebkuras degvielas izmantošanu spēkratos, jāizdala divi aspekti – kaitīgie izmeši, kas tiešā veidā īslaicīgi vai ilglaicīgi kaitē cilvēku veselībai un videi, un izmeši, kas ietilpst SEG emisiju grupā un ietekmē visu planētu kopumā – turklāt ilgtermiņā. Tāpēc visos promocijas darba ievadā minētajos ANO, ES un Latvijas rīcībpolitikas dokumentos un normatīvajos aktos, piemēram, “Parīzes nolīgumā” (European Parliament, 2016), “Eiropas Zaļajā kursā” (European Commission, 2019), “Eiropas Klimata likumā” (European Parliament, 2021), “Transporta attīstības pamatnostādņēs 2021. – 2027. gadam” (LR Ministru kabinets, 2021) u.c. līdztekus mērķrādītājiem atjaunojamās degvielas ieviešanā kā būtiskākais parametrs tiek noteikts SEG emisiju samazinājums.

SEG ir dabiskas un antropogēnas izcelsmes atmosfēras gāzveida sastāvdaļas, kas absorbē un reemitē infrasarkanā starojumu. Tiešās siltumnīcefekta gāzes ir oglekļa dioksīds (CO_2), metāns (CH_4), vienvērtīgā slāpekļa oksīds (N_2O), fluorogļūdeņraži (HFC), perfluorogļūdeņraži (PFC) un sēra heksafluorīds (SF_6), bet netiešās – oglekļa monoksīds (CO), slāpekļa oksīdi (NO_x) un nemetāna gaistošie organiskie savienojumi (Grid National, 2023).

Analizējot 4.1. attēlā doto tiešo siltumnīcefekta gāzu apjomu procentos (Center for Climate and Energy Solutions, n.d.), CO_2 veido aptuveni 76% no kopējām siltumnīcefekta gāzu emisijām. Metāns, galvenokārt no lauksaimniecības, rada 16% procentus, bet slāpekļa oksīds, galvenokārt no rūpniecības un lauksaimniecības – 6% no globālajām emisijām. Visi skaitļi šeit ir izteikti CO_2 ekvivalentos.



4.1. att. Tiešo siltumnīcefekta gāzu apjoms procentos pasaulē

CO_2 , CH_4 un N_2O izdalās ne tikai no transporta, bet arī citos procesos, piemēram, CO_2 – vulkāna izvirdumos, augu, dzīvnieku un cilvēku elpošanā, metāns – dabiski sadaloties, bet cilvēka darbība ir likvidējusi dabisko līdzsvaru, jo lielu metāna daudzumu izdala liellopu audzēšana, poligonu atkritumu izgāztuves, rīsu audzēšana un tradicionālā naftas un gāzes ražošana. Savukārt slāpekļa oksīdu rada organiskā mēslojuma izmantošana, fosilā kurināmā sadedzināšana, slāpekļskābes ražošana u.c. procesi.

Trīs rūpnieciskās fluorētās gāzes – HFC, PFC un SF_6 ir tikai cilvēka radītas rūpniecisko procesu laikā un dabā nav sastopamas. Lai gan tās atmosfērā nonāk mazā koncentrācijā, tās ļoti efektīvi aiztur siltumu un ir kaitīgas. Piemēram, SF_6 , ko rada augstsprieguma elektroenerģijas

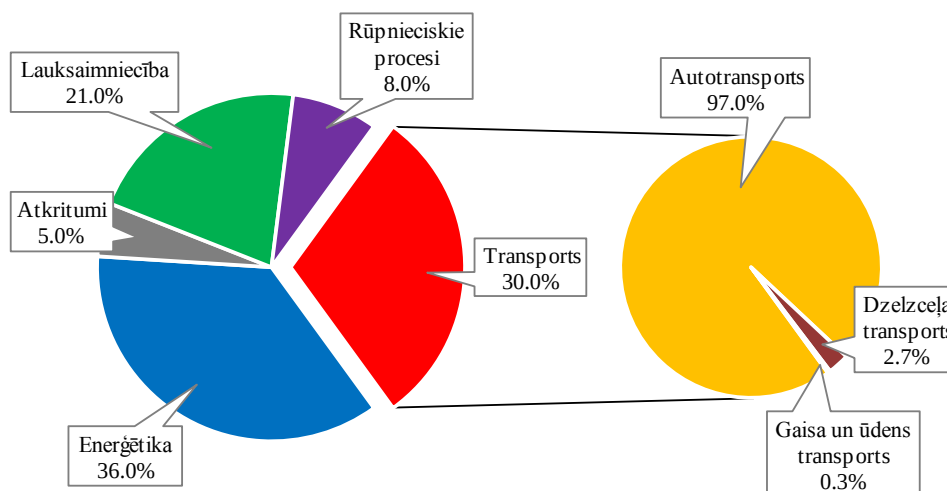
iekārtas, globālās sasilšanas potenciāls ir 23000 reižu lielāks nekā CO₂ (Grid National, 2023). Transporta radītajos izmešos šīs gāzes tiek radītas maz vai praktiski nemaz, tāpēc turpmāk šī 2% no kopējā siltumnīcefekta gāzu apjoma veidojošā grupa netiek aplūkota.

Lai varētu veikt turpmāko analīzi, jāizprot CO₂ ekvivalenta jēdziens. To parasti apzīmē ar CO₂e un izmanto, lai standartizētu dažādu siltumnīcefekta gāzu ietekmi uz klimatu.

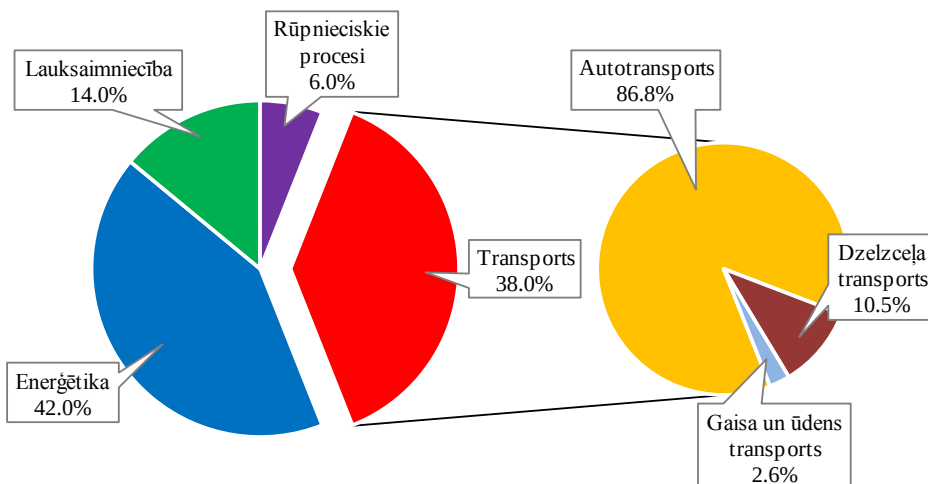
Lai dažādu siltumnīcefekta gāzu ietekmi padarītu salīdzināmu, ANO Klimata pārmaiņu starpvaldību padome (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) ir definējusi tā saukto globālās sasilšanas potenciālu. Šis indekss izsaka noteikta siltumnīcefekta gāzes daudzuma sasilšanas efektu noteiktā laika periodā (parasti 100 gadus) salīdzinājumā ar CO₂. Piemēram, metāna ietekme uz klimatu ir 28 reizes spēcīgāka nekā CO₂, bet atmosfērā tas nepaliek tik ilgi. Slāpekļa oksīda ietekme uz vidi gandrīz 300 reizes pārsniedz CO₂ ietekmi. Šo siltumnīcefekta gāzu antropogēno avotu var atrast lopkopībā un lauksaimniecībā, izmantojot slāpekļa mēslojumu. Tādā veidā siltumnīcefekta gāzes var aprēķināt kā CO₂ ekvivalentus (Foundation myclimate, n.d.).

IPCC katras SEG gāzes globālo sasilšanas potenciālu ik pēc kāda laika maina. Līdz 2022. gadam SEG aprēķinos tiek rekomendēts izmantot IPCC AR4 (*Fourth Assessment Report*), bet kopš 2023. gada – IPCC AR5 (*Fifth Assessment Report*). Saskaņā ar AR4 metāna globālās sasilšanas indekss bija 25, bet slāpekļa oksīda – 298. AR5 šie indeksi tika precizēti attiecīgi uz 28 un 265 (Greenhouse Gas Protocol, n.d.).

Katrā valstī atkarībā no dažādu nozaru attīstības, klimatiskajiem apstākļiem u.c. faktoriem atšķiras gan siltumnīcefekta gāzu emisiju, gan slāpekļa oksīdu radītāju procentuālais sadalījums pa jomām. Par Latviju šie dati apkopoti 4.2. un 4.3. attēlā (Helmane, 2023).



4.2. att. Siltumnīcefekta gāzu emisijas Latvijā 2021. gadā



4.3. att. Slāpekļa oksīdu emisijas Latvijā 2021. gadā

Vislielākais SEG radītājs Latvijas transporta sektorā ir autotransports – 2021. gadā tas veidoja 97% no kopējām sektora emisijām. Turklāt, salīdzinot ar 2005. gadu, autotransporta emisijas palielinājušās par 11.2% (Helmane, 2023). Autotransports ir “atbildīgs” arī par nozīmīgu daļu (gandrīz 87%) no visām transporta radītajām slāpekļa oksīdu emisijām.

Tā kā pētījumu programmu PP-2 un PP-3 pētījumu objekts bija ar dīzeļdegvielu darbināms vieglais automobilis, tad jāaplūko, vai tas atbilst “tipiskam” SEG emisiju radītājam mūsu valstī.

Statistikas dati parāda, ka aptuveni 86% no visa autotransporta veido viegie automobiļi. Savukārt no visa autoparka ar dīzeļdegvielu tiek darbināti 67% spēkratu, un Latvijā ir otrais lielākais šāda veida automobiļu īpatsvars Eiropā. Vērtējot dīzeļdegvielas kopējā patēriņa īpatsvaru transporta sektorā, tas ir vēl augstāks, t.i., 78.9%, bet pēc atjaunojamās enerģijas izmantošanas apjoma transporta sektorā Latvija ES ir piektā no beigām. Latvijas autoparkā 72% automobiļi ir lietoti, bet automobiļu vidējais vecums ir 14.9 gadi (Helmane, 2023).

Tādējādi pētījumu objektu – automobili *Opel Insignia* var uzskatīt par tipisku Latvijas autoparka pārstāvi un izmantot aprēķina piemērā, kur noteikts iespējamais HVO degvielas potenciāls SEG emisiju samazināšanā.

Lai to veiktu, var izmantot vairākas metodes:

- tiešsaistes vai lejuplādējumus SEG emisiju kalkulatorus, kuri piemēroti aprēķiniem transporta sektorā;
- siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķina metodiku, kas noteikta LR MK noteikumos Nr. 42 (LR Ministru kabinets, 2018);
- veikt aprēķinus, balstoties uz eksperimentos iegūtajiem datiem.

4.1. SEG emisiju kalkulatoru izmantošana

Ņemot vērā to, ka SEG emisiju samazināšana ir aktuāla problēma visā pasaulē, dažādi SEG emisiju kalkulatori izstrādāti dažādos formātos un valodās. Daži no tiem paredzēti aprēķiniem kādā konkrētā jomā, bet citi ir daudzfunkcionāli, kas pamatā domāti kāda konkrēta uzņēmuma vai organizācijas ietekmes noteikšanai, ietverot uzņēmuma siltuma, ūdens un elektroapgādi, atkritumu saimniecību, tehnikas parku, paradumus un transportu komandējumus, lietotās informācijas un komunikāciju tehnoloģijas u.c. Tomēr arī šādi kalkulatori teorētiski ir izmantojumi, jo tajos var norādīt, ka uzņēmumā ir tikai viens automobilis, līdz ar to aprēķini tiek veikti.

Tomēr, izmēģinot gandrīz 20 dažādus tiešsaistes un lejuplādējamus izklājlapu lietotnēs darbināmus kalkulatorus, piemēram, *Greenhouse Gas Emissions Calculator* (United Nations, 2021), *Simplified GHG Emissions Calculator* (USA EPA, 2022), atklājās vairākas šo rīku nepilnības. Ja visas tās dod iespēju kā degvielu izvēlēties fosilo dīzeļdegvielu, vairums – arī 1. paaudzes biodīzeļdegvielu, tad jaunākās paaudzes degvielas, t.sk. HVO, tur nav pievienotas. Ņemot vērā, ka visu izklājlapu šūnas ir aizslēgtas ne tikai rediģēšanai, bet arī apskatei, nav iespējams pārliecināties, kādas sakarības tiek izmantotas aprēķinu veikšanā. Protams, nav iespējama arī jaunu degvielu un to parametru pievienošana.

Tieši tādas pat problēmas atklājas vienkāršos tiešsaistes rīkos. HVO degviela nav pievienota nevienā no tiem, bet par to aprēķinu precizitāti var spriest, ja tajos ievada identiskus parametrus fosilās dīzeļdegvielas izmantošanā.

Kā piemēri 4.4. attēlā parādīti divi atšķirīgi rezultāti scenārijam, ja vieglā automobiļa *Opel Insignia* vidējais plānotais gada nobraukums gadā būtu 20 000 km, bet vidējais degvielas patēriņš, darbinot to ar fosilo dīzeļdegvielu, būtu 6.44 litri uz 100 km (patēriņš ņemts no eksperimentālajiem pētījumiem, veicot kombinēto IM-240 ciklu). Latvijas tīmekļa vietnē pieejamā kalkulatora *Siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju kalkulators* (Klimata pārmaiņu portāls, 2021) rezultāts ir 3.43 tonnas CO₂e gadā. Turklāt šī kalkulatora ievades datu lauks “CO₂ emisijas faktors enerģijai no atjaunojamiem energoresursiem” ir nepieejams informācijas

ievadīšanai. Šveices tīmekļa vietnē pieejamā kalkulatora *CO₂ emissions calculator for your car* (MyClimate, 2022) rezultāts ir 6.00 tonnas CO₂e gadā. Kā redzams, tad rezultāti atšķiras gandrīz divas reizes, tāpēc šādus kalkulatorus nav droši izmantot SEG emisiju novērtējumā.

Siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju kalkulators

Transports

Aprēķins pasākumiem, kuros paredzēta fosilos energoresursus izmantojoša transportlīdzekļa noma ar transportlīdzekli, kas izmanto no atjaunojamiem energoresursiem iegūtu biodegvielu

Metodiku piemēro pasākumiem, kuros paredzēta fosilos energoresursus izmantojoša transportlīdzekļa noma ar transportlīdzekli, kas izmanto no atjaunojamiem energoresursiem iegūtu biodegvielu (tai skaitā biogāzi, biodīzeldegvielu, bioetanolu)

Ievades dati pirms pasākuma īstenošanas:

Degvielas veids, atbilstoši transportlīdzekļa tipam

Dīzeldegviela (Autotransports, Dzelzceļš, Jūras transports)

Transportlīdzekļa vidējais izlīdzinātais degvielas patēriņš, l/100km

6,44

Transportlīdzekļa vidējais nobraukums gadā kopš tā pirmreizējās reģistrācijas Latvijā, km/gadā

20000

Ievades dati pēc pasākuma īstenošanas:

CO₂ emisijas faktors enerģijai no atjaunojamiem energoresursiem, tCO₂/MWh

0

APRĒĶINĀT

Rezultāts (pirms pasākuma īstenošanas)

3.43

tCO₂ ekv./gadā

Aprēķinātais SEG emisiju apjoms pirms pasākuma īstenošanas

Rezultāts (pēc pasākuma īstenošanas)

0

tCO₂ ekv./gadā

Aprēķinātais SEG emisiju apjoms pēc pasākuma īstenošanas

Izmaiņas

3.43

tCO₂ ekv./gadā

(100%)

SEG emisiju apjoma izmaiņas 3.43 tCO₂ ekv./gadā vai 100%

CO₂ emissions calculator for your car

Calculate your car emissions and make a contribution to climate protection:

Distance traveled

20000

km

+1000 +500 +100 =0

Fuel type

Diesel

Fuel consumption

6.44

Liters/100km

Your Trip:

Calculation of a distance of 20,000 km, Fuel: Diesel

CALCULATE

CO₂ amount: 6.0 t

4.4. att. Divu SEG emisiju kalkulatoru viena scenārija modelēšanas rezultāti

4.2. LR MK noteikumos noteiktās SEG emisiju metodikas izmantošana

Lai aprēķinātu SEG emisiju apjomu pirms un pēc pasākuma īstenošanas (šajā gadījumā pieņemot, ka fosilo degvielu aizvieto ar tīru HVO), izmanto pasākumu raksturojošos datus. Ja pirms vai pēc pasākuma īstenošanas tiek izmantoti dažādi energoresursu vai enerģijas avotu veidi, SEG emisiju apjoma aprēķinu veic katram izmantotajam energoresursu vai enerģijas avotu veidam atsevišķi (LR Ministru kabinets, 2018). Šajā aprēķinā izmantoti mainīgo apzīmējumi un mērvienības, kā tie norādīti MK noteikumos.

SEG emisiju apjomu pirms pasākuma īstenošanas no transportlīdzekļa, kas izmanto fosilās izcelsmes degvielu, aprēķina, izmantojot formulu:

$$m_{SEG_{pirms}} = \frac{L \cdot C}{1000} \cdot \rho \cdot Q_z^d \cdot K_{CO_2}, \quad (4.1)$$

kur $m_{SEG_{pirms}}$ – SEG emisiju apjoms pirms pasākuma īstenošanas, t CO₂e gadā;

L – transportlīdzekļa vidējais izlīdzinātais degvielas patēriņš, l km⁻¹ (ņemts no eksperimentālajiem pētījumiem, veicot kombinēto ciklu – 0.0644);

C – transportlīdzekļa vidējais nobraukums gadā kopš tā pirmreizējās reģistrācijas Latvijā, km gads⁻¹ (pieņemts 20000);

1000 – koeficients degvielas patēriņa pārejai no litriem uz kubikmetriem;

ρ – fosilās izcelsmes degvielas blīvums, t m⁻³ (no MK noteikumu pielikuma 0.8370, eksperimentos izmantotajai degvielai 0.8363);

Q_z^d – fosilās izcelsmes degvielas zemākais sadegšanas siltums, TJ t⁻¹ (no MK noteikumu pielikuma 0.0430, eksperimentos izmantotajai degvielai 0.0435);

K_{CO_2} – CO₂ emisijas faktors fosilajai degvielai, t CO₂ TJ⁻¹ (no MK noteikumu pielikuma 74).

Aprēķinos izmantojot MK noteikumu vērtības, SEG emisiju apjoms pirms pasākuma īstenošanas ir 3.470 t CO₂e gadā. Izmantojot eksperimentos izmantotās degvielas vērtības, šis lielums ir faktiski identisks, t.i., 3.467 t CO₂e gadā. Kā redzams, tad šis skaitlis ir ļoti tuvs 4.4. attēlā redzamā kalkulatora *Siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju kalkulators* (Klimata pārmaiņu portāls, 2021) rezultātam. Tā kā šis kalkulators ir veidots Latvijā, tad visticamāk to darbina formulas saskaņā ar MK noteikumiem, kur arī rodams skaidrojums, kāpēc kalkulatora ievades datu lauks “CO₂ emisijas faktors enerģijai no atjaunojamiem energoresursiem” ir nepieejams informācijas ievadīšanai – MK noteikumu 40.4. punktā teikts, ka, ja fosilos energoresursus izmantojošu transportlīdzekli nomaina ar transportlīdzekli, kas izmanto no atjaunojamiem energoresursiem iegūtu biodegvielu, SEG emisiju apjoms pēc pasākuma īstenošanas ir 0 t CO₂e gadā. Vadoties no MK noteikumu 9. punkta (LR Ministru kabinets, 2018), SEG emisiju apjoma izmaiņas aprēķina, izmantojot formulu:

$$m_{SEG_{izm}} = m_{SEG_{pirms}} - m_{SEG_{pec}}, \quad (4.2)$$

kur $m_{SEG_{izm}}$ – SEG emisiju apjoma izmaiņas, t CO₂e gadā;

$m_{SEG_{pirms}}$ – SEG emisiju apjoms pirms pasākuma īstenošanas, t CO₂e gadā;

$m_{SEG_{pec}}$ – SEG emisiju apjoms pēc pasākuma īstenošanas, t CO₂e gadā.

Šīs formulas rezultāts, protams, sakrīt ar SEG emisiju apjomu pirms pasākuma īstenošanas, t.i., ar 3.470 t CO₂e gadā. Skaidrojums ir tāds, ka HVO radītās SEG emisijas klasificē kā atjaunojamo energoresursu radītas pretstatā fosilās dīzeļdegvielas kā naftas produktu radītas. Taču eksperimenti visā pasaulē pierāda, ka arī HVO izmantošanas gadījumā izmešos ir liels CO₂ u.c. kaitīgo komponentu daudzums.

Tāpēc pirms novērtēt eksperimentālajos pētījumos iegūtas SEG emisiju izmaiņas, saskaņā ar MK noteikumu metodiku iegūto skaitli var salīdzināt ar dažādos informācijas avotos atrastajiem. Vienā no tiem (Johnston Oils, 2023) minēts fakts, ka uz katriem 1000 litriem sadedzinātās dīzeļdegvielas tiek radītas 3.6 t CO₂e, salīdzinot ar tikai 195 kg, ko rada katri sadedzinātie 1000 litri HVO. Bet jāpiebilst, ka tā ir informācija no HVO ražotāja, kas var arī nebūt objektīva. Zviedrijā veiktajā pētījumā (Andersson, Börjesson, 2021) dots HVO degvielas CO₂ ekvivalents – 8.8 g MJ⁻¹ (arī t TJ⁻¹). Līdz ar to var izmantot eksperimentos izmantotās degvielas patēriņa, blīvuma un sadegšanas siltuma vērtības, lai pēc formulas (4.1) aprēķinātu reālistiskāku SEG emisiju apjomu pēc pasākuma īstenošanas:

$$m_{SEG_{pec}} = \frac{0.0664 \cdot 20000}{1000} \cdot 0.7789 \cdot 0.0439 \cdot 8.8 \approx 0.40 \text{ t CO}_2\text{e gadā.}$$

Tad pēc formulas (4.2) var aprēķināt potenciālās SEG emisiju apjoma izmaiņas – samazinājumu par 3.07 t CO₂e gadā. Tātad samazinājums ir aptuveni 88%. Tas ir mazāk nekā iepriekš minētais HVO ražotāja norādītais 94.6% (Johnston Oils, 2023), bet ražotāji bieži uzrāda optimistiskākus rādītājus.

4.3. SEG emisiju aprēķins, balstoties uz eksperimentos iegūtajiem datiem

Testējot spēkratus ar mērķi noteikt izmaiņas izmešu sastāvā, izmantojot biodegvielas, jau vairākus gadu desmitus pētnieki visā pasaulē salīdzināšanai izmanto vienus un tos pašus parametrus – parasti NO_x, CO, CO₂, SO₂ un nesadegušos oglekļaūdeņražus HC. Tomēr tie visi nav attiecināmi kā tiešās siltumnīcefekta gāzes. Ja vienmēr no šīs grupas tiek noteikts CO₂ saturs atgāzēs, tad CO un NO_x pieder pie netiešajām SEG gāzēm, bet CH₄ ir viena no nesadegušo oglekļaūdeņražu komponentēm, bet N₂O (kas neietilpst NO_x sastāvā) pieminēts tikai atsevišķās publikācijās.

Piemēram, ASV veiktajā pētījumā (Na et al., 2015) raksta vienā nodaļā analizētas klasiskās izmešu komponentes, bet nodaļā “Siltumnīcefekta gāzu emisijas” īpaša vērība pievērsta CO₂ un N₂O. CO₂ izmešu daudzums, izmantojot HVO, samazinājās par aptuveni 6% salīdzinājumā ar FDD, bet N₂O nedaudz palielinājās, tomēr šis palielinājums tika novērtēts kā statistiski nenozīmīgs.

Atgriežoties pie šī promocijas darba eksperimentālo pētījumu programmu rezultātiem, arī te analizētas tieši tās komponentes, kas parasti tiek salīdzinātas dažādu biodegvielu pētījumos pasaulē.

Analizējot izplūdes gāzes, visām šīm komponentēm, darbinot automobili *Opel Insignia* ar HVO degvielu, ir tendence samazināties, salīdzinot pret FDD. Turklāt samazinājums konstatēts visos testētajos kustības režīmos. NO_x dažādos režīmos samazinājās vidēji par 6.8%, HC – par 37.5%, SO₂ – par 13.1%, CO₂ – par 5.0%. Tvana gāzes (CO) atgāzēs, izmantojot HVO degvielu, nebija vispār.

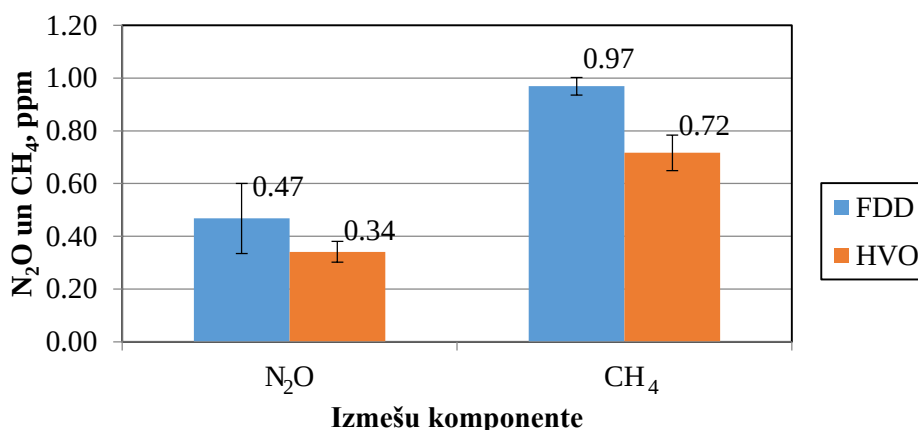
Savukārt traktora *Class Ares 557ATX* eksperimentālajos pētījumos ar HVO degvielu vidējais NO_x samazinājums, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, bija 11.8%. Samazinājās arī kopējo nesadegušo oglekļaūdeņražu HC, CO un CO₂ daudzums – attiecīgi par 26.4, 14.5 un 5.2%. Tādējādi tīras HVO degvielas izmantošanai ir pozitīva ietekme uz vidi.

Darbinot automobili *Opel Insignia* ar fosilās dīzeļdegvielas 7% maisījumiem ar biodīzeļdegvielu (BioDD7) un HVO (HVO7) un salīdzinot tās gan savstarpēji, gan ar FDD, tika konstatēts, ka, lietojot HVO7 degvielu, CO₂ saturs atgāzēs, salīdzinot ar FDD, praktiski nemainās, aptuveni par 4.5% samazinās NO_x un par 9% SO₂ saturs. Nesadegušie oglekļaūdeņraži palielinās aptuveni par 15%, bet CO – aptuveni 2 reizes. Lietojot HVO7 degvielu, salīdzinot ar BioDD7 degvielu, aptuveni par 4% samazinās NO_x, par 3% CO₂, par 55% SO₂ un nesadegušo oglekļaūdeņražu saturs (aptuveni 3.5 reizes), bet CO palielinās aptuveni par 90%. Tādējādi maisījumdegvielu izmantošanas gadījumā ne visu atgāzu komponentu saturs mainās ar pozitīvu tendenci.

Pētnieciskā motora *KOHLER KDI 1903* izmēģinājumi deva vispretrunīgākos rezultātus. Ja tīras HVO izmantošanas gadījumā CO un NO_x saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezību diapazonā palielinājās vidēji par 3%, CO₂ praktiski nemainījās, bet HC – samazinājās par 60%, tad maisījumdegvielas HVO5 izmantošana palielināja visu minēto komponentu saturu no 8% līdz pat 1.4 reizēm, tādējādi apstiprinot citos pētījumos akcentēto, ka izmešu tendences var būt ļoti dažādas atkarībā no izmantotā motora veida, testa apstākļiem, konkrēto degvielu īpašībām, kā arī no tā, vai eksperimenti tiek veikti, izmantojot motorstendus vai spēkratus kopumā, t.sk. atgāzu neitralizācijas sistēmām.

Tā kā eksperimentos izmantotā atgāzu analītiskā iekārta faktiski mēra vairāk nekā 20 dažādas izplūdes gāzes komponentes, bet vēl vairākas aprēķina, tad iekārtas uzkrātajos testu failos atsevišķi iegūstami dati gan par N_2O , gan CH_4 , kas ir viena no septiņām nesadedegušo ogļūdeņražu komponentēm (skat. formulu (3.3)).

Apstrādājot datus tāpat kā visas pārējās līdz šim analizētās komponentes, 4.5. attēlā dotas N_2O un CH_4 satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili ar abām degvielām. Dati doti par kombinēto IM-240 ciklu, jo tas visvairāk atbilst reālajiem automobiļa ekspluatācijas apstākļiem.



4.5. att. N_2O un CH_4 satura izmaiņas atgāzēs, darbinot automobili Opel Insignia ar HVO un FDD kombinētā cikla IM-240 veikšanas laikā

N_2O saturs atgāzēs, izmantojot HVO, samazinājās par aptuveni 37% salīdzinājumā ar FDD, bet CH_4 – par 35%. Tomēr jāņem vērā, ka absolūtajās vienībās (ppm) šo komponentu saturs ir mazāks par 1, t.i., mazāks par 0.001% pretstatā komponentēm, kuru saturs mērāms desmitos (HC), simtos (NO_x) un pat desmitos tūkstošu (CO_2) ppm.

Lai novērtētu kopējās SEG emisiju izmaiņas trīs komponentēm – CO_2 (rezultāti doti 3.7. attēlā), N_2O un CH_4 , ņemot vērā to kaitīgumu, izmantoti IIPC AR5 noteiktie globālās sasilšanas potenciāla indeksi, kas nosaka, ka metāna un vienvērtīgā slāpekļa ietekme uz klimatu ir attiecīgi 28 un 265 reizes spēcīgāka nekā CO_2 (Greenhouse Gas Protocol, n.d.). Turpmāko aprēķinu veikšanai šie koeficienti apzīmēti attiecīgi ar K_{CH_4} un K_{N_2O} .

Tā kā šo aprēķinu mērķis nav noteikt absolūtos skaitļus, bet izmaiņas, salīdzinot abas degvielas, tad šim nolūkam veikta formulas (4.1) pielāgošana. Turklāt nekur nav dots, kā faktiski ir noteikts CO_2 emisijas faktors katrai no degvielām. Tāpēc abu degvielu emisijas faktoru attiecība tiek aizstāta ar attiecību pagaidu pieņemtai mērvienībai, kas apzīmēta ar ppm CO_2e . Tās aprēķinu rezultāti apkopoti 4.1. tabulā.

4.1. tabula. Kopējo SEG emisiju aprēķins, darbinot automobili ar HVO un FDD

Degviela	CO_2	N_2O			CH_4			Kopā
	ppm CO_2e	ppm	K_{N_2O}	ppm CO_2e	ppm	K_{CH_4}	ppm CO_2e	ppm CO_2e
FDD	58640.56	0.47	265	124.55	0.97	28	27.16	58792.27
HVO	56891.67	0.34	265	90.10	0.72	28	20.16	57001.93

Pielāgojot (4.1) formulu, var atteikties no MK noteikumos izmantoto mērvienību lietošanas, bet izmantot tās SI sistēmas mērvienības, kas lietotas eksperimentālajos pētījumos, jo, nosakot attiecību, kur vienas degvielas parametri dalīti ar otras degvielas atbilstošajiem parametriem identiskās mērvienībās, gala rezultātā iegūst skaitli, kas nav atkarīgs no lietotajām mērvienībām:

$$K_{SEG_{izm}} = \frac{L_{FDD} \cdot C \cdot \rho_{FDD} \cdot Q_z^{FDD} \cdot K_{ppmCO_2e}^{FDD}}{L_{HVO} \cdot C \cdot \rho_{HVO} \cdot Q_z^{HVO} \cdot K_{ppmCO_2e}^{HVO}}, \quad (4.3)$$

kur $K_{SEG_{izm}}$ – SEG emisiju izmaiņu koeficients;

L_{FDD} un L_{HVO} – transportlīdzekļa vidējais izlīdzinātais degvielas patēriņš ar FDD un HVO, l uz 100 km (ņemts no eksperimentālajiem pētījumiem, veicot kombinēto ciklu – attiecīgi 6.44 un 6.64);

C – transportlīdzekļa vidējais nobraukums gadā kopš tā pirmreizējās reģistrācijas Latvijā, km gads⁻¹ (pieņemts 20000);

ρ_{FDD} un ρ_{HVO} – FDD un HVO blīvums, kg m⁻³ (eksperimentos izmantotajām degvielām attiecīgi 836.3 un 778.9);

Q_z^{FDD} un Q_z^{HVO} – FDD un HVO zemākais sadegšanas siltums, MJ kg⁻¹ (eksperimentos izmantotajām degvielām attiecīgi 43.5 un 43.9);

$K_{ppmCO_2e}^{FDD}$ un $K_{ppmCO_2e}^{HVO}$ – 4.1. tabulā aprēķinātais kopējais SEG emisiju daudzums, ppm CO₂e (FDD – 58792.27, HVO – 57001.93).

$$K_{SEG_{izm}} = \frac{6.44 \cdot 20000 \cdot 836.3 \cdot 43.5 \cdot 58792.27}{6.64 \cdot 20000 \cdot 778.9 \cdot 43.9 \cdot 57001.93} \approx 1.064.$$

Kā redzams, tad izmaiņas ir salīdzinoši nelielas – HVO izmantošana SEG emisijas, kas izdalās tieši no automobiļa, samazina par 6.4%.

Tādējādi rodas jautājums, kāpēc definējot katras degvielas CO₂ emisiju faktoru, FDD tas ir, kā noteikts MK noteikumos, t.i., 74 t CO₂ TJ⁻¹ (tas ir arī citos informācijas avotos dotajās 72 – 78 t CO₂ TJ⁻¹ robežās), bet biodegvielai, t.sk. HVO tas noteikts kā 0 vai tuvu tai, neskatoties uz to, ka kaitīgie izmeši tiek emitēti no spēkratiem neatkarīgi no izmantotās degvielas. Galvenais arguments šajā gadījumā ir degvielas izcelsme – biodegvielas tiek ražotas no atjaunojamajiem resursiem pretstatā fosilajai degvielai.

Šeit izkristalizējas arī “degvielas pilna dzīves cikla” problēma, kas varētu būt atsevišķa promocijas darba pētījumu objekts, jo būtu vērts izvērtēt ne tikai tiešās emisijas no spēkratiem (skaitliski un procentuāli nelielās atšķirības salīdzinājumā ar fosilo dīzeļdegvielu iegūtas ne tikai šajā promocijas darbā, bet praktiski visos biodegvielu pētījumos, kas veikti dažādās pasaules valstīs), bet visā degvielas ražošanas un izmantošanas ciklā, t.i., degvielas izejvielu un degvielas ražošanā, transportēšanā, izdalē u.c. procesos. Tas ir līdzīgi kā elektropēkratu izmantošanas gadījumā – no vienas puses tie absolūti neizdala tiešās emisijas, bet pašu spēkratu un to sastāvdaļu (piemēram, akumulatoru) izgatavošanas procesā tiek radītas SEG emisijas, kuras, protams, atkal var izdalīt, vai tās radītas no atjaunojamiem energoresursiem vai fosiliem. Līdzīgi ir arī elektroautomobiļa ekspluatācijā – ja elektroenerģija ir no atjaunojamiem energoresursiem, tad CO₂ emisiju faktors ir 0, bet pretējā gadījumā to aprēķina, balstoties uz skaitļiem, kas noteikti katram kurināmā veidam, no kā iegūta šī elektroenerģija (LR Ministru kabinets, 2018).

Faktiski var secināt, ka tikai fosilās degvielas nomaina ar biodegvielu klimata problēmas var risināt tikai daļēji. Lai realizētu ilgtermiņa emisiju samazināšanas stratēģiju un klimata plānus, kā arī sasniegtu mērķrādītājus 2025., 2030. un līdz pat 2050. gadam, pasākumi jāveic kompleksi – turpinot attīstīt un ieviest elektriskos, ar ūdeņradi darbināmus un hibrīdspēkratus, modernas biodegvielas un citas atjaunojamās un mazoglekļa degvielas, vienlaikus nodrošinot infrastruktūru attīstību spēkratu uzlādei un uzpildei.

To apliecina Zviedrijā veiktais pētījums (Andersson, Börjesson, 2021), kurā analizēts elektroautomobiļu un daļēji elektrificēto automobiļu (pašuzlādes un *plug-in* jeb lādējamo hibrīdu) SEG emisiju dzīves cikla novērtējums kombinācijā ar atjaunojamo degvielu.

Pētot pilnā dzīves cikla (automobiļu, akumulatoru, degvielas un elektrības ražošanas, kā arī automobiļu utilizēšanas) CO₂ emisijas, konstatēts, ka maz ticams, ka elektropēkratu izmantošana pati par sevi samazinās siltumnīcefekta gāzu emisijas no ES autoparka par 90% līdz 2050. gadam. Lai panāktu klimata neitralitāti, ir nepieciešama elektrifikācijas un atjaunojamo degvielu kombinācija transporta nozarē. Dodot priekšroku elektrifikācijai, nevis atjaunojamām degvielām, pašreizējie politikas instrumenti samazina iespēju sasniegt šo mērķi.

Konstatēts, ka lādējamie hibrīdi jāuzskata nevis par pārejas pasākumu, bet par tehnoloģiju, kas ļaus sasniegt klimata mērķus. Tas ir tāpēc, ka to salīdzinoši nelielā izmēra akumulatoru bloki samazina siltumnīcefekta gāzu emisijas ražošanas fāzē salīdzinājumā ar akumulatoru ražošanu pilnībā elektriskiem transportlīdzekļiem. Turklāt, ja tos galvenokārt darbina elektriskais režīms, šādu hibrīdu parks arī samazina vajadzību pēc degvielas līdz tādām līmenim, ka var būt iespējams apmierināt pieprasījumu ar ilgtspējīgi ražotu atjaunojamo degvielu, kuras dzīves cikla siltumnīcefekta gāzu emisijas ir zemas.

Kīnā veiktais pētījums (Yang et al., 2020) vērsts uz ūdeņraža šūnu, elektrisko un iekšdedzes motoru transportlīdzekļu dzīves cikla novērtējumu pie dažādiem degvielu scenārijiem un nobraukumiem. Kopējais dzīves cikls ietver transportlīdzekļa dzīves ciklu un degvielas dzīves ciklu. Transportlīdzekļa dzīves ciklā elektroautomobiļiem ir visaugstākais enerģijas patēriņš un SEG emisijas, kas ir attiecīgi 1.4 un 1.2 reizes lielākas nekā ūdeņraža šūnu automobiļiem, savukārt iekšdedzes motoru automobiļiem tie ir viszemākie. Akumulatoru ražošana ir galvenais iemesls, kas izraisa augstu enerģijas patēriņu un SEG emisijas. Savukārt degvielas dzīves ciklā elektroautomobiļiem un ūdeņraža šūnu automobiļiem abi minētie parametri ir labāki nekā iekšdedzes motoru automobiļiem jebkuras degvielas izmantošanas gadījumā. Pētījumā pierādīts, ka elektroautomobiļu priekšrocības kļūst acīmredzamas tikai tad, kad nobraukums sasniedz aptuveni 175000 km, taču tad problēmas sāk rasties dēļ akumulatoru kalpošanas laika. Pētījuma noslēgumā secināts, ka dažāda veida transportlīdzekļu energoefektivitāte un emisijas kopējā dzīves ciklā lielā mērā ir atkarīgas no nobraukuma.

4.4. HVO degvielas izmantošanas ekonomiskais novērtējums

Tā kā HVO degvielas ražotņu pasaulē ir salīdzinoši maz, turklāt to skaits pēdējo 10 gadu laikā nav būtiski palielinājies, kā arī ņemot vērā, ka ražotāji nekad nesniedz informāciju par reālo degvielas pašizmaksu, degvielas cenas var novērtēt tikai aptuveni, analizējot iespējas šīs degvielas iegādāties degvielas uzpildes stacijā. Tāpat ir neiespējami noteikt, cik HVO degvielas ir piejaukts fosilajai dīzeļdegvielai katrā konkrētajā dienā, jo degvielu īpašību sertifikāti tiek sagatavoti noteiktām partijām ilgākam laika periodam. Tāpēc novērtēt cenu veidošanos var tikai tad, ja tiek veikta konkrētā parauga analīze, nosakot HVO saturu degvielā un zinot katra degvielas parauga pārdošanas cenu.

Šāda situācija bija tikai divas reizes darba izstrādes laikā – vienā fosilās dīzeļdegvielas cena bija 1.50 EUR l⁻¹, tīras HVO – 2.97 EUR l⁻¹, FDD un aptuveni 5% HVO maisījuma – 1.60 EUR l⁻¹, bet otrā attiecīgi 1.32, 1.97, 1.44 EUR l⁻¹, bet šoreiz piejaukumā bija aptuveni 10% HVO.

Veicot vienkāršus aprēķinus, var secināt, ka maisījumdegvielas cenu var aptuveni noteikt, zinot tīras HVO un FDD cenu un piejauktā HVO procentuālo daudzumu.

Diemžēl tīras HVO cena, kas aptuveni 1.5 – 2 reizes pārsniedz fosilās dīzeļdegvielas cenu, nekādi nevar motivēt spēkratu lietotājus to izmantot ne tīrā veidā, ne maisījumos tikai dēļ vides saudzēšanas, ja netiek doti kādi citi jūtami ieguvumi, piemēram, būtiska degvielas ekonomija, jaudas pieaugums vai labvēlīga ietekme uz spēkratu sistēmām. Tieši tāpēc pašlaik no ekonomiskā viedokļa daļēji pietiek argumentu tikai neliela satura maisījumdegvielu izmantošanai, jo 6 – 9% cenas pieaugums kaut nedaudz tiek kompensēts ar faktu, ka HVO piejaukums jaudas un degvielas patēriņa izmaiņu ziņā ir daudz “draudzīgāks” nekā 1. paaudzes biodīzeļdegvielas piejaukums, sevišķi laika periodos, kad tas ir kā obligātais degvielas tirgotājiem. Salīdzinot šos abus piejaukumus, HVO ir arī neagresīvs pret tām degvielas sistēmas komponentēm, kuras tika ietekmētas biodīzeļdegvielas izmantošanas gadījumā. Turklāt arī ar mazāku NO_x, HC, SO₂ un CO₂ saturu izmešos, salīdzinot ar FDD un biodīzeļdegvielas maisījumiem.

Lai situācija mainītos, risinājums, kas nav atkarīgs ne no degvielas gala lietotājiem, ne pētniekiem, ir HVO pašizmaksas un tai sekojošas tirdzniecības cenas samazināšana. Bet tā ir tikai degvielas ražotāju kompetence – atrast lētākas izejvielas, samazināt izmaksas ražošanas

procesā un atvērt jaunas ražotnes. Pētnieki to var sekmēt, veicot izmēģinājumus un popularizējot degvielas labās īpašības.

Ja to neizdosies izdarīt, iespējami tikai jau situācijas apskatā dažos pētījumos pieminētie (Szeto, Leung, 2022) drastiskie pasākumi, kas, protams, būtu ļoti nepatīkami spēkratu izmantotājiem, piemēram, ieviešot sarūkošas ikmēneša kvotas fosilās degvielas patēriņam katram automobilim, bet papildu vajadzības pēc degvielas nodrošinot ar 100% HVO vai kādu citu jaunākās paaudzes degvielu.

Šādā gadījumā jāreķinās ar sarežģītiem administratīviem pasākumiem, likumu, noteikumu un īpašu informatīvo sistēmu izstrādi, kur gada beigās vai pie nākamās spēkratu tehniskās apskates, salīdzinot nobrauktos kilometrus un degvielas čekus, gadījumā, ja tiek pārsniegts kvotētās fosilās degvielas daudzums, piemēro palielinātu ceļu, vides vai tml. nodokli. Tomēr šāds scenārijs jāvērtē kā nevēlams, jo, pirmkārt, tā ir tikai abstrakta ideja, bet, galvenais ir tas, policejisku metožu izmantošana nekad neveicina nevienas valsts pilsoņu lojalitāti un atbalstu. Ieteicamāks variants būtu nevis sodīt par neizmantošanu, bet apbalvot par atjaunojamo resursu izmantošanu, piemēram, nodokļu atlaistu, stāvēšanas atļauju vai tml. veidā. Vienlaikus vairāk jāpopularizē atjaunojamo degvielu ietekme uz vidi ilgtermiņā, apelējot ne tikai pie savas, bet nākamo paaudžu veselības.

Arī automobiļu ražotājiem būtu aktīvi jāiesaistās, piemēram, veicot motora vadības bloku alternatīvu kalibrēšanu, kas paredzēta HVO (Hunicz et al., 2020). Ņemot vērā HVO vieglāku pašai degšanas un līdz ar to ilgāku sadegšanas laiku, kas samazina mehānisko daļiņu un kvēpu emisijas, pētnieki dažādās valstīs (Kopperoinen et al., 2011; Pflaum et al., 2010) pierādīja, ka HVO izmantošana pagarina DPF reģenerācijas intervālu. Tā kā reģenerācija parasti palielina degvielas patēriņu, degvielas ekonomija un vides saudzēšana ilgtermiņā varētu būt augstāka nekā īslaicīgos pētījumos.

Tomēr, ja tīras HVO izmantošanu nevar īstenot infrastruktūras, tehnisku vai administratīvu grūtību dēļ, FDD un HVO maisījumu izmantošana jāveicina, jo tā var vismaz daļēji samazināt SEG emisijas un veicināt normatīvos noteikto kontrolskaitļu izpildi atjaunojamās degvielas izmantošanā (Szeto, Leung, 2022).

4.5. Nodaļas kopsavilkums

1. Darbinot automobili *Opel Insignia* un traktoru *Class Ares 557ATX* ar tīru HVO, var secināt, ka visām komponentēm, kas parasti tiek salīdzinātas dažādu degvielu pētījumos, ir tendence samazināties, salīdzinot pret fosilo dīzeļdegvielu. NO_x samazinājums ir 6.8 – 11.8%, HC – 26.4 – 37.5%, CO_2 – 5.0 – 5.2%, bet CO līdz 14.5%. Tādējādi tīras HVO degvielas izmantošanai ir pozitīva ietekme uz vidi.
2. Maisījumdegvielu izmantošanas gadījumā ne visu atgāzu komponentu saturs mainās ar pozitīvu tendenci, tomēr HVO 7% piejaukums fosilajai degvielai, salīdzinot ar tādu pat biodīzeļdegvielas piejaukumu, vērtējams kā videi draudzīgāks, jo aptuveni par 4% samazinās NO_x , par 3% CO_2 , par 55% SO_2 un aptuveni 3.5 reizes nesadegušo ogļūdeņražu saturs.
3. Iespējamo HVO degvielas potenciālu SEG emisiju samazināšanā var noteikt ar dažādām metodēm – ar SEG emisiju kalkulatoriem, izmantojot LR MK noteikumos noteikto siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķina metodiku un, veicot aprēķinus, balstoties uz eksperimentos iegūtajiem datiem.
4. Tā kā dažādu tiešsaistes un lejuplādējumu kalkulatoru aprēķinu rezultāti atšķiras gandrīz divas reizes, tad šādus kalkulatorus nav droši izmantot SEG emisiju novērtējumā.
5. Aprēķinos izmantojot MK noteikumu formulas un vērtības un pieņemot testos izmantotā automobiļa nobraukumu 20000 km gadā, SEG emisiju apjoma samazinājums ir aptuveni 3.5 t CO_2 e gadā, bet, aprēķinos pieņemot citos pētījumos uzrādītās HVO degvielas CO_2 ekvivalenta vērtības, aptuveni 3.1 t CO_2 e gadā. Tātad samazinājums ir vismaz 88%.

6. Analizējot automobiļa pētījumos iegūto tiešo siltumnīcefekta gāzu N_2O , CH_4 un CO_2 saturu atgāzēs, izmantojot HVO, tas samazinājās attiecīgi par aptuveni 37, 35 un 5% salīdzinājumā ar FDD. Ņemot vērā katras komponentes globālās sasilšanas potenciāla indeksu, HVO izmantošana SEG emisijas, kas izdalās tieši no automobiļa, samazina par 6.4%. Tomēr tā ir tikai daļa izmešu, kas tiek radīta pilnā degvielas izmantošanas dzīves ciklā, kas ietver automobiļu, akumulatoru, degvielas un elektrības ražošanu, kā arī automobiļu utilizēšanu. Taču šādam izvērtējumam būtu nepieciešami citi pētījumi un pat promocijas darbi.
7. Tikai fosilās degvielas nomaina ar biodegvielu, t.sk. HVO klimata problēmas var risināt tikai daļēji. Lai realizētu ilgtermiņa emisiju samazināšanas stratēģiju un klimata plānus, pasākumi jāveic kompleksi – turpinot attīstīt un ieviest elektriskos, ar ūdeņradi darbināmus un hibrīdspēkratus, jaunākās paaudzes biodegvielas, vienlaikus nodrošinot infrastruktūru attīstību spēkratu uzlādei un uzpildei.
8. Ņemot vērā, ka tīras HVO cena aptuveni 1.5 – 2 reizes pārsniedz fosilās dīzeļdegvielas cenu, grūti motivēt spēkratu lietotājus to izmantot, sevišķi tīrā veidā. Tāpēc pašlaik no ekonomiskā viedokļa daļēji pietiek argumentu tikai neliela satura maisījumdegvielu izmantošanai, jo 6 – 9% cenas pieaugums tiek kompensēts ar faktu, ka HVO piejaukums jaudas, degvielas patēriņa un klimata izmaiņu ziņā ir daudz “draudzīgāks” nekā klasiskās biodīzeļdegvielas piejaukums.
9. Lai mainītu situāciju, ražotājiem būtu jāpanāk HVO pašizmaksas un tai sekojošas tirdzniecības cenas samazināšana, meklējot lētākas izejvielas un samazinot izmaksas ražošanas procesā. Savukārt automobiļu ražotājiem būtu aktīvi jāiesaistās dažādu sistēmu pielāgošanu atbilstoši HVO degvielas fizikālajām īpašībām, piemēram, veicot motora vadības bloku alternatīvu kalibrēšanu.
10. Ja vēl kādus gadus tīras HVO izmantošanu nevar īstenot infrastruktūras, tehnisku vai administratīvu grūtību dēļ, FDD un HVO maisījumu izmantošana jāpaplašina, jo tā var vismaz daļēji samazināt SEG emisijas un veicināt normatīvos noteikto kontrolskaitļu izpildi atjaunojamās degvielas izmantošanā.

SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

1. Līdzšinējo pētījumu analīze ļauj secināt, ka HVO var ražot no ļoti plaša biomasas izejvielu klāsta, piemēram, augu eļļas, dzīvnieku taukiem, atkritumeļļas, aļģēm u.c. Atkarībā no izmantojamajām izejvielām tā var būt gan otrās, gan trešās, gan pat ceturtās paaudzes biodegviela. HVO gandrīz nepiemīt pirmās paaudzes biodegvielu nevēlamās īpašības, kas saistītas ar to iedarbību uz dažādām degvielas sistēmas komponentēm. Pētījumos konstatētas HVO degvielas izmantošanas jaudas, degvielas patēriņa un izmešu tendences, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu un biodīzeļdegvielu, ir ļoti dažādas atkarībā no izmantotā motora veida, testa apstākļiem, izmantotajām iekārtām, konkrēto degvielu īpašībām utt. Tā kā HVO ir salīdzinoši jauna degviela, pētījumu apkopojumos akcentēts, ka pētījumi jāturpina, aptverot pēc iespējas plašāku pētāmo objektu loku.
2. Izstrādāta teorētisko un eksperimentālo pētījumu metodika, kas ietver piecas pētījumu programmas PP-1 – PP-5, aptverot dažādus pētījumu objektus (automobilis, traktors un pētnieciskais motors). Pētījumu programmās, ja to ļauj testējamo objektu specifika, izmantotas vienas un tās pat ierīces, lai pētījumu rezultātus kopumā neiespaidotu dažādu ierīču izmantošana. Katrai pētījumu programmai dots pētījumu objektu un iekārtu raksturojums, pētījumu veikšanas secība, izmēģinājumu apstākļu raksturojums, veicamo testu apraksts, izmēģinājumos iegūto parametru vērtību ietekmējošo faktoru analīze, nepieciešamās mērījumu precizitātes un atkārtojumu skaita pamatojums, kā arī aprakstīta izmēģinājumu rezultātu izklāsta forma.
3. Eksperimentu rezultāti parāda, ka darbā ar tīru HVO un fosilo dīzeļdegvielu automobiļa *Opel Insignia 2.0 CDTi* maksimālās jaudas atšķirība ir 0.34% (HVO – 82.13 kW, FDD – 81.85 kW), bet maksimālā griezes momenta atšķirība – 0.86% (HVO – 276.85 N m, FDD – 274.49 N m). Līdzīgas tendences, bet lielākas lielumu atšķirības konstatētas motora *KOHLER KDI 1903* pētījumos – maksimālās jaudas atšķirība ir 1.4% (HVO – 26.0 kW, FDD – 25.7 kW), bet maksimālā griezes momenta atšķirība – 1.2% (HVO – 119.5 N m, FDD – 118.1 N m). Pretējas tendences ir traktora *Class Ares 557ATX* pētījumos, kur konstatēts, ka motora efektīvā jauda un griezes moments, izmantojot HVO degvielu, samazinās, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu. Vidējais jaudas un griezes momenta samazinājums visā jūgvārpstas apgriezīgu diapazonā bija aptuveni 5.0%. Apstiprinās situācijas apskatā konstatētais, ka tendences un vērtības dažādiem spēkratiem var atšķirties, jo atšķiras barošanas, izplūdes gāzu recirkulācijas u.c. sistēmas.
4. Darbinot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar fosilo dīzeļdegvielu un maisījumdegvielām HVO7 un BioDD7, konstatēts, ka maksimālā automobiļa jauda ar FDD ir 84.1 kW, ar BioDD7 – 82.3 kW, bet ar HVO7 – 84.2 kW. Maksimālās jaudas atšķirība FDD un HVO7 degvielai ir 0.16%, kas uzskatāma par nebūtisku. Darbinot automobili ar BioDD7, tiek attīstīta par 2.12% mazāka maksimālā jauda, salīdzinot ar FDD, un par 2.28% mazāka jauda, salīdzinot ar HVO7 degvielu. Maksimālais griezes moments ar FDD ir 281.5 N m, ar BioDD7 – 277.9 N m, bet ar HVO7 – 282.1 N m. Maksimālā griezes momenta atšķirība FDD un HVO degvielai ir 0.20%, kas uzskatāma par nebūtisku. Darbinot automobili ar BioDD7, tiek attīstīts par 1.3% mazāks griezes moments, salīdzinot ar FDD, un par 1.5% mazāks griezes moments, salīdzinot ar HVO7 degvielu. Darbinot motoru *KOHLER KDI 1903* ar līdzīga HVO piejaukumu satura degvielu HVO5, maksimālā jauda ir 26.2 kW un maksimālais griezes moments 120.9 N m. Maksimālās jaudas pieaugums ir 2% un maksimālā griezes momenta pieaugums 2.4%, salīdzinot FDD (25.7 kW un 118.1 N m). Izmaiņu tendences, salīdzinot ar vieglā automobiļa pētījumiem, ir līdzīgas, bet ar atšķirīgām pieauguma vērtībām.
5. Testējot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi*, visu braukšanas režīmu vidējais HVO degvielas patēriņš litros uz 100 km par aptuveni 4% pārsniedz FDD patēriņu. Tā kā aprēķinos noskaidrots, ka vienādā saspiestās degvielas tilpumā HVO ir par 5.37% mazāk enerģijas nekā FDD, aptuveni tikpat procentus var prognozēt maksimālo degvielas patēriņa

pieaugumu. Traktora *Class Ares 557ATX* vidējais stundas degvielas patēriņš visā jūgvārpstas apgriezienu diapazonā, izmantojot HVO, bija par aptuveni 1% mazāks, salīdzinot ar dīzeļdegvielu, bet zemākas attīstītās motora jaudas dēļ īpatnējā degvielas patēriņa pieaugums bija par 4.1% lielāks. Šis palielinājums korelē ar automobiļa testēšanas rezultātiem. Darbinot motoru *KOHLER KDI 1903* ar tīru HVO, maksimālais vidējais stundas degvielas patēriņš visā kloķvārpstas apgriezienu diapazonā ir par 1% lielāks nekā FDD, bet, salīdzinot īpatnējā degvielas patēriņa datus, vērojams HVO īpatnējā degvielas patēriņa samazinājums – 0.86%, salīdzinot ar tīru fosilo dīzeļdegvielu, jo ar HVO degvielu tika attīstīta lielāka jauda.

6. Darbinot automobili *Opel Insignia 2.0 CDTi* ar FDD un HVO7 un BioDD7, vidējais FDD un HVO7 degvielas patēriņš atšķiras tikai par 0.07%, kas uzskatāms par nebūtisku atšķirību. Darbinot automobili ar BioDD7, patēriņš vidēji ir par 3.11% lielāks, salīdzinot ar FDD, un vidēji par 3.03% lielāks, salīdzinot ar HVO7 degvielu.
7. Darbinot automobili *Opel Insignia* un traktoru *Class Ares 557ATX* ar tīru HVO, var secināt, ka visām atgāzu komponentēm, kas parasti tiek salīdzinātas dažādu degvielu pētījumos, ir tendence samazināties, salīdzinot pret fosilo dīzeļdegvielu. NO_x samazinājums ir 6.8 – 11.8%, HC – 26.4 – 37.5%, CO_2 – 5.0 – 5.2%, bet CO līdz 14.5%. Tādējādi tīras HVO degvielas izmantošanai ir pozitīva ietekme uz vidi.
8. Darbinot motoru *KOHLER KDI 1903* ar tīru HVO, NO_x un CO saturs izmešos visā motora kloķvārpstas apgriezienu diapazonā, salīdzinot ar FDD, palielinājies vidēji par 3.0%, HC saturs samazinājies vidēji par 60%. CO_2 saturs palielinājies vidēji par 0.9%, un šī atšķirība vērtējama kā nebūtiska. Bet atšķirībā no automobiļa un traktora pētījumiem, motorstends nav aprīkots ar atgāzu neitralizācijas sistēmu.
9. Maisījumdegvielu izmantošanas gadījumā ne visu atgāzu komponentu saturs mainās ar pozitīvu tendenci, tomēr HVO 7% piejaukums fosilajai degvielai, salīdzinot ar tādu pat biodīzeļdegvielas piejaukumu, vērtējams kā videi draudzīgāks, jo aptuveni par 4% samazinās NO_x , par 3% CO_2 , par 55% SO_2 un aptuveni 3.5 reizes nesadeģušo ogļūdeņražu saturs.
10. Modelēto pētījumu rezultāti ir tuvi eksperimentos iegūtajiem, t.i., HVO7 jaudas un griezes momenta atšķirība, salīdzinot ar FDD, ir nebūtiska, bet, salīdzinot ar BioDD7, tiek attīstīta gandrīz par 2% augstāka jauda un griezes moments. Modelējot degvielas patēriņu, HVO7 un FDD atšķirību tendences ir līdzīgas eksperimentos konstatētajām, bet eksperimentālajos pētījumos HVO7 un BioDD7 degvielas patēriņa atšķirības bija lielākas, salīdzinot ar modelēto pētījumiem.
11. Simulācijas rezultāti liecina, ka tīras HVO izmantošanas gadījumā, salīdzinot ar fosilo dīzeļdegvielu, maksimālās jaudas un griezes momenta samazinājums var sasniegt 1.33%, bet degvielas patēriņa pieaugums – 2.26%. Aplūkojot reālāko tuvākās nākotnes scenāriju, t.i., maisījumdegvielas HVO15 izmantošanu, prognozētais jaudas un griezes momenta samazinājums 0.24% un degvielas patēriņa pieaugums 0.30% ir nenozīmīgi transportlīdzekļu ekspluatācijā.
12. Analizējot automobiļa pētījumos iegūto tiešo siltumnīcefekta gāzu N_2O , CH_4 un CO_2 saturu atgāzēs, izmantojot HVO, tas samazinājās attiecīgi par aptuveni 37, 35 un 5% salīdzinājumā ar FDD. Ņemot vērā katras komponentes globālās sasilšanas potenciāla indeksu, HVO izmantošana SEG emisijas, kas izdalās tieši no automobiļa, samazina par 6.5%.
13. Aprēķinos izmantojot MK noteikumu formulas un vērtības un pieņemot testos izmantotā automobiļa nobraukumu 20000 km gadā, SEG emisiju apjoma samazinājums ir aptuveni 3.5 t CO_2 e gadā, bet, aprēķinos pieņemot citos pētījumos uzrādītās HVO degvielas CO_2 ekvivalenta vērtības, aptuveni 3.1 t CO_2 e gadā. Tātad samazinājums ir vismaz 88%.
14. Ņemot vērā, ka tīras HVO cena aptuveni 1.5 – 2 reizes pārsniedz fosilās dīzeļdegvielas cenu, grūti motivēt spēkratu lietotājus to izmantot, sevišķi tīrā veidā. Tāpēc pašlaik no ekonomiskā viedokļa daļēji pietiek argumentu tikai neliela satura maisījumdegvielu

izmantošanai, jo 6 – 9% cenas pieaugums tiek kompensēts ar faktu, ka HVO piejaukums jaudas, degvielas patēriņa un klimata izmaiņu ziņā ir daudz “draudzīgāks” nekā klasiskās biodīzeļdegvielas piejaukums.

15. Ja vēl kādus gadus tīras HVO izmantošanu nevar īstenot infrastruktūras, tehnisku, ekonomisku vai administratīvu grūtību dēļ, FDD un HVO maisījumu izmantošana jāpaplašina, jo tā var vismaz daļēji samazināt SEG emisijas un veicināt normatīvos noteikto kontrolskaitļu izpildi atjaunojamās degvielas izmantošanā.

INFORMĀCIJAS AVOTU BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS

1. Aatola H., Larmi M., Sarjovaara T., Mikkonen S. (2009). Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO_x, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. *SAE International Journal of Engines*, Vol. 1, pp. 1251–1262.
2. *AC Dyno and CADET Compact*. (2019). Q181211a. Sierra CP Engineering Systems Ltd., Malvern, UK; 22 p.
3. Ajanovic A. (2011). Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy*, Vol. 36, pp. 2070–2076. DOI: 10.1016/j.energy.2010.05.019
4. Alaswad A., Dassisi M., Prescott T., Olabi A. G. (2015). Technologies and developments of third generation biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 1446–1460. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.058
5. Alizadeh R., Lund P. D., Soltanisehat L. (2020). Outlook on biofuels in future studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 134, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110326
6. Alkhayat S. A., Joshi G. D., Henein N. (2021). Analysis and Correlation of Ignition Delay for Hydrotreated Vegetable Oil and Ultra Low Sulfur Diesel and Their Blends in Ignition Quality Tester. *Fuel*, Vol. 289, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119816
7. Andersson Ö., Börjesson P. (2021). The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. *Applied Energy*, Vol. 289, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116621
8. Anenberg S., Miller J., Henze D., Minjares R. (2019). A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015. In: *International Council on Clean Transportation Report*. Washington, DC, USA; 55 p.
9. Appavu P., Ramanan M. V., Jayaraman J., Venu H. (2021). NO_x emission reduction techniques in biodiesel-fuelled CI engine: A review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 210–220. DOI: 10.1080/14484846.2019.1596527
10. Arvidsson R., Persson S., Fröling M., Svanström M. (2011). Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19 (2–3), pp. 129–137. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.02.008
11. AVL KMA Mobile Fuel Consumption Measuring System. (2008). AT2262E, Rev. 02, AVL List GmbH, Graz, Austria; 96 p.
12. *AVL SESAM FTIR user's Manual*. (2007). AT2547E, Rev. 10, AVL Emission Test Systems GmbH, Gaggenau, Germany; 104 p.
13. Awogbemi O., Von Kallon D. V., Onuh E. I., Aigbodion V. S. (2021). An overview of the classification, production and utilization of biofuels for internal combustion engine applications. *Energies*, Vol. 14, pp. 1–42. DOI: 10.3390/en14185687
14. Berjoza D. (2008). *Automobiļu teorija*. Jelgava: LLU; 200 p.
15. Bezergianni S., Dimitriadis A. (2013). Comparison between different types of renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 110–116. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.042
16. Bezergianni S., Dimitriadis A., Chrysikou L. P. (2014). Quality and sustainability comparison of one- vs. two-step catalytic hydroprocessing of waste cooking oil. *Fuel*, Vol. 118, pp. 300–307. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.078
17. Birkavs A. (2014). *Rapša eļļas degvielas izmēšu sastāva normalizācija dīzeļmotoros: promocijas darbs inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) zinātniskā grāda iegūšanai*. Jelgava: LLU; 148 p.
18. Birzietis G., Pirs V., Dukulis I., Gailis M. (2017). Effect of commercial diesel fuel and hydrotreated vegetable oil blend on automobile performance. *Agronomy Research*, Vol. 15 (S1), pp. 964–970.
19. Bjørgen K. O. P., Emberson D. R., Løvås T. (2020). Combustion and soot characteristics

- of hydrotreated vegetable oil compression-ignited spray flames. *Fuel*, Vol. 266, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116942
20. Boehman A. L., Morris D., Szybist J., Esen E. (2004). The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing. *Energy & Fuels*, Vol. 18 (6), pp. 1877–1882. DOI: 10.1021/ef049880j
 21. Bohl T., Smallbone A., Tian G., Roskilly A. P. (2018). Particulate number and NO_x trade-off comparisons between HVO and mineral diesel in HD applications. *Fuel*, Vol. 215, pp. 90–101. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.023
 22. Bohl T., Tian G., Smallbone A., Roskilly A. P. (2017). Macroscopic spray characteristics of next-generation bio-derived diesel fuels in comparison to mineral diesel. *Applied Energy*, Vol. 186, pp. 562–573. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.082
 23. Bortel I., Vávra J., Takáts M. (2019). Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine. *Renewable Energy*, Vol. 140, pp. 680–691. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.067
 24. Cadrazco M., Santamaría A., Jaramillo I. C., Kaur K., Kelly K. E., Agudelo J. R. (2020). Characterization of renewable diesel particulate matter gathered from non-premixed and partially premixed flame burners and from a diesel engine. *Combustion and Flame*, Vol. 214, pp. 65–79. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.12.018
 25. Callegari A., Bolognesi S., Cecconet D., Capodaglio A. G. (2020). Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 50, pp. 384–436. DOI: 10.1080/10643389.2019.1629801
 26. Caprotti R., Tang T., Ishibe N., In-ochanon R., Tipdecho C., Silapakampeerapap S. (2011). Performance of Diesel containing Bio-Hydrogenated Component. *SAE Technical Paper 2011-01-1953*. DOI: 10.4271/2011-01-1953
 27. Center for Climate and Energy Solutions. (n.d.). *Global Emissions*. [tiešsaiste] [skatīts 04/06/2023]. Pieejams: <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
 28. Chau V. T., Chinda C., Preechar K., Sato S., Kosaka H. (2017). Optical study on combustion characteristics of hydrotreated vegetable oil and blends under simulated CI engine conditions and various EGR. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31 (9), pp. 4521–4531. DOI: 10.1007/s12206-017-0852-3
 29. Cheng Q., Tuomo H., Kaario O. T., Martti L. (2019). Spray dynamics of HVO and EN590 diesel fuels. *Fuel*, Vol. 245, pp. 198–211. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.123
 30. Chew B. C., Shen X. B., Ansell J., Hamid S. R., Oh Y. P. (2019). Review a Decade of BP's Technology Roadmap on the Next Generation Biofuels Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 268, pp. 1–11. DOI: 10.1088/1755-1315/268/1/012009
 31. Chintala V. (2019). Coal versus biofuels: A social and economic assessment. **In:** *Second and Third Generation of Feedstocks* (pp. 513–529). London, UK; Elsevier.
 32. Chowdhury H., Loganathan B. (2019). Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 20, pp. 39–44. DOI: 10.1016/j.cogsc.2019.09.003
 33. Crepeau G., Gaillard P., van der Merwe D., Schaberg P. (2009). Engine Impacts and Opportunities of Various Fuels, Including GTL and FAME: Toward Specific Engine Calibration? *SAE Technical Paper 2009-01-1787*. DOI: 10.4271/2009-01-1787
 34. Darby H. M., Callahan C. W. (2020). On-farm oil-based biodiesel production. **In:** *Bioenergy* (pp. 157–184). London, UK; Elsevier.
 35. Datta A., Hossain A., Roy S. (2019). An Overview on Biofuels and Their Advantages and Disadvantages. *Asian Journal of Chemistry*, Vol. 31 (8), pp. 1851–1858. DOI: 10.14233/ajchem.2019.22098
 36. Demuyneck J., Dauphin R., Yugo M., Villafuerte P. M., Bosteels D. (2021). Advanced emission controls and sustainable renewable fuels for low pollutant and CO₂ emissions on

- a diesel passenger car. *Sustainability*, Vol. 13, pp. 1–15. DOI: 10.3390/su132212711
37. Di Blasio G., Ianniello R., Beatrice C. (2022). Hydrotreated vegetable oil as enabler for high-efficient and ultra-low emission vehicles in the view of 2030 targets. *Fuel*, Vol. 310, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122206
 38. Dimitriadis A., Natsios I., Dimaratos A., Katsaounis D., Samaras Z., Bezergianni S., Lehto K. (2018). Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine. *Frontiers in Mechanical Engineering*, Vol. 4, pp. 1–19. DOI: 10.3389/fmech.2018.00007
 39. Dimitriadis A., Seljak T., Vihar R., Žvar Baškovič U., Dimaratos A., Bezergianni S., Samaras Z., Katrašnik T. (2020). Improving PM-NOx trade-off with paraffinic fuels: A study towards diesel engine optimization with HVO. *Fuel*, Vol. 265, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116921
 40. Dobrzyńska E., Szewczyńska M., Pośniak M., Szczotka A., Puchałka B., Woodburn J. (2020). Exhaust emissions from diesel engines fueled by different blends with the addition of nanomodifiers and hydrotreated vegetable oil HVO. *Environmental Pollution*, Vol. 259, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113772
 41. Donnis B., Egeberg R. G., Blom P., Knudsen K. G. (2009). Hydroprocessing of Bio-Oils and Oxygenates to Hydrocarbons. Understanding the Reaction Routes. *Topics in Catalysis*, Vol. 52, pp. 229–240. DOI: 10.1007/s11244-008-9159-z
 42. Douvartzides S. L., Charisiou N. D., Papageridis K. N., Goula M. A. (2019). Green diesel: Biomass feedstocks, production technologies, catalytic research, fuel properties and performance in compression ignition internal combustion engines. *Energies*, Vol. 12, pp. 1–41. DOI: 10.3390/en12050809
 43. Dukulis I. (2013). *Rapša eļļas degvielas izmantošana dīzeļmotoros un loģistika: promocijas darbs inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) zinātniskā grāda iegūšanai*. Jelgava: LLU; 169 p.
 44. Dukulis I., Birkavs A. (2013). Development of model for running diesel engine on rapeseed oil. *Engineering for Rural Development*, pp. 319–325.
 45. Dukulis I., Pirs V. (2009). Development of Driving Cycles for Dynamometer Control Software Corresponding to Peculiarities of Latvia. *Research for Rural Development*, pp. 95–102.
 46. Ebadian M., van Dyk S., McMillan J. D., Saddler J. (2020). Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. *Energy Policy*, Vol. 147, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111906
 47. Emami S., Jafarmadar S. (2013). Multidimensional modeling of the effect of fuel injection pressure on temperature distribution in cylinder of a turbocharged DI diesel engine. *Propulsion and Power Research*, Vol. 2 (2), pp. 162–175. DOI: 10.1016/j.jprr.2013.04.003
 48. Erkkilä K., Nylund N. O., Hulkkonen T., Tilli A., Mikkonen S., Saikkonen P., Mamkinen R., Amberla A. (2011). Emission performance of paraffinic HVO diesel fuel in heavy duty vehicles. *SAE Technical Paper 2011-01-1966*. DOI: 10.4271/2011-01-1966
 49. European Commission. (2019). The European Green Deal. *European Commission, COM/2019/640 Final*, pp. 1–24.
 50. European Commission. (2020). Annual Sustainable Growth Strategy 2021. *European Commission, COM/2020/575 Final*, pp. 1–14.
 51. European Commission. (2021). Regulation of the European parliament and council on the deployment of alternative fuels infrastructure. *European Commission, COM/2021/559 Final*, pp. 1–48.
 52. European Parliament. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union, L 328*, pp. 82–209.
 53. European Parliament. (2022a). *EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035*

- explained. [tiešsaiste] [skatīts 03/01/2023]. Pieejams: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>
54. European Parliament C. of the E. U. (2016). Paris agreement. *Official Journal of the European Union*, L 282/4., pp. 1–15.
 55. European Parliament C. of the E. U. (2021). European Climate Law. *Official Journal of the European Union*, L 243/1, pp. 1–17.
 56. European Parliament C. of the E. U. (2022b). *Paris Agreement on climate change*. [tiešsaiste] [skatīts 03/01/2023]. Pieejams: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/>
 57. Foundation myclimate. (n.d.). *What are CO₂ equivalents?* [tiešsaiste] [skatīts 04/06/2023]. Pieejams: <https://www.myclimate.org/information/faq/faq-detail/what-are-co2-equivalents/>
 58. Greenhouse Gas Protocol. (n.d.). *Global Warming Potential Values*. Global Warming Potential Values. [tiešsaiste] [skatīts 07/31/2023]. Pieejams: [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb 16 2016%29_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb%2016%29_1.pdf)
 59. Gren L., Malmborg V. B., Falk J., Markula L., Novakovic M., Shamun S., Eriksson A. C., Kristensen T. B., Svenningsson B., Tunér M., Karjalainen P., Pagels J. (2021). Effects of renewable fuel and exhaust aftertreatment on primary and secondary emissions from a modern heavy-duty diesel engine. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 156, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2021.105781
 60. Grid National. (2023). *What are greenhouse gases?* [tiešsaiste] [skatīts 04/06/2023]. Pieejams: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-are-greenhouse-gases>
 61. Hajbabaie M., Johnson K. C., Okamoto R. A., Mitchell A., Pullman A., Durbin T. D. (2012). Evaluation of the impacts of biodiesel and second generation biofuels on NOx emissions for CARB diesel fuels. *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, pp. 9163–9173. DOI: 10.1021/es300739r
 62. Happonen M., Heikkilä J., Murtonen T., Lehto K., Sarjovaara T., Larmi M., Keskinen J., Virtanen A. (2012). Reductions in particulate and NOx emissions by diesel engine parameter adjustments with HVO fuel. *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, pp. 6198–6204. DOI: 10.1021/es300447t
 63. Happonen M., Lähde T., Messing M. E., Sarjovaara T., Larmi M., Wallenberg L. R., Virtanen A., Keskinen J. (2010). The comparison of particle oxidation and surface structure of diesel soot particles between fossil fuel and novel renewable diesel fuel. *Fuel*, Vol. 89, pp. 4008–4013. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.06.006
 64. Happonen M., Heikkilä J., Aakko-Saksa P., Murtonen T., Lehto K., Rostedt A., Sarjovaara T., Larmi M., Keskinen J., Virtanen A. (2013). Diesel exhaust emissions and particle hygroscopicity with HVO fuel-oxygenate blend. *Fuel*, Vol. 103, pp. 380–386. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.09.006
 65. Hartikka T., Kuronen M., Kiiski U. (2012). Technical Performance of HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) in Diesel Engines. *SAE Technical Paper 2012-01-1585*, pp. 1–12. DOI: 10.4271/2012-01-1585
 66. Helmane I. (2023). *Transporta sektorā jānosaka ambiciozāki mērķi virzībā uz klimatneitralitāti*. Lvportals.Lv. [tiešsaiste] [skatīts 04/06/2023]. Pieejams: <https://lvportals.lv/norises/349454-transporta-sektora-janosaka-ambiciozaki-merki-virziba-uz-klimatneitralitati-2023>
 67. Hernández J. J., Rodríguez-Fernández J., Calle-Asensio A. (2020). Performance and regulated gaseous emissions of a Euro 6 diesel vehicle with Lean NOx Trap at different ambient conditions: Sensitivity to the type of fuel. *Energy Conversion and Management*, Vol. 219, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113023

68. Heywood J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education; 1028 p.
69. Hultkonen T., Hillamo H., Sarjovaara T., Larmi M. (2011). Experimental Study of Spray Characteristics Between Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Crude Oil Based EN 590 Diesel Fuel. *SAE Technical Paper 2011-24-0042*. DOI: 10.4271/2011-24-0042
70. Hunicz J., Matijošius J., Rimkus A., Kilikevičius A., Kordos P., Mikulski M. (2020). Efficient hydrotreated vegetable oil combustion under partially premixed conditions with heavy exhaust gas recirculation. *Fuel*, Vol. 268, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117350
71. Ingle A. P., Ingle P., Gupta I., Rai M. (2019). Socioeconomic impacts of biofuel production from lignocellulosic biomass. **In:** M. Rais & A. Ingle (Eds.), *Sustainable Bioenergy* (pp. 347–366). London, UK; Elsevier.
72. Jaroonjitsathian S., Tipdech C., Sukajit P., Namthirach N., Suppatvech S. (2013). Bio-Hydrogenated Diesel (BHD): renewable Fuel for Advanced Diesel Technology. *SAE Technical Paper 2013-01-0070*. DOI: 10.4271/2013-01-0070
73. Jeswani H. K., Chilvers A., Azapagic A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 476, pp. 1–37. DOI: 10.1098/rspa.2020.0351
74. Johnston Oils. (2023). *Clean our Air with HVO*. [tiešsaiste] [skatīts 04/20/2023]. Pieejams: <https://johnston-oils.co.uk/hvo/>
75. *KDI 1903M - KDI 2504M*. (2020). Owner manual, Kohler, California; 40 p.
76. Kim D., Kim S., Oh S., No S.-Y. (2014). Engine performance and emission characteristics of hydrotreated vegetable oil in light duty diesel engines. *Fuel*, Vol. 125, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.089
77. Klimata pārmaiņu portāls. (2021). *Siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju kalkulators: Transports*. [tiešsaiste] [skatīts 04/20/2023]. Pieejams: <https://klimatam.lv/iespejas/seg-aprekinasana/aptuvenam-novert-privatp/transports/?sel=4>
78. Kopperoinen A., Kyto M., Mikkonen S. (2011). Effect of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) on Particulate Filters of Diesel Cars. *SAE Technical Paper 2011-01-2096*. DOI: 10.4271/2011-01-2096
79. Kumar N., Sonthalia A., Tomar M., Koul R. (2021). An experimental investigation on spray, performance and emission of hydrotreated waste cooking oil blends in an agricultural engine. *International Journal of Engine Research*, Vol. 22 (7), pp. 2305–2317. DOI: 10.1177/1468087420928734
80. Kumar Patidar S., Raheman H. (2020). Performance and durability analysis of a single-cylinder direct injection diesel engine operated with water emulsified biodiesel-diesel fuel blend. *Fuel*, Vol. 273, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117779
81. Kuronen M., Mikkonen S., Aakko P., Murtonen T. (2010). Hydrotreated Vegetable Oil as Fuel for Heavy Duty Diesel Engines. *SAE Technical Paper Series*, Vol. 1. DOI: 10.4271/2007-01-4031
82. Labeckas G., Slavinskas S., Kanapkienė I. (2017). The individual effects of cetane number, oxygen content or fuel properties on the ignition delay, combustion characteristics, and cyclic variation of a turbocharged CRDI diesel engine – Part 1. *Energy Conversion and Management*, Vol. 148, pp. 1003–1027. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.050
83. Lakanen L., Grönman K., Väisänen S., Kasurinen H., Soininen A., Soukka R. (2021). Applying the handprint approach to assess the air pollutant reduction potential of paraffinic renewable diesel fuel in the car fleet of the city of Helsinki. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 290, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125786
84. Lapuerta M., Villajos M., Agudelo J. R., Boehman A. L. (2011). Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines. *Fuel Processing Technology*, Vol. 92 (12), pp. 2406–2411. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.09.003
85. Li Y., Xu H., Cracknell R., Head R., Shuai S. (2019). An experimental investigation into

- combustion characteristics of HVO compared with TME and ULSD at varied blend ratios. *Fuel*, Vol. 255, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115757
86. Liang X., Zheng Z., Zhang H., Wang Y., Yu H. (2019). A review of early injection strategy in premixed combustion engines. *Applied Sciences*, Vol. 9, pp. 1–34. DOI: 10.3390/app9183737
 87. Liang Y. C., May C. Y., Foon C. S., Ngan M. A., Hock C. C., Basiron Y. (2006). The effect of natural and synthetic antioxidants on the oxidative stability of palm diesel. *Fuel*, Vol. 85 (5–6), pp. 867–870. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.09.003
 88. Liu Y., Cruz-Morales P., Zargar A., Belcher M. S., Pang B., Englund E., Dan Q., Yin K., Keasling J. D. (2021). Biofuels for a sustainable future. *Cell*, Vol. 184 (6), pp. 1636–1647. DOI: 10.1016/j.cell.2021.01.052
 89. LR Ekonomikas ministrija. (2020). *Transporta enerģijas likums*. [tiešsaiste] [skatīts 03/01/2023]. Pieejams: <https://www.em.gov.lv/lv/transporta-enerģijas-likums>
 90. LR Ministru kabinets. (2018). Siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķina metodika. *Latvijas Vēstnesis*, Nr. 18, 25. Janv.
 91. LR Ministru kabinets. (2020a). Par Latvijas Nacionālo attīstības plānu 2021.-2027. gadam. *Latvijas Vēstnesis*, Nr. 127, 16. Jūn.
 92. LR Ministru kabinets. (2020b). Par Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021.-2030. gadam. *Latvijas Vēstnesis*, Nr. 29, 11. Febr.
 93. LR Ministru kabinets. (2021). Par Transporta attīstības pamatnostādņēm 2021.-2027. gadam. *Latvijas Vēstnesis*, Nr. 207, 26. Okt.
 94. LR Ministru kabinets. (2022). *Valdība uz 1.5 gadiem atceļ biodegvielas obligāto piejaukumu*. [tiešsaiste] [skatīts 03/07/2023]. Pieejams: <https://www.mk.gov.lv/lv/jaunums/valdiba-uz-15-gadiem-atcel-biodegvielas-obligato-piejaukumu>
 95. LR Saeima. (2010). *Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam*. [tiešsaiste] [skatīts 03/06/2023]. Pieejams: http://www.pkc.gov.lv/sites/default/files/images-legacy/LV2030/Latvija_2030.pdf
 96. LR Saeima. (2005). Biodegvielas likums. *Latvijas Vēstnesis*, Nr. 52, 1. Apr.
 97. Makinen R., Nylund N. O., Erkkila K., Saikkonen P., Amerla A. (2011). Bus Fleet Operation on Renewable Paraffinic Diesel Fuel. *SAE Technical Paper 2011-01-1965*. DOI: 10.4271/2011-01-1965
 98. Mandley S. J., Daioglou V., Junginger H. M., van Vuuren D. P., Wicke B. (2020). EU bioenergy development to 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 127, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109858
 99. Marasri S., Ewphun P. P., Srichai P., Charoenphonphanich C., Karin P., Tongroon M., Kosaka H. (2019). Combustion Characteristics of Hydrotreated Vegetable Oil-Diesel Blends under EGR and Low Temperature Combustion Conditions. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 20 (3), pp. 569–578. DOI: 10.1007/s12239-019-0054-3
 100. Mat Aron N. S., Khoo K. S., Chew K. W., Show P. L., Chen W. H., Nguyen T. H. P. (2020). Sustainability of the four generations of biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*, Vol. 44 (12), pp. 9266–9282. DOI: 10.1002/er.5557
 101. Matzke M., Litzow U., Jess A., Caprotti R., Balfour G. (2009). Diesel Lubricity Requirements of Future Fuel Injection Equipment. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 2 (1), pp. 273–286.
 102. MD-1750 Chassis Dynamometer. (2004). Maintenance & Service Manual. Twinsburg, USA; 68 p.
 103. Meyer K., Newman P. (2020). Quota for agricultural GHG emissions (methane and nitrous oxide). In: K. Meyer & P. Newman (Eds.), *Planetary Accounting* (pp. 137–145). Singapore; Springer.
 104. Mikkonen S., Honkanen M., Kuronen M. (2013). HVO, hydrotreated vegetable oil. A premium renewable biofuel for diesel engines. *9th International Colloquium "Fuels:*

- Conventional and Future Energy for Automobiles*,” pp. 281–291.
105. Müller M., Šleger V., Čedík J., Pexa M. (2022). Research on the Material Compatibility of Elastomer Sealing O-Rings. *Polymers*, Vol. 14, pp. 1–14. DOI: 10.3390/polym14163323
 106. Murtonen T., Aakko-Saksa P., Koponen P., Lehto K., Sarjoavaara T., Happonen M., Heikkilä J. (2012). Emission reduction potential with paraffinic renewable diesel by optimizing engine settings or using oxygenate. *SAE Technical Paper 2012-01-1590*. DOI: 10.4271/2012-01-1590
 107. Musculus M. P. B., Miles P. C., Pickett L. M. (2013). Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion. *In: Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 39, Issues 2–3). Elsevier Ltd; 246–283 p. DOI: 10.1016/j.pecs.2012.09.001
 108. MyClimate. (2022). *CO2 emissions calculator for your car*. [tiešsaiste] [skatīts 04/20/2023]. Pieejams: https://co2.myclimate.org/en/car_calculators/new
 109. Na K., Biswas S., Robertson W., Sahay K., Okamoto R., Mitchell A., Lemieux S. (2015). Impact of biodiesel and renewable diesel on emissions of regulated pollutants and greenhouse gases on a 2000 heavy duty diesel truck. *Atmospheric Environment*, Vol. 107, pp. 307–314. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.054
 110. Ndiaye M., Arhaliass A., Legrand J., Roelens G., Kerihuel A. (2020). Reuse of waste animal fat in biodiesel: Biorefining heavily-degraded contaminant-rich waste animal fat and formulation as diesel fuel additive. *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1073–1079. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.030
 111. Nikhom R., Mueanmas C., Suppalakpanya K., Tongurai C. (2020). Utilization of oil recovered from biodiesel wastewater as an alternative feedstock for biodiesel production. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, Vol. 39, pp. 1–9. DOI: 10.1002/ep.13365
 112. No S.-Y. (2014). Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines – A review. *Fuel*, Vol. 115, pp. 88–96. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.07.001
 113. Nwoba E. G., Vadiveloo A., Ogbonna C. N., Ubi B. E., Ogbonna J. C., Moheimani N. R. (2020). Algal Cultivation for Treating Wastewater in African Developing Countries: A Review. *Clean Soil, Air, Water*, Vol. 48, pp. 1–14. DOI: 10.1002/clen.202000052
 114. Oh Y. K., Hwang K. R., Kim C., Kim J. R., Lee J. S. (2018). Recent developments and key barriers to advanced biofuels: A short review. *Bioresource Technology*, Vol. 257, pp. 320–333. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.02.089
 115. Ovaska T., Niemi S., Sirviö K., Nilsson O., Portin K., Asplund T. (2019). Effects of alternative marine diesel fuels on the exhaust particle size distributions of an off-road diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 150, pp. 1168–1176. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.090
 116. Pastor J. V., García-Oliver J. M., Micó C., García-Carrero A. A., Gómez A. (2020). Experimental study of the effect of hydrotreated vegetable oil and oxymethylene ethers on main spray and combustion characteristics under engine combustion network spray A conditions. *Applied Sciences*, Vol. 10, pp. 1–20. DOI: 10.3390/AP10165460
 117. Pexa M., Čedík J., Mařík J., Hönig V., Horníčková Š., Kubín K. (2015). Comparison of the operating characteristics of the internal combustion engine using rapeseed oil methyl ester and hydrogenated oil. *Agronomy Research*, Vol. 13 (2), pp. 613–620.
 118. Pflaum H., Hofmann P., Geringer B., Weissel W. (2010). Potential of Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) in a Modern Diesel Engine. *SAE Technical Paper 2010-32-0081*. DOI: 10.4271/2010-32-0081
 119. Pinto F., Martins S., Gonçalves M., Costa P., Gulyurtlu I., Alves a., Mendes B. (2013). Hydrogenation of rapeseed oil for production of liquid bio-chemicals. *Applied Energy*, Vol. 102, pp. 272–282. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.04.008
 120. Pirs V. (2011). *Bioetanola izmantošana ottomotoros: promocijas darbs inženierzinātņu*

doktora (Dr.sc.ing.) zinātniskā grāda iegūšanai. Jelgava: LLU; 190 p.

121. Pugazhendhi A., Alagumalai A., Mathimani T., Atabani A. E. (2020). Optimization, kinetic and thermodynamic studies on sustainable biodiesel production from waste cooking oil: An Indian perspective. *Fuel*, Vol. 273, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117725
122. Rantanen L., Linnaila R., Aakko P., Harju T. (2005). NExBTL - Biodiesel Fuel of the Second Generation. *SAE Technical Paper 2005-01-3771*. DOI: 10.4271/2005-01-3771
123. Rimkus A., Žaglinskis J., Stravinskas S., Rapalis P., Matijošius J., Bereczky Á. (2019). Research on the combustion, energy and emission parameters of various concentration blends of hydrotreated vegetable oil biofuel and diesel fuel in a compression-ignition engine. *Energies*, Vol. 12, pp. 1–18. DOI: 10.3390/en12152978
124. Rodríguez-Fernández J., Lapuerta M., Sánchez-Valdepeñas J. (2017). Regeneration of diesel particulate filters: Effect of renewable fuels. *Renewable Energy*, Vol. 104, pp. 30–39. DOI: 10.1016/j.renene.2016.11.059
125. Sadeghinezhad E., Kazi S. N., Sadeghinejad F., Badarudin A., Mehrali M., Sadri R., Reza Safaei M. (2014). A comprehensive literature review of bio-fuel performance in internal combustion engine and relevant costs involvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 29–44. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.022
126. Saladini F., Patrizi N., Pulselli F. M., Marchettini N., Bastianoni S. (2016). Guidelines for emergy evaluation of first, second and third generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, pp. 221–227. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.073
127. Serrano L., Santana B., Pires N., Correia C. (2021). Performance, Emissions, and Efficiency of Biodiesel versus Hydrotreated Vegetable Oils (HVO), Considering Different Driving Cycles Sensitivity Analysis (NEDC and WLTP). *Fuels*, Vol. 2, pp. 448–470. DOI: 10.3390/fuels2040026
128. Šimáček P., Kubička D., Šebor G., Pospíšil M. (2009). Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon-based biodiesel. *Fuel*, Vol. 88 (3), pp. 456–460. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.10.022
129. Šimáček P., Kubička D., Šebor G., Pospíšil M. (2010). Fuel properties of hydroprocessed rapeseed oil. *Fuel*, Vol. 89 (3), pp. 611–615. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.017
130. Singer A., Schröder O., Pabst C., Munack A., Bünger J., Ruck W., Krahel J. (2015). Aging studies of biodiesel and HVO and their testing as neat fuel and blends for exhaust emissions in heavy-duty engines and passenger cars. *Fuel*, Vol. 153 (2015), pp. 595–603. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.03.050
131. Singh D., Subramanian K. A., Garg M. O. (2018). Comprehensive review of combustion, performance and emissions characteristics of a compression ignition engine fueled with hydroprocessed renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 2947–2954. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.104
132. Singh D., Subramanian K. A., Singal S. K. (2015). Emissions and fuel consumption characteristics of a heavy duty diesel engine fueled with Hydroprocessed Renewable Diesel and Biodiesel. *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 440–446. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.06.020
133. Smigins R., Sondors K., Pirs V., Dukulis I., Birzietis G. (2023). Studies of Engine Performance and Emissions at Full-Load Mode Using HVO, Diesel Fuel, and HVO5. *Energies*, Vol. 16 (12), pp. 1–14. DOI: 10.3390/en16124785
134. Sondors K., Birkavs A., Pirs V., Birzietis G., Dukulis I. (2019). Comparison of vehicle performance using fossil diesel fuel blends with biodiesel and HVO fuel. *Engineering for Rural Development*, Vol. 18, pp. 964–970. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N052
135. Sondors K., Birkavs A., Dukulis I., Pirs V., Jesko Z. (2014). Investigation in tractor claas ares 557atx operating parameters using hydrotreated vegetable oil fuel. *Engineering for Rural Development*, Vol. 13, pp. 63–68.
136. Sondors K., Dukulis I. (2014). Theoretical evaluation of hydrotreated vegetable oil

- application in diesel engines. *Research for Rural Development*, Vol. 1, pp. 205–211.
137. Sondors K., Dukulis I., Pirs V., Birkavs A., Birzietis G., Gailis M. (2021). Comparison of car performance using HVO fuel and diesel fuel. *Engineering for Rural Development*, Vol. 20, pp. 1548–1557. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF331
 138. Sonthalia A., Kumar N. (2019). Hydroprocessed vegetable oil as a fuel for transportation sector: A review. *Journal of the Energy Institute*, Vol. 92, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.joei.2017.10.008
 139. Sonthalia A., Kumar N. (2021). Comparison of fuel characteristics of hydrotreated waste cooking oil with its biodiesel and fossil diesel. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28 (10), pp. 11824–11834. DOI: 10.1007/s11356-019-07110-w
 140. Suarez-Bertoa R., Kousoulidou M., Clairotte M., Giechaskiel B., Nuottimäki J., Sarjovaara T., Lonza L. (2019). Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation. *Fuel*, Vol. 235, pp. 1427–1435. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.031
 141. Subramaniam Y., Masron T. A., Azman N. H. N. (2020). Biofuels, environmental sustainability, and food security: A review of 51 countries. *Energy Research and Social Science*, Vol. 68, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101549
 142. Sugiyama K., Goto I., Kitano K., Mogi K. (2012). Effects of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as Renewable Diesel Fuel on Combustion and Exhaust Emissions in Diesel Engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 5 (1), pp. 205–217. DOI: 10.4271/2011-01-1954
 143. Sunde K., Brekke A., Solberg B. (2011). Environmental Impacts and Costs of Hydrotreated Vegetable Oils, Transesterified Lipids and Woody BTL—A Review. *Energies*, Vol. 4 (12), pp. 845–877. DOI: 10.3390/en4060845
 144. Szabó Z. (2019). Can biofuel policies reduce uncertainty and increase agricultural yields through stimulating investments? *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, Vol. 13, pp. 1224–1233. DOI: 10.1002/bbb.2011
 145. Szeto W., Leung D. Y. C. (2022). Is hydrotreated vegetable oil a superior substitute for fossil diesel? A comprehensive review on physicochemical properties, engine performance and emissions. *Fuel*, Vol. 327, pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125065
 146. Thompson W., Meyer S. (2013). Second generation biofuels and food crops: Co-products or competitors? *Global Food Security*, Vol. 2, pp. 89–96. DOI: 10.1016/j.gfs.2013.03.001
 147. Topcu M., Tugcu C. T. (2020). The impact of renewable energy consumption on income inequality: Evidence from developed countries. *Renewable Energy*, Vol. 151, pp. 1134–1140. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.103
 148. Turney S. (2022). *Student's t Table (Free Download) | Guide & Examples*. [tiešsaiste] [skatīts 03/30/2023]. Pieejams: <https://www.scribbr.com/statistics/students-t-table/>
 149. United Nations. (2021). *Greenhouse Gas Emissions Calculator*. [tiešsaiste] [skatīts 04/20/2023]. Pieejams: <https://unfccc.int/documents/271269>
 150. USA EPA. (2022). *Simplified GHG Emissions Calculator*. [tiešsaiste] [skatīts 04/20/2023]. Pieejams: <https://www.epa.gov/climateleadership/simplified-ghg-emissions-calculator>
 151. Van Basshuysen R., Schaefer F. (2016). *Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives* (2nd Editio). SAE International; 1134 p.
 152. Veeramuthu A., Ngamcharussrivichai C. (2020). Potential of microalgal biodiesel: Challenges and applications. *Renewable Energy - Technologies and Applications*, Vol. 9, pp. 51–60. DOI: 10.5772/intechopen.91651
 153. Veriansyah B., Han J. Y., Kim S. K., Hong S. A., Kim Y. J., Lim J. S., Shu Y. W., Oh S. G., Kim J. (2012). Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts. *Fuel*, Vol. 94, pp. 578–585. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.10.057
 154. Wang H., Hao H., Li X., Zhang K., Ouyang M. (2009). Performance of Euro III common rail heavy duty diesel engine fueled with Gas to Liquid. *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2257–2261. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.02.004

155. Wang Y., Qiu L., Reitz R. D., Diwakar R. (2014). Simulating cavitating liquid jets using a compressible and equilibrium two-phase flow solver. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 63, pp. 52–67. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.03.006
156. Xin Q. (2011). *Diesel engine system design*. Woodhead Publishing Limited; 1088 p.
157. Yang Z., Wang B., Jiao K. (2020). Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China. *Energy*, Vol. 198, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117365
158. Yehia O. R., Reuter C. B., Ju Y. (2019). Kinetic effects of n-propylbenzene on n-dodecane counterflow nonpremixed cool flames. *Combustion and Flame*, Vol. 208, pp. 262–272. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.006
159. ZW 500 Power Take-off Dynamometer. (2013). Original Operating Instructions, BA060801-en, MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co; 30 p.

PIELIKUMI

1. pielikums. PP-2 un PP-4 izmantotās NExBTL testēšanas pārskats

NESTE OIL

Certificate of Analysis

TT-13-000285

1 (2)

24.1.2013

Customer

Ari Engman

Distribution

Markku Kuronen

Subject

NExBTL

Samples

Item	Sample source	Sampling point	Collection dt	Sample id
1. NEXBTLTEST	MOOTTORIL erāt	289/12	18.12.2012 15:00	03013369
NExBTL, batch 289/12				

Results

Physical property	Method	Unit	Sample 1.
Density at 15°C	ENISO12185	kg/m3	778,9
Cloud point with the ISL mini automatic device	ASTMD7689	°C	-35
Cold filter plugging point	EN116	°C	-35
Viscosity at 40 °C	ENISO3104	mm2/s	2,884
Sulphur, UV	ENISO20846	mg/kg	<1
Water colourimetric	ENISO12937	mg/kg	19
Flash point, Pensky Martens	ENISO2719	°C	81,5
Copper Corrosion 3 h 50 °C	ENISO2160	no	1a
Contamination	EN12662	mg/kg	1
Ash, 775°C	ENISO6245	wt-%	<0,001
Cetane index	ENISO4264		>56,5
Micro Carbon Residue 10% bottom	ENISO10370	wt-%	<0,01
Acidity Total (TAN)	ASTMD3242	mg KOH/g	0,001
Monoaromatics	EN12916	wt-%	0,2
Diaromatics	EN12916	wt-%	<0,1
Tri+-aromatics	EN12916	wt-%	<0,10
Polyaromatics	EN12916	wt-%	<0,1
Aromatics	EN12916	wt-%	0,2
Gross heat of comb. calor.	ASTMD4809	MJ/kg	47,098
Oxidation stability	ENISO12205	g/m3	21
Carbon, C	ASTMD5291	wt-%	84,2
Hydrogen	ASTMD5291	wt-%	15,1
High Frequency Reciprocating Rig	ENISO12156-1	µm/60°C	343
Cetane Number by IQT-analyser	ASTMD6890		74,7
Distillation IBP	ENISO3405	°C	186,7
Distillation 5 vol-%	ENISO3405	°C	243,2
Distillation 10 vol-%	ENISO3405	°C	258,2
Distillation 20 vol-%	ENISO3405	°C	268,2
Distillation 30 vol-%	ENISO3405	°C	272,9
Distillation 40 vol-%	ENISO3405	°C	275,7
Distillation 50 vol-%	ENISO3405	°C	277,9
Distillation 60 vol-%	ENISO3405	°C	280,1
Distillation 70 vol-%	ENISO3405	°C	282,5
Distillation 80 vol-%	ENISO3405	°C	285,6
Distillation 90 vol-%	ENISO3405	°C	289,8

Physical property	Method	Unit	Sample 1.
Distillation 95 vol-%	ENISO3405	°C	293,5
Distillation FBP	ENISO3405	°C	302,3
Distillation Recovery	ENISO3405	vol-%	98,3
Distillation Residue	ENISO3405	vol-%	1,7
Distillation Loss	ENISO3405	vol-%	<0,1
Distillation 180°C (E180)	ENISO3405	vol-%	<0,1
Distillation 250°C (E250)	ENISO3405	vol-%	6,6
n-paraffins, C10 - C20	NM490A	wt-%	6,72
n-paraffins, C6 - C36	NM490A	wt-%	7,26
Appearance at 25°C (english)	ASTMD4176-1		C&B
Net heat of combustion	ASTMD4809	MJ/kg	43,894
Net heat of combustion	ASTMD4809	MJ/l	34,189

Electronical approval**Authored by**

Sari Väisänen
Laboratory Technician
sari.vaisanen@nesteoil.com

Approved by

Markku Kuronen
Associate
markku.kuronen@nesteoil.com

Laboratory

Neste Oil Oyj, Physical Analyses
Neste Oil Oyj, Research and Technology, Central Laboratory, P.O. Box 310, 06101 Porvoo, FINLAND

The laboratory is not responsible for sampling.
The test results relate to the items tested.
The Research Certificate can be copied only in whole.



Neste Oil Research and Technology applies
a Bureau Veritas Certification approved
ISO 9001 quality management system.
Certification number: FIHSK93639A

2. pielikums. PP-2 un PP-4 izmantotās FFD atbilstības apliecinājums

NESTE OIL

Atbilstības apliecinājums

Nr.NL- 0477

Izdots: Rīgā, 2013.gada 05.aprīlī

Derīgs līdz: 2013.gada 28.maijam.

Produkcijas apraksts: **DĪZEĻDEGVIELA ARKTISKĀ (0. klase)**

Kombinētās nomenklatūras kods: **27101943**

Apjoms: **4 994 060 kg**

ar sekojošiem rādītājiem:

Blīvums pie 15 ^o C	836.3 kg/m ³
Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	2.0 tilp %
Cetānskaitlis:	52.4
Cetāna indekss	50.7
Sērs:	8.9 mg/kg
Destilācijas rādītāji:	
180 ^o C iztvaikojošā degviela	0.5 %;
360 ^o C iztvaikojošā degviela	>97 %;
Sadūļošanās temperatūra	-10 ^o C
Auksta filtra nosprostošanās punkts (CFPP)	-24 ^o C
Viskozitāte 40 ^o C	2.581 mm ² /S

kas tiek uzglabāta tvertnēs **Nr.N2, Nr.N5** SIA "Neste Latvija" noliktavā, Laivinieku ielā 5, Rīgā, piegādāta no Neste Oil Oyj (Keilaranta 8, P.O.Box 95, FI-00095 Neste Oil, Finland), (elektroniskais administratīvais dokuments Nr.13FI00518523020950010 izdots 05.04.2013.)

atbilst Latvijas Republikas Ministru kabineta 2000.gada 26.septembra noteikumu Nr.332 "Noteikumi par benzīna un dīzeļdegvielas atbilstības novērtēšanu" prasībām.

Sertifikāta izdošanas pamatojums:

Neste Oil Oyj, Porvoo laboratorijas (P.O. Box 310, 06101 Porvoo, Somija) testēšanas pārskats Nr.LT-13-001165 izdots 04.04.2013.

Laboratorija ir sertificēta atbilstoši ISO/IEC 17025:2005, akreditācijas Nr.TO33/A10/2007.

Īpašie nosacījumi:

Atbilstības sertifikāts ir attiecināms uz augstāk minēto degvielas daudzumu ar norādītajiem kvalitātes rādītājiem



Zigismunds Niedra
Produktu iepirkumu un Termināla vadītājs



SIA Neste Latvija

Vienotais reģ. Nr.: 40003132723
Bauskas iela 58a
LV-1004, Rīga
Latvija

Tālr.: +371 66013355
Fakss: +371 66013375
neste.latvija@nesteoil.com
www.neste.lv



NESTE OIL**Refinery Certificate of Quality**

LT-13-001165

Page 1 of 1

4.4.2013

Refinery/Terminal	PORVOO	Sample number	03083832
Shore tank/Vessel	T13	Sampled	2.4.2013 10:00
Product number	150477	Vessel	MT ASTORIA
Batch number	201682	Loaded	
Code	DI3REE 01812	Destination	Riga
Selling Name	Winter Diesel, Arctic 0-class		
Product	Diesel DI3REE 018/12		
Customer	To the order of Neste Latvija Sia		

Property	Result		Method	Specification	
	Result	Unit		Min	Max
Appearance at 20°C	C&B		ASTMD4176-1		C&B
Cetane Number by IQT-analyser	52,4		ASTMD8890	51,0	
Cetane Index	50,7		ENISO4264	48,0	
Density at 15°C	836,3	kg/m3	ENISO12185	800,0	845,0
Polyaromatics	2,0	vol-%	EN12916		8,0
Sulphur, UV	8,9	mg/kg	ENISO20846		10,0
Flash point, Pensky Martens	64,0	°C	ENISO2719	55,0	
Micro Carbon Residue 10% bottom	<0,01	wt-%	ENISO10370		0,30
Ash, 775°C	<0,001	wt-%	ENISO6245		0,010
Water coulometric	40	mg/kg	ENISO12937		200
Contamination	1	mg/kg	EN12662		24
Copper Corrosion 3 h 50 °C	1a	no	ENISO2160		1b
Oxidation stability	<1	g/m3	ENISO12205		25
High Frequency Reciprocating Rig	455	µm/60°C	ENISO12156-1		480
Viscosity at 40 °C	2,581	mm2/s	ENISO3104	1,500	4,000
Distillation 180°C (E180)	0,5	vol-%	ENISO3405		10,0
Distillation 360°C (E360)	>97,0	vol-%	ENISO3405	95	
Cloud Point, automatic (whole number)	-10	°C	ASTMD5773		-10
Cold filter plugging point	-24	°C	EN116		-20
Electrical Conductivity	110	pS/m	ISO6297	50	

FAME is guaranteed to meet the specification without actual testing

Neste Oil Oyj as manufacturer of the product declares that the product meets the EN 590 standard and the Eesti Standard EVS-EN 590

Manufacturer's address: see Neste Oil laboratory address

Unless otherwise specified the latest published analysis method edition has been used.

Laboratory Neste Oil, Porvoo Quality Control
 Address Neste Oil Corporation, Porvoo Refinery, Central Laboratory, P.O. Box 310, 06101 Porvoo, FINLAND

Electronical approval
 Authored by
 Kari Ahonen
 Shift Supervisor

3. pielikums. PP-3 izmantotās FDD testēšanas pārskats

		SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU "LATVIJAS SERTIFIKĀCIJAS CENTRS" Lāčplēša iela 87, Rīga, LV-1011, Latvija, Vienotais reģ. Nr.50003298751			
LABORATORIJA					
tālrunis 67217837, fakss 67217820, e-mail: laboratorija@latcert.lv					
TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr. 70336					
1. Klients, tā adrese SIA "NESTE LATVIJA", Bauskas ielā 58a, Rīga					
2. Klienta sniegtā informācija pieteikumā produktu testēšanai Nr.L-9683 Parauga nosaukums Dīzeļdegviela Parauga lielums 3 litri					
3. Parauga apraksts Paraugs piegādāts metāla kanniņā ar uzrakstu: Dīzeļdegviela					
4. Testēšanas laiki Saņemts laboratorijā 30.09.2013. Sākts testēt 30.09.2013. Pabeigts 01.10.2013.					
5. Testēšanas rezultāti un metodes					
Testējamais rādītājs	Mērvienība	Rezultāts	Robežlielums*		Metode
			Mini-mālais	Maksi-mālais	
Cetāna skaitlis		52,5 (R=4,3)	51,0	-	LVS EN ISO 5165:2002
Cetāna indekss		53,6	46,0	-	LVS EN ISO 4264:2007
Blīvums pie 15°C	kg/m³	833,9 (R=0,5)	820,0	845,0	LVS EN ISO 12185:2002
Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	%(m/m)	1,4 (R=0,7)	-	8,0	LVS EN 12916:2006
Sēra saturs	mg/kg	9,9 (R=2,2)	-	10,0	LVS EN ISO 20846:2012
Pelnu saturs	%(m/m)	<0,001	-	0,01	LVS EN ISO 6245:2003
Koksēšanas atlikums (pie 10% destilēšanas atlikuma)	%(m/m)	<0,10	-	0,30	LVS EN ISO 10370:2002
Udens saturs	mg/kg	34 (R=40)	-	200	LVS EN ISO 12937:2002
Kopējais piesārņojums	mg/kg	3,4 (R=1,0)	-	24	LVS EN 12662:2009
Vara plāksnītes korozija (3h pie 50°C)	klase	1.a	1.		LVS EN ISO 2160:2003
Viskozitāte pie 40°C	mm²/s	2,834(R=0,031)	2,00	4,50	LVS EN ISO 3104:2003+AC
Destilācija					LVS EN ISO 3405:2011
- 95% (V/V) destilējies pie	°C	352,5 (R=9,0)		360	
- destilāts 180°C	%(v/v)	1,9 (R=2,7)			
- destilāts 250°C	%(v/v)	36,3 (R=2,7)		65	
- destilāts 340°C	%(v/v)	89,8 (R=2,7)			
- destilāts 350°C	%(v/v)	94,0 (R=2,7)	85		
Auksta filtra nosprostošanas punkts (CFPP)	°C	-16 (R=5)	-15		LVS EN 116+AC: 2002
Sadūļkošanās temperatūra	°C	-5 (R=4)			LVS EN 23015:2002
Taukskābes metilestera (FAME) saturs	%(v/v)	0,11 (R=0,03)		7,0	LVS EN 14078:2010

* pēc LVS EN 590 (E kategorija)


 Z. Vesperis
 Laboratorijas vadītājs
 01.10.2013.

Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrētajiem testēšanas (objektiem) paraugiem.
 Bez testēšanas laboratorijas rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā apjomā.

4. pielikums. PP-3 izmantotās BioDD7 testēšanas pārskats



SABIEDRĪBA AR IERĪBĒŽOTU ATBILDĪBU
"LATVIJAS SERTIFIKĀCIJAS CENTRS"
Lāčplēša iela 87, Rīga, LV-1011, Latvija,
Vienotais reģ. Nr.50003298751

LABORATORIJA

tālrunis 67217837, fakss 67217820,
e-mail: laboratorija@latcert.lv



TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr. 70334

- Klients, tā adrese
SIA "NESTE LATVIJA", Bauskas ielā 58a, Rīga
- Klienta sniegtā informācija pieteikumā produktu testēšanai Nr.L-9683
Parauga nosaukums **Dīzeļdegviela 7% Bio DD**
Parauga lielums **3 litri**
- Parauga apraksts
Paraugs piegādāts metāla kanniņā ar uzrakstu: Dīzeļdegviela 7% Bio DD
- Testēšanas laiki
Saņemts laboratorijā **30.09.2013.** Sākts testēt **30.09.2013.** Pabeigts **01.10.2013.**
- Testēšanas rezultāti un metodes

Testējamais rādītājs	Mērvienība	Rezultāts	Robežlielums*		Metode
			Mini-mālais	Maksi-mālais	
Cetāna skaitlis		52,8 (R=4,3)	51,0	-	LVS EN ISO 5165:2002
Cetāna indekss		54,1	46,0	-	LVS EN ISO 4264:2007
Blīvums pie 15°C	kg/m ³	837,2 (R=0,5)	820,0	845,0	LVS EN ISO 12185:2002
Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	%(m/m)	1,3 (R=0,7)	-	8,0	LVS EN 12916:2006
Sēra saturs	mg/kg	9,9 (R=2,2)	-	10,0	LVS EN ISO 20846:2012
Pelnu saturs	%(m/m)	<0,001	-	0,01	LVS EN ISO 6245:2003
Koksēšanas atlikums (pie 10% destilēšanas atlikuma)	%(m/m)	<0,10	-	0,30	LVS EN ISO 10370:2002
Ūdens saturs	mg/kg	55 (R=51)	-	200	LVS EN ISO 12937:2002
Kopējais piesārņojums	mg/kg	6,8 (R=2,1)	-	24	LVS EN 12662:2009
Vara plāksnītes korozija (3h pie 50°C)	klase	1.a	1.		LVS EN ISO 2160:2003
Viskozitāte pie 40°C	mm ² /s	2,917(R=0,032)	2,00	4,50	LVS EN ISO 3104:2003+AC
Destilācija					LVS EN ISO 3405:2011
- 95% (V/V) destilējies pie	°C	351,0 (R=8,9)		360	
- destilāts 180°C	%(v/v)	1,6 (R=2,7)			
- destilāts 250°C	%(v/v)	32,4 (R=2,7)		65	
- destilāts 340°C	%(v/v)	89,5 (R=2,7)			
- destilāts 350°C	%(v/v)	94,5 (R=2,7)	85		
Auksta filtra nosprostošanas punkts (CFPP)	°C	-17 (R=5)	-15		LVS EN 116+AC: 2002
Sadūļkošanās temperatūra	°C	-5 (R=4)			LVS EN 23015:2002
Taukskābes metilestera (FAME) saturs	%(v/v)	7,0 (R=0,5)		7,0	LVS EN 14078:2010

* pēc LVS EN 590 (E kategorija)

Z. Veseris
Laboratorijas vadītājs
01.10.2013.

Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrētajiem testēšanas (objektiem) paraugiem.
Bez testēšanas laboratorijas rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā apjomā.

5. pielikums. PP-3 izmantotās NExBTL7 testēšanas pārskats

		SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU "LATVIJAS CERTIFIKĀCIJAS CENTRS" Lāčplēša iela 87, Rīga, LV-1011, Latvija, Vienotais reģ. Nr.50003298751									
LABORATORIJA											
tālrunis 67217837, fakss 67217820, e-mail: laboratorija@latcert.lv											
TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr. 70335											
1. Klients, tā adrese SIA "NESTE LATVIJA", Bauskas ielā 58a, Rīga											
2. Klienta sniegtā informācija pieteikumā produktu testēšanai Nr.L-9683 Parauga nosaukums Dīzeļdegviela 7% NExBTL Parauga lielums 3 litri											
3. Parauga apraksts Paraugs piegādāts metāla kanniņā ar uzrakstu: Dīzeļdegviela 7% NExBTL											
4. Testēšanas laiki <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">Saņemts laboratorijā</td> <td style="width: 33%;">Sākts testēt</td> <td style="width: 33%;">Pabeigts</td> </tr> <tr> <td>30.09.2013.</td> <td>30.09.2013.</td> <td>01.10.2013.</td> </tr> </table>						Saņemts laboratorijā	Sākts testēt	Pabeigts	30.09.2013.	30.09.2013.	01.10.2013.
Saņemts laboratorijā	Sākts testēt	Pabeigts									
30.09.2013.	30.09.2013.	01.10.2013.									
5. Testēšanas rezultāti un metodes											
Testējamais rādītājs	Mērvienība	Rezultāts	Robežlielums*		Metode						
			Mini-mālais	Maksi-mālais							
Cetāna skaitlis		52,6 (R=4,3)	51,0	-	LVS EN ISO 5165:2002						
Cetāna indekss		55,7	46,0	-	LVS EN ISO 4264:2007						
Blīvums pie 15°C	kg/m³	830,0 (R=0,5)	820,0	845,0	LVS EN ISO 12185:2002						
Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	%(m/m)	1,2 (R=0,7)	-	8,0	LVS EN 12916:2006						
Sēra saturs	mg/kg	9,8 (R=2,2)	-	10,0	LVS EN ISO 20846:2012						
Pelnu saturs	%(m/m)	<0,001	-	0,01	LVS EN ISO 6245:2003						
Koksēšanas atlikums (pie 10% destilēšanas atlikuma)	%(m/m)	<0,10	-	0,30	LVS EN ISO 10370:2002						
Udens saturs	mg/kg	36 (R=41)	-	200	LVS EN ISO 12937:2002						
Kopējais piesārņojums	mg/kg	3,5 (R=1,1)	-	24	LVS EN 12662:2009						
Vara plāksnītes korozija (3h pie 50°C)	klase	1.a	1.		LVS EN ISO 2160:2003						
Viskozitāte pie 40°C	mm²/s	2,814(R=0,031)	2,00	4,50	LVS EN ISO 3104:2003+AC						
Destilācija					LVS EN ISO 3405:2011						
- 95% (V/V) destilējies pie	°C	351,5 (R=8,9)		360							
- destilāts 180°C	%(v/v)	1,7 (R=2,7)									
- destilāts 250°C	%(v/v)	33,8 (R=2,7)		65							
- destilāts 340°C	%(v/v)	90,6 (R=2,7)									
- destilāts 350°C	%(v/v)	94,3 (R=2,7)	85								
Auksta filtra nosprostošanas punkts (CFPP)	°C	-17 (R=5)	-15		LVS EN 116+AC: 2002						
Sadūļkošanās temperatūra	°C	-6 (R=4)			LVS EN 23015:2002						
Taukskābes metilesteru (FAME) saturs	%(v/v)	0,09 (R=0,03)		7,0	LVS EN 14078:2010						

* pēc LVS EN 590 (E kategorija)					
Z. Vesperis Laboratorijas vadītājs 01.10.2013.					
Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrētajiem testēšanas (objektiem) paraugiem. Bez testēšanas laboratorijas rakstiskas atļaujas nav atļauta testēšanas pārskata reproducēšana nepilnā apjomā.					

6. pielikums. PP-3 izmantoto degvielu siltumspēju testēšanas pārskati



SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU

«Virisma»

ATKRITUMPRODUKTU UN KURINĀMĀ IZPĒTES UN TESTĒŠANAS LABORATORIJA

Aizkraukles ielā 21, Rīgā, Latvijā, LV-1006
 Vienotais reģistrācijas numurs 40103018922

Tālr. (+371) 67558782; mob. 26321168
 Fakss (+371) 67558781; e-mail: jkalnacs@edi.lv

TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr.
TEST REPORT No.

2-031/14

Pasūtītājs:
 Customer

Neste Latvija, SIA

Datums
 Date

11.02.2014

Pasūtītāja šifrs paraugam
 Customer's Codes of the Samples

Parauga apraksts
 Description of the Samples

Dīzeļdegviela
 Diesel

Testēšanas mērķis
 Subject of examination

Noteikt kurināmā materiāla parametrus
 Determination of the fuel material characteristics

Testēšanas rezultāti materiālam kā saņemts (ja nav norādīts citādi)
Test results for material as received (if it is not specified differently)

Parametrs Parameter	Mērvien/ Unit of measure	Rezultāts Result	Nenoteikt. Uncertainty	Standarts Standard
Siltumspēja augstākā pie $V = \text{const}$, Q_{gr} ar Gross calorific value at $V = \text{const}$,	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	46.08 11 005 12.80	$\pm 0.5 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $P = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant pressure	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	43.45 10 377 12.07	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $V = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant value	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	43.52 10395 12.09	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918

Piezīme: Rēķinot zemāko siltumspēju, ņemti vērā sekojoši dīzeļdegvielas parametri:

$H = 12,4\%$; $O = 0,6 \%$

Paziņojumi (Announcements):

- Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrēto(iem) paraugu(iem).
Results of this Test Report concern only the present sample(s).
- Testēšanas pārskatu daļēji drīkst kopēt tikai ar SIA «Virisma» rakstisko atļauju.
Partially copy this Test Report is allowed only after the written permission of «Virisma» Ltd.

Atbildīgais par testēšanu
 Executive manager

Dr.fiz. J.Kalnačs





SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU

«Virisma»

ATKRITUMPRODUKTU UN KURINĀMĀ IZPĒTES UN TESTĒŠANAS LABORATORIJA

Aizkraukles ielā 21, Rīgā, Latvijā, LV-1006
 Vienotais reģistrācijas numurs 40103018922

Tālr. (+371) 67558782; mob. 26321168
 Fakss (+371) 67558781; e-mail: jkalnacs@edi.lv

TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr.
TEST REPORT No.

2-032/14

Pasūtītājs:
 Customer

Neste Latvija, SIA

Datums
 Date

11.02.2014

Pasūtītāja šifrs paraugam
 Customer's Codes of the Samples

Parauga apraksts
 Description of the Samples

Biodīzeļdegviela
 Bio Diesel

Testēšanas mērķis
 Subject of examination

Noteikt kurināmā materiāla parametrus
 Determination of the fuel material characteristics

Testēšanas rezultāti materiālam kā saņemts (ja nav norādīts citādi)**Test results** for material as received (if it is not specified differently)

Parametrs Parameter	Mērvien/ Unit of measure	Rezultāts Result	Nenoteikt. Uncertainty	Standarts Standard
Siltumspēja augstākā pie $V = \text{const}$, Q_{gr} ar Gross calorific value at $V = \text{const}$,	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	40.12 9581 11.14	$\pm 0.5 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $P = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant pressure	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	37.22 8891 10.34	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $V = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant value	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	37.32 8912 10.37	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918

Piezīme: Rēķinot zemāko siltumspēju, ņemti vērā sekojoši biodīzeļdegvielas parametri:

 $H = 13,6\%$; $O = 11,0 \%$ **Paziņojumi (Announcements):**

- Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrēto(iem) paraugu(iem).
Results of this Test Report concern only the present sample(s).
- Testēšanas pārskatu *daļēji* drīkst kopēt tikai ar SIA «Virisma» rakstisko atļauju.
Partially copy this Test Report is allowed only after the written permission of

«Virisma» Ltd.

Atbildīgais par testēšanu
 Executive manager

Dr.fiz. J.Kalnačs





SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU

«Virma»

ATKRITUMPRODUKTU UN KURINĀMĀ IZPĒTES UN TESTĒŠANAS LABORATORIJA

Aizkraukles ielā 21, Rīgā, Latvijā, LV-1006
 Vienotais reģistrācijas numurs 40103018922

Tālr. (+371) 67558782; mob. 26321168
 Fakss (+371) 67558781; e-mail: jkalnacs@edi.lv

TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr.
TEST REPORT No.

2-034/14

Pasūtītājs:
 Customer

Neste Latvija, SIA

Datums
 Date

11.02.2014

Pasūtītāja šifrs paraugam
 Customer's Codes of the Samples

Parauga apraksts
 Description of the Samples

NexBTL

Testēšanas mērķis
 Subject of examination

Noteikt kurināmā materiāla parametrus
 Determination of the fuel material characteristics

Testēšanas rezultāti materiālam kā saņemts (ja nav norādīts citādi)**Test results** for material as received (if it is not specified differently)

Parametrs Parameter	Mērvien/ Unit of measure	Rezultāts Result	Nenoteikt. Uncertainty	Standarts Standard
Siltumspēja augstākā pie $V = \text{const}$, Q_{gr} ar Gross calorific value at $V = \text{const}$,	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	47.26 11 286 13.13	$\pm 0.5 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $P = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant pressure	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	44.08 10 527 12.24	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $V = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant value	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	44.17 10 549 12.27	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918

Piezīme: Rēķinot zemāko siltumspēju, ņemti vērā sekojoši degvielas parametri:

 $H = 15.2\%$; $O = 0\%$ **Paziņojumi (Announcements):**

- Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrēto(iem) paraugu(iem).
Results of this Test Report concern only the present sample(s).
- Testēšanas pārskatu daļēji drīkst kopēt tikai ar SIA «Virma» rakstisko atļauju.
Partially copy this Test Report is allowed only after the written permission of

«Virma» Ltd.

Atbildīgais par testēšanu
 Executive manager

Dr.fiz. J.Kalnačs





SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU

«Virisma»

ATKRITEPRODUKTU UN KURINĀMĀ IZPĒTES UN TESTĒŠANAS LABORATORIJA

Aizkraukles ielā 21, Rīgā, Latvijā, LV-1006
 Vienotais reģistrācijas numurs 40103018922

Tālr. (+371) 67558782; mob. 26321168
 Fakss (+371) 67558781; e-mail: jkalnacs@edi.lv

TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr.
TEST REPORT No.

2-033/14

Pasūtītājs:
 Customer

Neste Latvija, SIA

Datums
 Date

11.02.2014

Pasūtītāja šifrs paraugam
 Customer's Codes of the Samples

Parauga apraksts
 Description of the Samples

Dīzeļdegviela + 7% biodīzeļdegvielas
 Diesel + 7 % bio diesel

Testēšanas mērķis
 Subject of examination

Noteikt kurināmā materiāla parametrus
 Determination of the fuel material characteristics

Testēšanas rezultāti materiālam kā saņemts (ja nav norādīts citādi)**Test results** for material as received (if it is not specified differently)

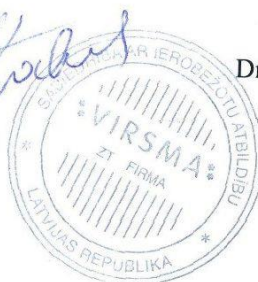
Parametrs Parameter	Mērvien/ Unit of measure	Rezultāts Result	Nenoteikt. Uncertainty	Standarts Standard
Siltumspēja augstākā pie $V = \text{const}$, Q_{gr} ar Gross calorific value at $V = \text{const}$,	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	45.59 10 888 12.66	$\pm 0.5 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $P = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant pressure	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	42.94 10 256 11.93	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $V = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant value	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	43.02 10 274 11.95	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918

Paziņojumi (Announcements):

1. Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrēto(iem) paraugu(iem).
Results of this Test Report concern only the present sample(s).
2. Testēšanas pārskatu daļēji drīkst kopēt tikai ar SIA «Virisma» rakstisko atļauju.
Partially copy this Test Report is allowed only after the written permission of «Virisma» Ltd.

Atbildīgais par testēšanu
 Executive manager

Dr.fiz. J.Kalnačs





SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU

«Virisma»

ATKRITUMPRODUKTU UN KURINĀMĀ IZPĒTES UN TESTĒŠANAS LABORATORIJA

Aizkraukles ielā 21, Rīgā, Latvijā, LV-1006
 Vienotais reģistrācijas numurs 40103018922

Tālr. (+371) 67558782; mob. 26321168
 Fakss (+371) 67558781; e-mail: jkalnacs@edi.lv

TESTĒŠANAS PĀRSKATS Nr. TEST REPORT No.

2-035/14

Pasūtītājs:
Customer

Neste Latvija, SIA

Datums
Date

11.02.2014

Pasūtītāja šifrs paraugam
Customer's Codes of the Samples

Parauga apraksts
Description of the Samples

Dīzeldegviela + 7% NexBTL
Diesel + 7 % NexBTL

Testēšanas mērķis
Subject of examination

Noteikt kurināmā materiāla parametrus
Determination of the fuel material characteristics

Testēšanas rezultāti materiālam kā saņemts (ja nav norādīts citādi)

Test results for material as received (if it is not specified differently)

Parametrs Parameter	Mērvien/ Unit of measure	Rezultāts Result	Nenoteikt. Uncertainty	Standarts Standard
Siltumspēja augstākā pie $V = \text{const}$, Q_{gr} ar Gross calorific value at $V = \text{const}$,	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	46.21 11 038 12.84	$\pm 0.5 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $P = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant pressure	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	43.54 10 400 12.09	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918
Siltumspēja zemākā pie $V = \text{const}$, Q_{net} ar Net calorific value at constant value	MJ/kg kcal/kg MWh/ton	43.62 10 417 12.12	$\pm 1 \%$	LVS EN 14918

Paziņojumi (Announcements):

- Testēšanas rezultāti attiecas tikai uz konkrēto(iem) paraugu(iem).
Results of this Test Report concern only the present sample(s).
- Testēšanas pārskatu *daļēji* drīkst kopēt tikai ar SIA «Virisma» rakstisko atļauju.
Partially copy this Test Report is allowed only after the written permission of «Virisma» Ltd.

Atbildīgais par testēšanu
Executive manager

Dr.fiz. J.Kalnačs



7. pielikums. PP-5 izmantotās FDD atbilstības apliecinājums un testēšanas pārskats

Atbilstības apliecinājums

Nr. NL- 1586

Izdots: Rīgā, 2021.gada 13. decembrī

Derīgs līdz: 2022.gada 13. martam

Produkcijas apraksts: **DĪZELDEGVIELA ARKTISKĀ (2.klase)**

Kombinētās nomenklatūras kods: **27101943**

Apjoms: **3846864 kg**

ar sekojošiem rādītājiem:

Būvums pie 15°C	816.1 kg/m ³
Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	1.1 tilpuma %
Cetānskaitlis:	53.8
Cetāna indekss	50.3
Sērs:	4.7 mg/kg
Destilācijas rādītāji:	
180°C iztvaikojošā degviela	1.3 %
340°C iztvaikojošā degviela	>97.8%
Sadukšanas temperatūra	-28°C
Auksta filtra nosprostošanās punkts (CFPP)	-40°C
Viskozitāte 40°C	1.853 mm ² /S

kas tiek uzglabāta tvertnēs Nr. N6 SIA "Neste Latvija" noliktavā, Laivinieku ielā 5, Rīgā, piegādāta no Neste Oyj (Keilaranta 21, P.O.Box 95, FI-00095 Neste, Finland), elektroniskais administratīvais dokuments Nr. 21FI07718523023440059 izdots 10.12.2021.

atbilst Latvijas Republikas Ministru kabineta 2000.gada 26.septembra noteikumu Nr.332 "Noteikumi par benzīna un dīzeldegvielas atbilstības novērtēšanu" prasībām.

Sertifikāta izdošanas pamatojums:

SGS Latvija Ltd. (Katrīnas iela 5, Rīga, LV-1045) Rīgas OGC laboratorijas testēšanas pārskats Nr. LV.30.21.0906.L10 izdots 14.12.2021.

Laboratorija ir sertificēta atbilstoši ISO/IEC 17025:2005, akreditācijas Nr. LATAK-T-320-06-2006.

Īpašie nosacījumi:

Atbilstības sertifikāts ir attiecināms uz augstāk minēto degvielas daudzumu ar norādītajiem kvalitātes rādītājiem

Kristaps Poikāns
Termināla maiņas priekšnieks



Certificate of Analyses No. LV.30.21.0906.L.10

Cargo grade	DIESEL A2 - GRADE (EN 590)
Sample description / No.	1 x 5000 ml plastic can / No. 14763
Sample labelled	U/M/L Sample ex Shore Tank No. N6 (GSV- 4 967.027 cbm, GSW – 4 053.591 mt) at Neste Terminal, Riga
Sample taken	on 13 th of December, 2021
Sample received by laboratory	on 13 th of December, 2021
Sealed	Unsealed
Date of testing	on 13 th – 14 th of December, 2021
Client	SIA NESTE LATVIJA

TESTS, UNITS	METHODS	SPECIFICATION	RESULTS
Ash Content, % m/m	EN ISO 6245	0.010 max	Less than 0.001
Carbon Residue (on 10% distillation residue), % m/m	EN ISO 10370	0.30 max	Less than 0.10
Cetane Index,	EN ISO 4264	46.0 min	50.3
Cetane Number*,	EN ISO 5165	51.0 min	53.8
Cloud Point, °C	EN 23015	-22 max	-28
Cold Filter Plugging Point, °C	EN 116	-32 max.	-40
Copper Strip Corrosion 3h @ 50°C,	EN ISO 2160	class I	1a
Density @ 15.0° C, kg/m ³	EN ISO 12185	800.0 – 840.0	816.1
Distillation @ 760 mm Pressure,	EN ISO 3405		
Recovered @ 180°C, % v/v		10.0 max	1.3
Recovered @ 340°C, % v/v		95.0 min	More than 97.8
95% v/v recovered at, °C		360 max.	305.4
Final Boiling Point (recovered 97.8 % v/v), °C			321.3
Fatty Acid Methyl Esters, % v/v	EN 14078/A	7.0 max	Less than 0.05
Flash Point PMCC, °C	EN ISO 2719/A	55.0 min	58.5
Lubricity at 60°C (WS 1.4), µm	EN ISO 12156-1/B	460 max.	410
Manganese Content, mg/l	EN 16576	2.0 max	Less than 0.5
Oxidation Stability total insoluble, g/m ³	EN ISO 12205	25 max.	1
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, % m/m	EN 12916	8.0 max	1.1
Sulphur Content, mg/kg	EN ISO 20846	10.0 max	4.7
Total Contamination, mg/kg	EN 12662	24 max	Less than 12.0
Viscosity Kinematics @ 40°C, mm ² /s	EN ISO 3104	1.500– 4.000	1.853
Water Content by Coulometric KF, mg/kg	EN ISO 12937	200 max.	25

The results shown in this test report specifically refer to the sample(s) tested as received unless otherwise stated. All tests have been performed using the latest revision of the methods indicated, unless specifically marked otherwise on the report. Precision parameters apply in the determination of the above results. Users of analytical results, when establishing conformance with commercial or regulatory requirements should note the full provisions of ASTM D3244, IP 367 and ISO 4259 in that context, the default confidence level of petroleum testing having been set at the 95% confidence level. Your attention is specifically drawn to Sections 7.3.6., 7.3.7 and 7.3.8 of ASTM D3244. With respect to the UOP methods listed in the report above the user is referred to the method and the statement within it specifying that the precision statements were determined using UOP Method 999.

*The laboratory analysis for the Sub-Contract Laboratory tests are provided by: S2 – SGS Contract Laboratory


Larisa Bondarchuk
Deputy Laboratory Manager



on and on behalf of
SGS Latvija Ltd.
Ventspils, 14th of December, 2021
Page 1 of 1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained herein reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

SGS Latvija Ltd. Oil, Gas & Chemicals Services 66 Dzintaru str. LV-3602 Ventspils Latvia t +371 6363 3046 f +371 6362 6334 www.sgs.com
Member of the SGS Group (Société Générale de Surveillance)

8. pielikums. **PP-5** izmantotās *Neste My* atbilstības apliecinājums un testēšanas pārskats

Atbilstības apliecinājums

Nr. NL- 1562

Izdots: Rīgā, 2021.gada 19. oktobrī

Derīgs līdz: 2022.gada 19. janvārim

Produkcijas apraksts: **DĪZEĻDEGVIELA (NESTE MY 100%)**

Kombinētās nomenklatūras kods: **27101943**

Apjoms: **3537266 kg**

ar sekojošiem rādītājiem:

Būvums pie 15°C	780.8 kg/m ³
Cetānskaitlis:	74.5
Sērs:	<1.0 mg/kg
Destilācijas rādītāji:	
250°C iztvaikojošā degviela	4.8 %;
350°C iztvaikojošā degviela	> 98.1%
Sadūļošanās temperatūra	-34°C
Auksta filtra nosprostošanās punkts (CFPP)	-38°C
NESTE atjaunojamā dīzeļdegviela	100%
Viskozitāte 40°C	3.025 mm ² /S

kas tiek uzglabāta tvertnē Nr. N2 SIA "Neste Latvija" noliktavā, Laivinieku ielā 5, Rīgā, piegādāta no Koole Tankstorage Botlek B.V. (Oude Maasweg 6, 3197 KJ Botlek Rotterdam, Netherlands), eAD Nr. 21NL91202415697910582 izdots 13.10.2021.

atbilst Latvijas Republikas Ministru kabineta 2000.gada 26.septembra noteikumu Nr.332 "Noteikumi par benzīna un dīzeļdegvielas atbilstības novērtēšanu" prasībām un 2007.gada 31.jūlija noteikumu Nr.525 "Kārtība, kādā atsevišķiem naftas produktiem piemēro samazinātu akcīzes nodokļa likmi vai atbrīvojumu no akcīzes nodokļa" prasībām.

Sertifikāta izdošanas pamatojums:

SGS Latvija Ltd. (Katrīnas iela 5, Rīga, LV1045) Rīgas OGC laboratorijas testēšanas pārskats Nr. LV.30.21.0736.L.6 izdots 19.10.2021.

Laboratorija ir sertificēta atbilstoši ISO/IEC 17025:2005, akreditācijas Nr. LATAK-T-320-06-2006.

Īpašie nosacījumi:

Atbilstības sertifikāts ir attiecināms uz augstāk minēto degvielas daudzumu ar norādītajiem kvalitātes rādītājiem

Kristaps Poikāns
Termināla maģistras priekšnieks



Certificate of Analyses No. LV.30.21.0736.L.6

Cargo grade	NESTE RENEWABLE DIESEL (EN 15940)
Sample description / No.	1 x 5000 ml metal can / No. 12491
Sample labelled	U/M/L Composite Sample ex Shore Tank No. N2 (Gross weight (vac) – 3 537.266 mt)
	at Neste Terminal, Riga
Sample taken	on 18 th of October, 2021
Sample received by laboratory	on 18 th of October, 2021
Sealed	Unsealed
Date of testing	on 18 th – 19 th of October, 2021
Client	SIA NESTE LATVIJA

TESTS, UNITS	METHODS	SPECIFICATION	RESULTS
Ash Content, % m/m	EN ISO 6245	0.010 max	Less than 0.001
Carbon Residue (on 10% distillation residue), % m/m	EN ISO 10370	0.30 max	Less than 0.10
Cetane Number*	EN ISO 5165	70.0 min	74.4
Cloud Point, °C	EN 23015		-34
Cold Filter Plugging Point, °C	EN 116		-38
Copper Strip Corrosion 3h @ 50°C,	EN ISO 2160	class 1	1a
Density @ 15.0° C, kg/m ³	EN ISO 12185	765.0 – 800.0	780.8
Distillation @ 760 mm Pressure,	EN ISO 3405		
Recovered @ 250°C, % v/v		65.0 max	4.8
Recovered @ 350°C, % v/v		85.0 min	More than 98.9
95% v/v recovered at, °C		360 max	297.2
Final Boiling Point (recovered 98.9 % v/v), °C			315.3
Fatty Acid Methyl Esters, % v/v	EN 14078/A	7.0 max	Less than 0.05
Flash Point PMCC, °C	EN ISO 2719/A	55.0 min	70.5
Lubricity at 60°C (WS 1.4), µm	EN ISO 12156-1/B	460 max	330
Manganese Content, mg/l	EN 16576	2.0 max	Less than 0.5
Oxidation Stability			
total insoluble, g/m ³	EN ISO 12205	25 max	1
Total Aromatic Content, % m/m	EN 12916(+ Annex C from EN 15940)	1.1 max	0.2
Sulphur Content, mg/kg	EN ISO 20846	5.0 max	Less than 1.0
Total Contamination, mg/kg	EN 12662	24 max	Less than 12.0
Viscosity Kinematics @ 40°C, mm ² /s	EN ISO 3104	2.000–4.500	3.025
Water Content by Coulometric KF, mg/kg	EN ISO 12937	200 max	28

The results shown in this test report specifically refer to the sample(s) tested as received unless otherwise stated. All tests have been performed using the latest revision of the methods indicated, unless specifically marked otherwise on the report. Precision parameters apply in the determination of the above results. Users of analytical results, when establishing conformance with commercial or regulatory requirements should note the full provisions of ASTM D3244, IP 367 and ISO 4259 in that context, the default confidence level of petroleum testing having been set at the 95% confidence level. Your attention is specifically drawn to Sections 7.3.6., 7.3.7 and 7.3.8 of ASTM D3244. With respect to the UOP methods listed in the report above the user is referred to the method and the statement within it specifying that the precision statements were determined using UOP Method 999

*The laboratory analysis for the Sub-Contract Laboratory tests are provided by: S2 – Sub-Contract Laboratory


Larisa Bondarchuk
Deputy Laboratory Manager



For and on behalf of
SGS Latvija Ltd.
Ventspils, 19th of October, 2021
Page 1 of 1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained herein reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

SGS Latvija Ltd. Oil, Gas & Chemicals Services 66 Dzintaru str. LV-3602 Ventspils Latvia t +371 6363 3046 f +371 6362 6334 www.sgs.com

Member of the SGS Group (Société Générale de Surveillance)

9. pielikums. PP-5 izmantotās Pro Diesel atbilstības apliecinājums un testēšanas pārskats

Atbilstības apliecinājums

Nr. NL - 1573

Izdots: Rīgā, 2021.gada 10. novembrī

Derīgs līdz: 2022.gada 10. februārī

Produkcijas apraksts: **DĪZEĻDEGVIELA (PRO DIESEL)**

Kombinētās nomenklatūras kods: **27101943**

Apjoms: **3587699 kg**

ar sekojošiem rādītājiem:

Blīvums pie 15°C	807.4 kg/m ³
Policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži	0.5 tilpuma %
Cetānskaitlis:	55.0
Cetāna indekss	52.8
Sērs:	1.1 mg/kg
Destilācijas rādītāji:	
340°C iztvaikojošā degviela	>97.7%
Temperatūra, kad iztvaicēts 95% V/V degvielas	311.1°C
Sadūļkošanās temperatūra	-33°C
Auksta filtra nosprostošanās punkts (CFPP)	-42°C
Viskozitāte 40°C	1.797 mm ² /S
NESTE atjaunojamā dīzeļdegviela	5.21%

kas tiek uzglabāta tvertnē Nr.N4, SIA "Neste Latvija" noliktavā, Laivinieku ielā 5, Rīgā, piegādāta no Neste Oyj (Keilaranta 21, P.O.Box 95, FI-00095 Neste, Finland), elektroniskais administratīvais dokuments Nr. 21FI07718523023070062 izdots 03.11.2021.

atbilst Latvijas Republikas Ministru kabineta 2000.gada 26.septembra noteikumu Nr.332 "Noteikumi par benzīna un dīzeļdegvielas atbilstības novērtēšanu" prasībām.

Sertifikāta izdošanas pamatojums:

- SGS Latvija Ltd. (Katrīnas iela 5, Rīga, LV-1045) Rīgas OGC laboratorijas testēšanas pārskats Nr. LV.30.21.0799.L.5 izdots 11.11.2021.
Laboratorija ir sertificēta atbilstoši ISO/IEC 17025:2005, akreditācijas Nr. LATAK-T-320-06-2006.

Īpašie nosacījumi:

Atbilstības sertifikāts ir attiecināms uz augstāk minēto degvielas daudzumu ar norādītajiem kvalitātes rādītājiem

Vēsma Trama
Termināla loģistikas speciāliste



Certificate of Analyses No. LV.30.21.0799.L.5

Cargo grade	DIESEL PRO-32, WINTER GRADE (EN 590)
Sample description / No.	1 x 3000 ml metal can/ No. 13496
Sample labelled	UML Sample ex Shore Tank No. N4 (GSV- 4 443.521 cbm, GSW – 3 587.699 mt)
	at Neste Terminal, Riga
Sample taken	on 10 th of November, 2021
Sample received by laboratory	on 10 th of November, 2021
Sealed	Unsealed
Date of testing	on 10 th – 11 th of November, 2021
Client	SIA NESTE LATVIJA

TESTS, UNITS	METHODS	SPECIFICATION	RESULTS
Ash Content, % m/m	EN ISO 6245	0.001 max.	Less than 0.001
Carbon Residue (on 10% distillation residue), % m/m	EN ISO 10370	0.20 max.	Less than 0.10
Cetane Index,	EN ISO 4264	52.0 min.	52.8
Cetane Number*,	EN ISO 5165	55.0 min.	55.0
Cloud Point, °C	EN 23015	-32 max.	-33
Cold Filter Plugging Point, °C	EN 116	-37 max.	-42
Copper Strip Corrosion 3h @ 50°C,	EN ISO 2160	class 1	1a
Density @ 15.0° C, kg/m ³	EN ISO 12185	800.0 – 840.0	807.4
Distillation @ 760 mm Pressure,	EN ISO 3405		
Recovered @ 180°C, % v/v		10.0 max.	3.0
Recovered @ 340°C, % v/v		95.0 min.	More than 97.7
95% v/v recovered at, °C		340.0 max.	311.1
Final Boiling Point (recovered 97.7% v/v), °C			331.5
Fatty Acid Methyl Esters, % v/v	EN 14078/A	FAME free	Less than 0.05
Flash Point PMCC, °C	EN ISO 2719/A	56.0 min.	56.5
Lubricity at 60°C (WS 1.4), µm	EN ISO 12156-1/B	400 max.	340
Manganese Content, mg/l	EN 16576	2.0 max	Less than 0.5
Oxidation Stability total insoluble, g/m ³	EN ISO 12205	25 max	1
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, % m/m	EN 12916	2.0 max.	0.5
Sulphur Content, mg/kg	EN ISO 20846	10.0 max.	1.1
Total Contamination, mg/kg	EN 12662	24 max.	Less than 12.0
Viscosity Kinematics @ 40°C, mm ² /s	EN ISO 3104	1.500– 4.000	1.797
Water Content by Coulometric KF, mg/kg	EN ISO 12937	200 max.	23
Content of Neste Renewable Diesel, % v/v	Average Calc.	5 min.	5.21**

The results shown in this test report specifically refer to the sample(s) tested as received unless otherwise stated. All tests have been performed using the latest revision of the methods indicated, unless specifically marked otherwise on the report. Precision parameters apply in the determination of the above results. Users of analytical results, when establishing conformance with commercial or regulatory requirements should note the full provisions of ASTM D3244, IP 367 and ISO 4259 in that context, the default confidence level of petroleum testing having been set at the 95% confidence level. Your attention is specifically drawn to Sections 7.3.6., 7.3.7 and 7.3.8 of ASTM D3244. With respect to the UOP methods listed in the report above the user is referred to the method and the statement within it specifying that the precision statements were determined using UOP Method 999.

*The laboratory analysis for the Sub-Contract Laboratory tests are provided by: S2 – Sub-Contract Laboratory

** Result was calculated from Refinery Certificate of Quality LT-21-003228


Larisa Bondarchuk
Deputy Laboratory Manager

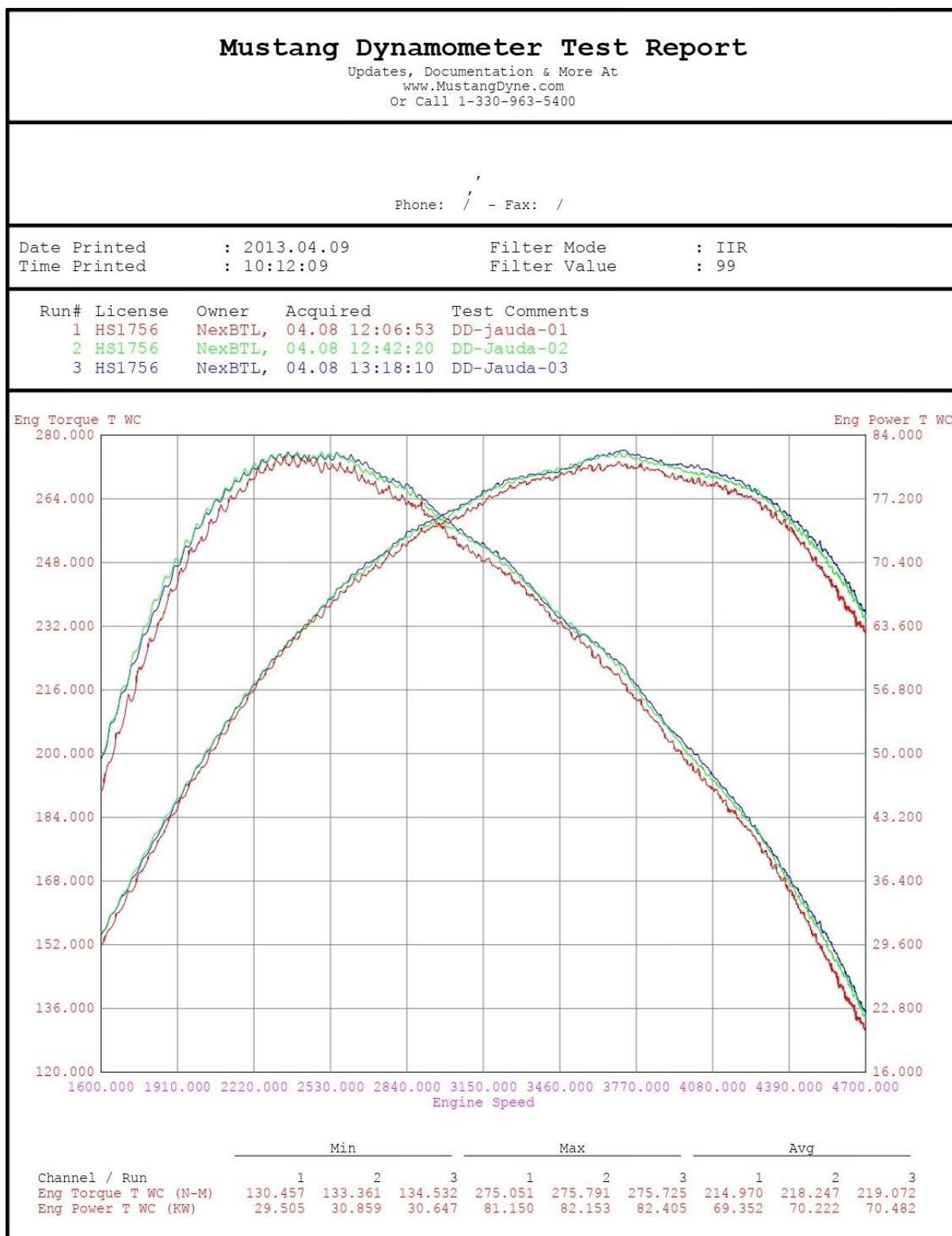


For and on behalf of
SGS Latvija Ltd.
Ventspils, 11th of November, 2021
Page 1 of 1

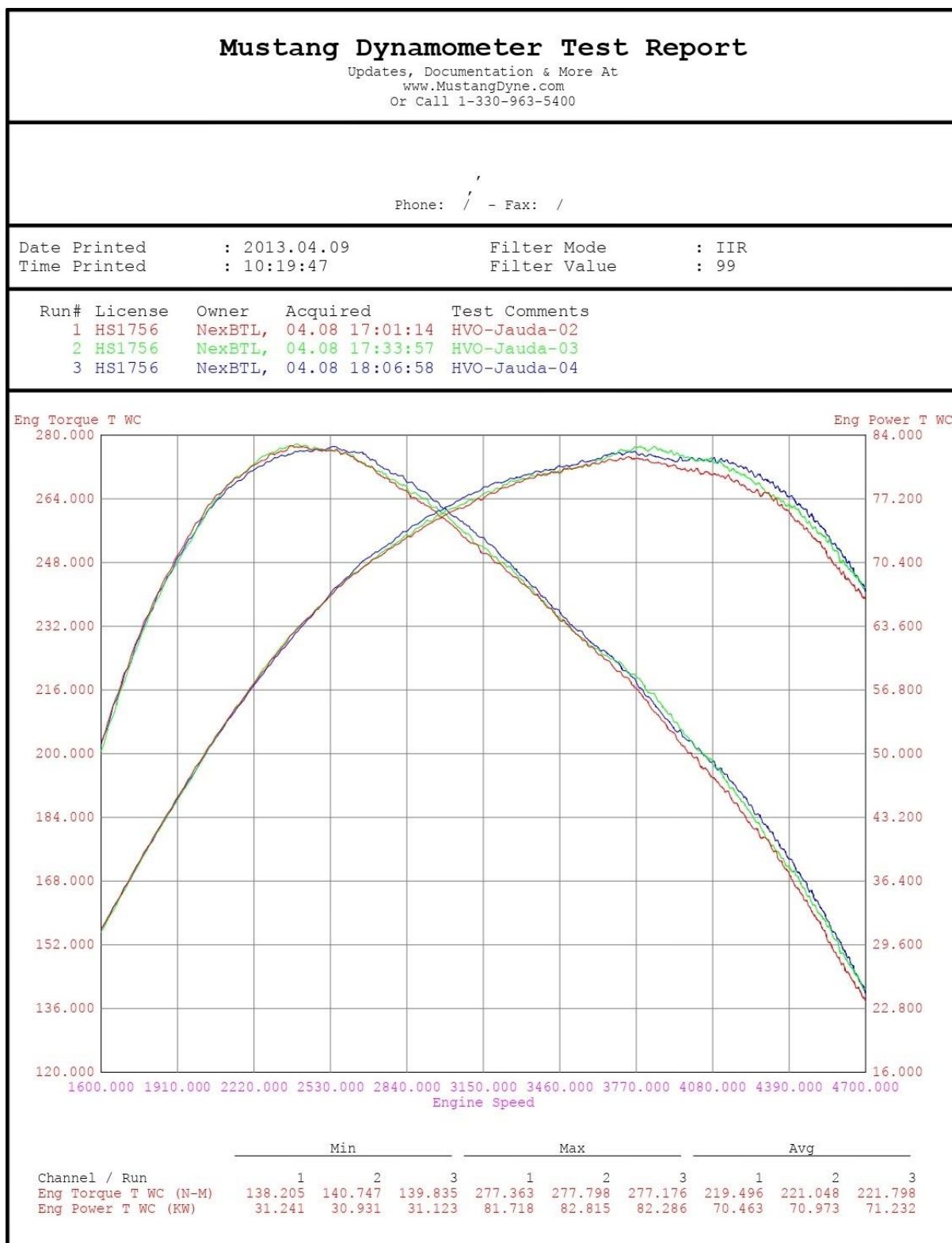
This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

SGS Latvija Ltd. | Oil, Gas & Chemicals Services 66 Dzintaru str. LV-3602 Ventspils Latvia t +371 6363 3046 f +371 6362 6334 www.sgs.com
Member of the SGS Group (Société Générale de Surveillance)

10. pielikums. Neapstrādātas automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar FDD pētījumu programmā PP-2



11. pielikums. Neapstrādātas automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar HVO degvielu pētījumu programmā PP-2



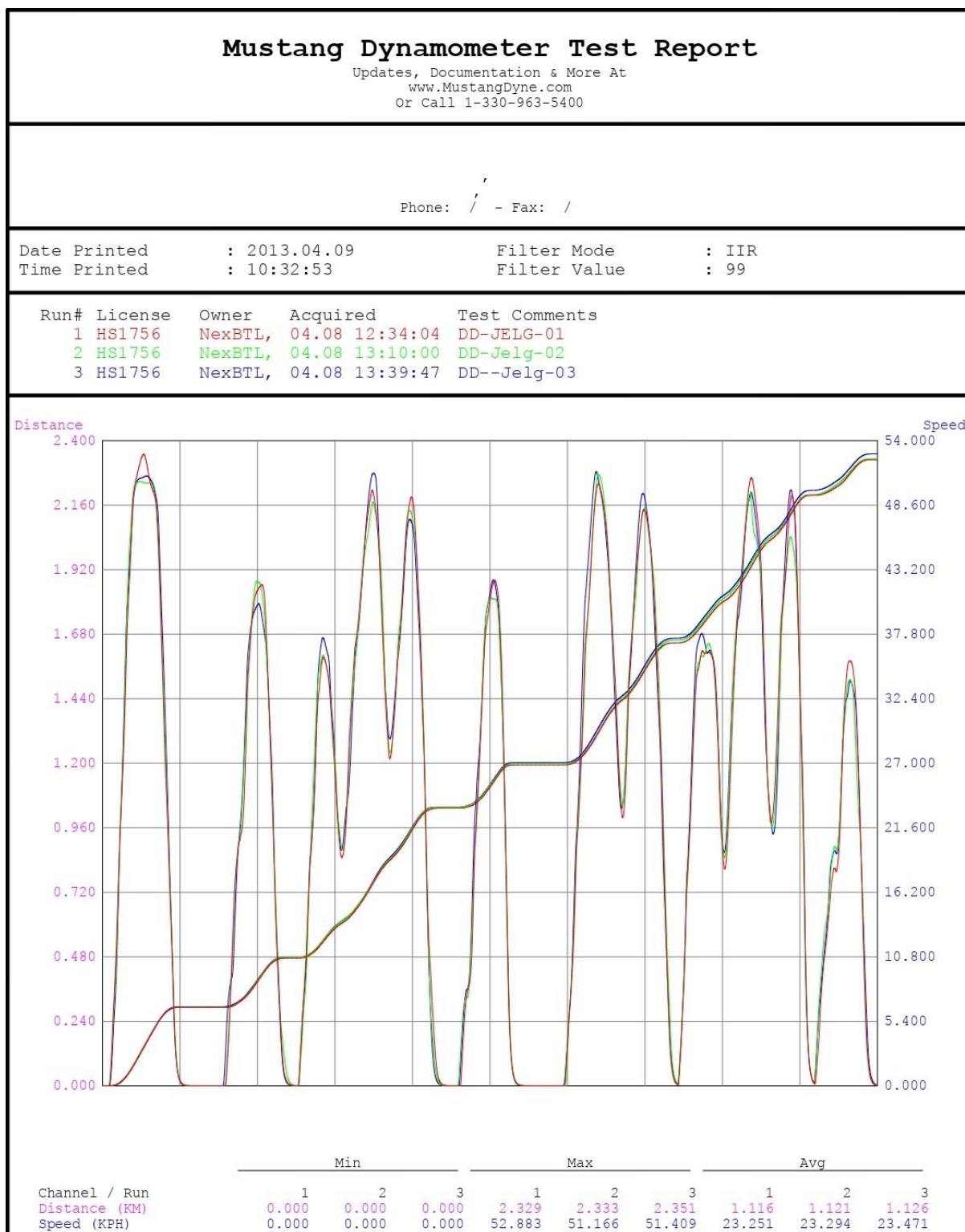
12. pielikums. **Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili ar FDD pētījumu programmā PP-2**



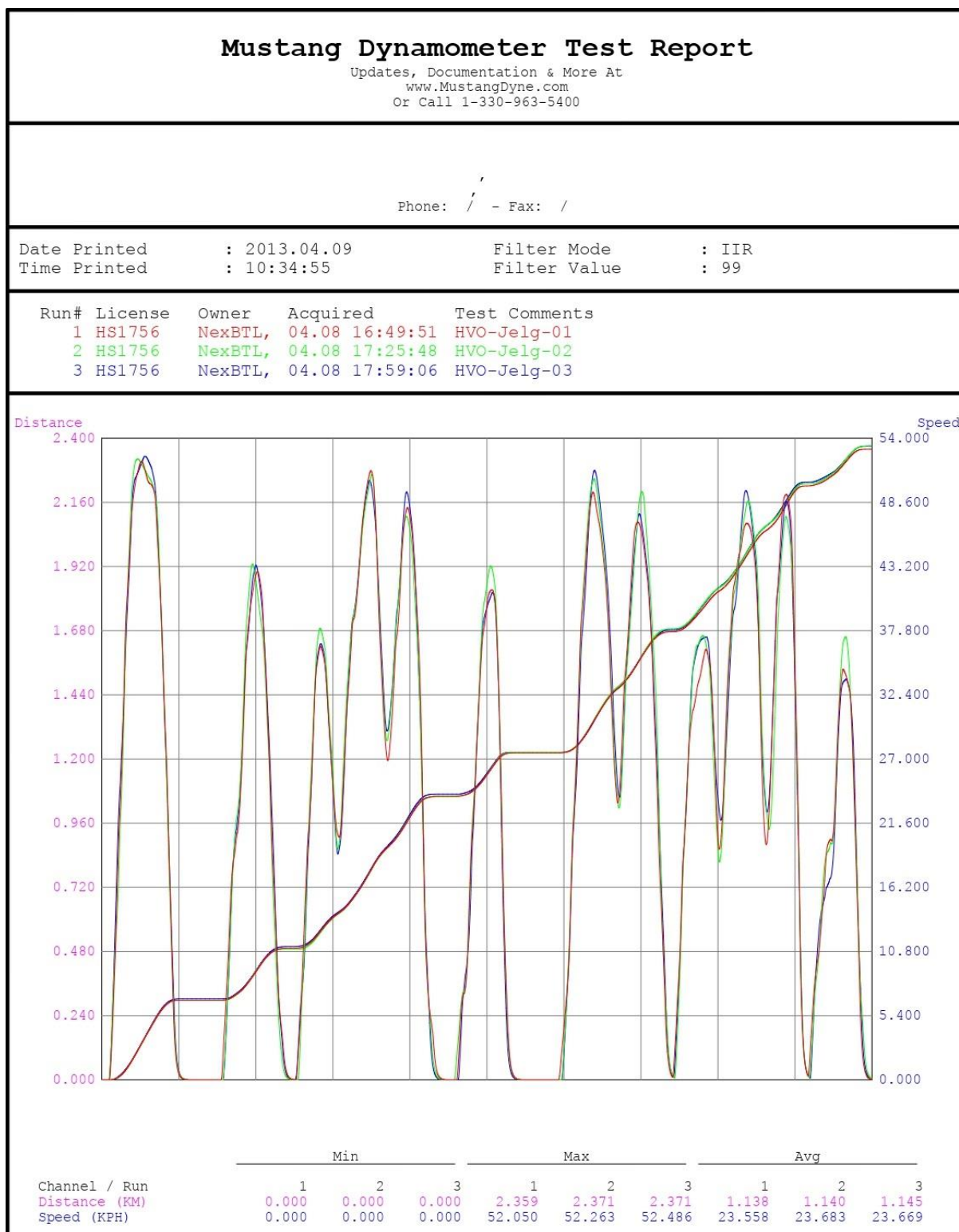
13. pielikums. **Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili ar HVO degvielu pētījumu programmā PP-2**



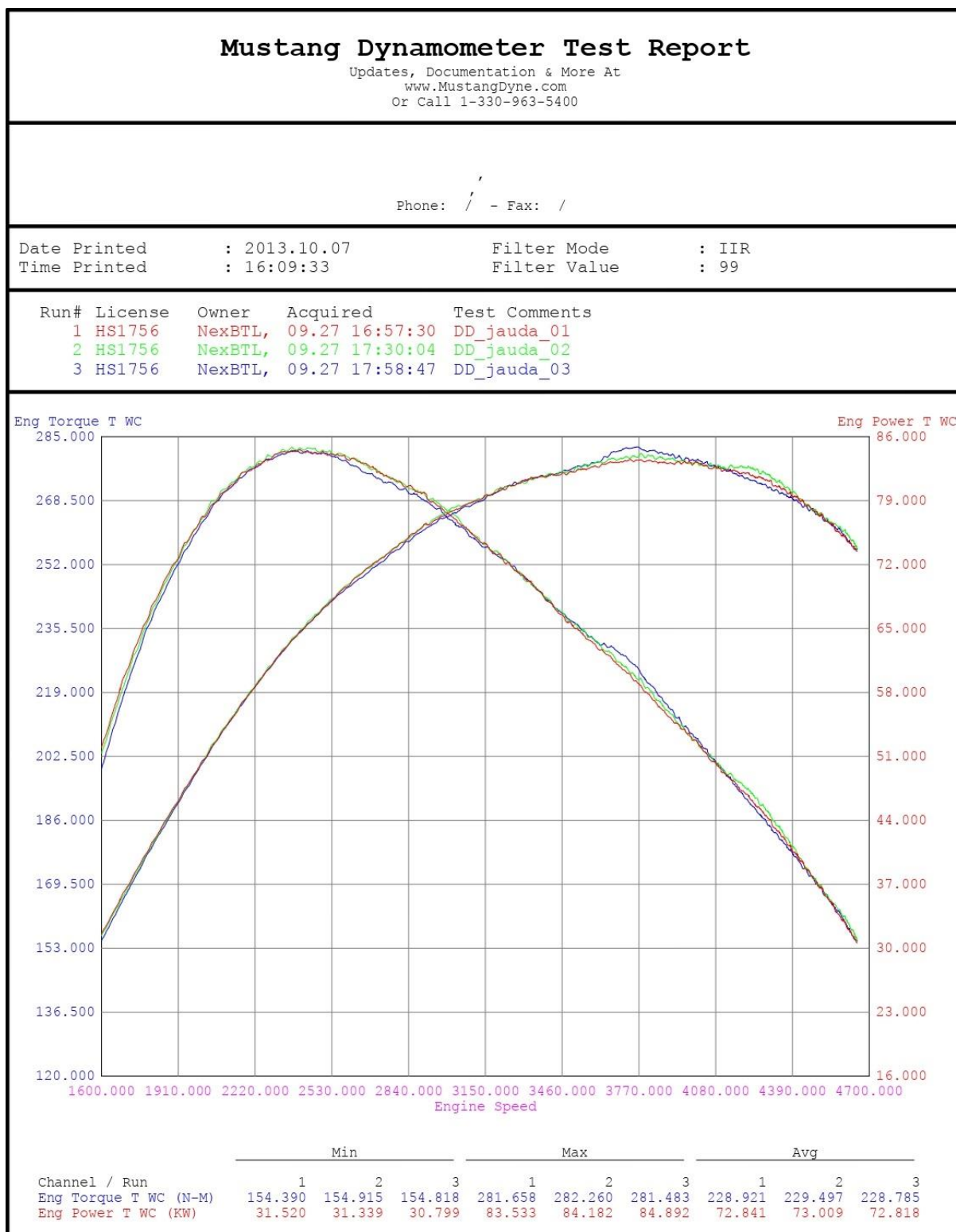
14. pielikums. **Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili
ar FDD pētījumu programmā PP-2**



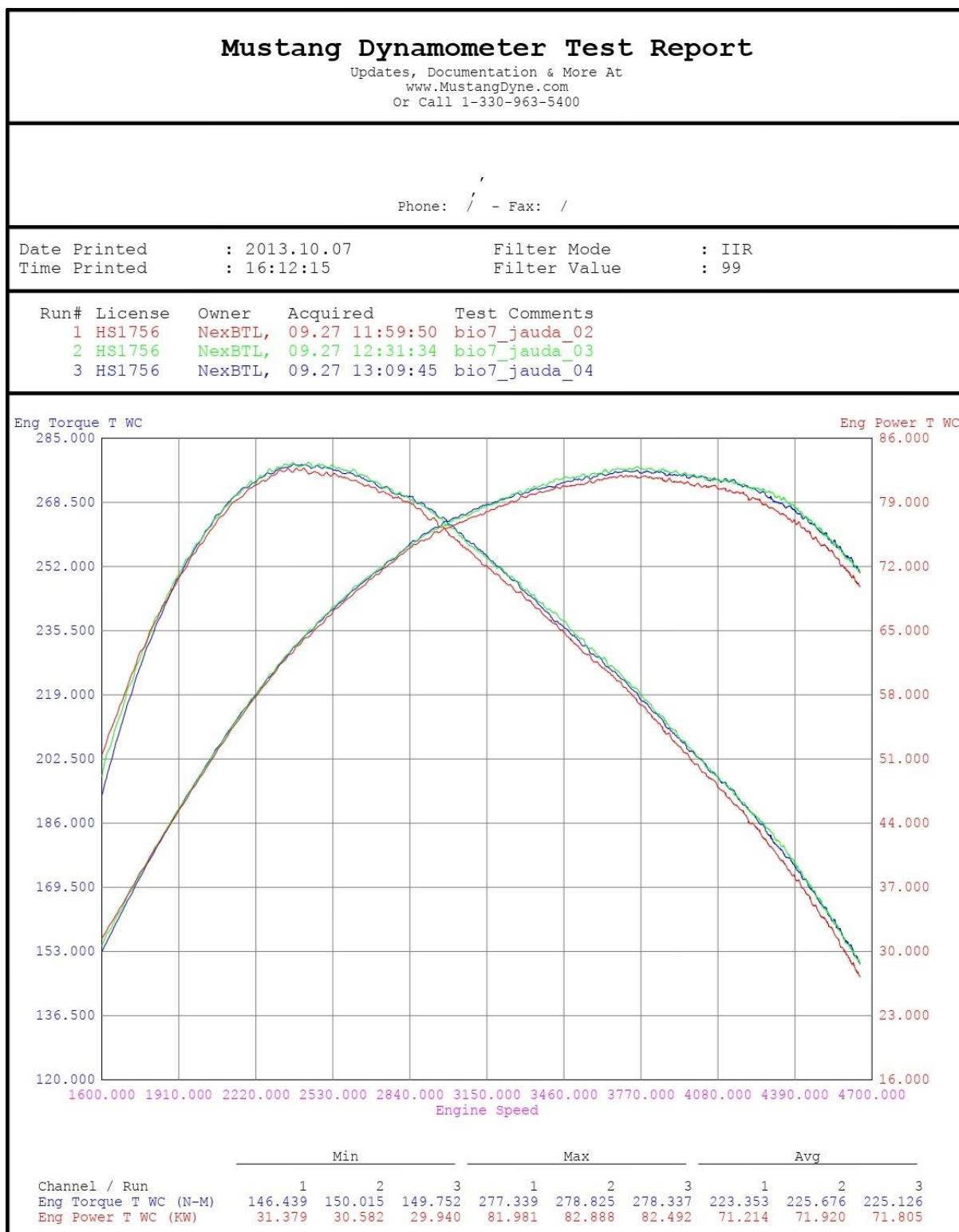
15. pielikums. **Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma līknes, darbinot automobili ar HVO degvielu pētījumu programmā PP-2**



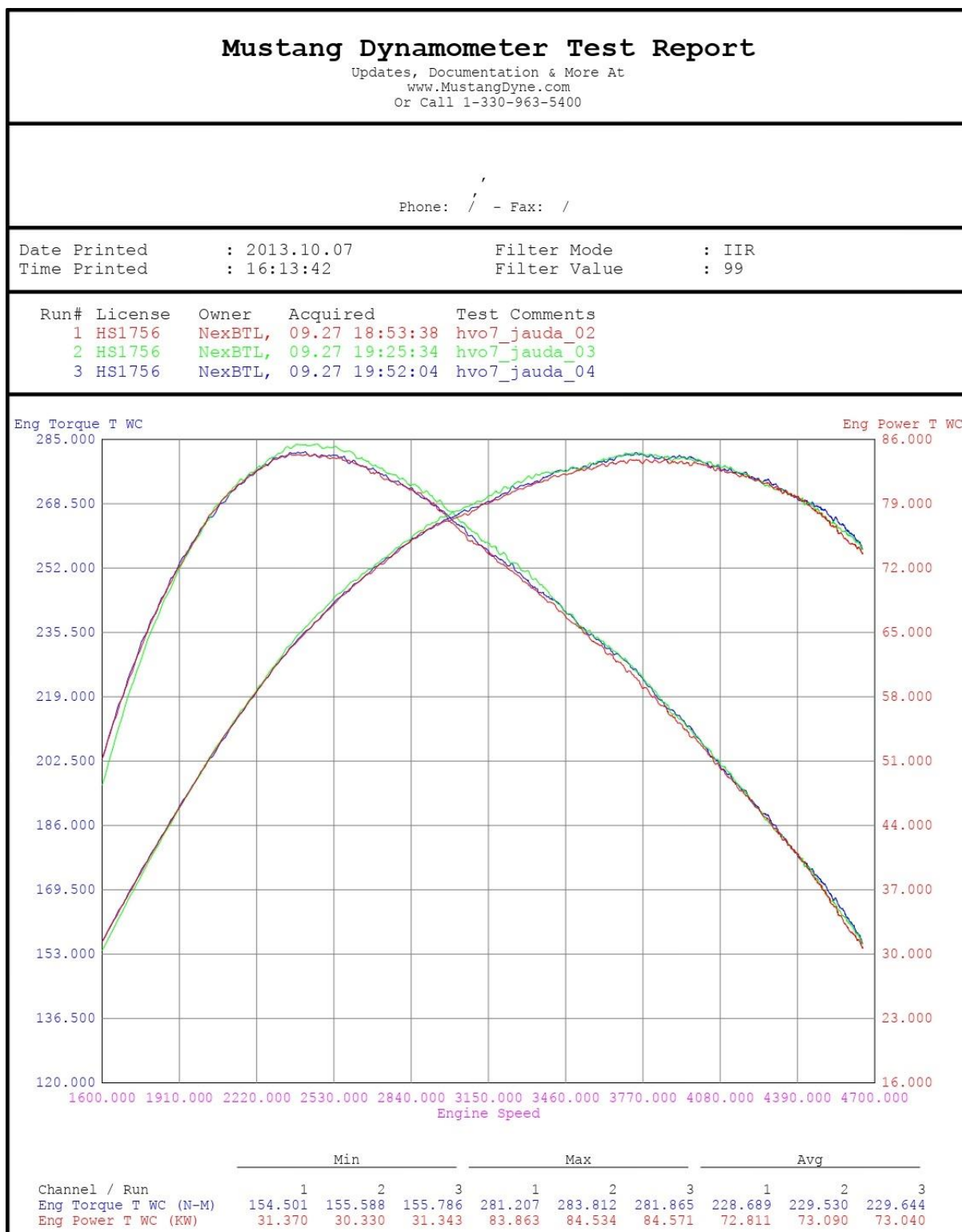
16. pielikums. Neapstrādātas automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar FDD pētījumu programmā PP-3



17. pielikums. Neapstrādātas automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar BioDD7 pētījumu programmā PP-3



18. pielikums. Neapstrādātas automobiļa *Opel Insignia* jaudas un griezes momenta raksturlīknes, darbinot to ar HVO7 pētījumu programmā PP-3



19. pielikums. Jaudas un griezes momenta raksturlīkņu datu tabulu fragmenti pētījumu programmā PP-3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Klokv. apgr., min ⁻¹	Griezes moments, N m				Jauda, kW			
2	Testa Nr.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.
3	1600	204.781	203.297	199.307	202.462	31.597	31.396	30.844	31.279
4	1620	208.391	206.764	203.776	206.310	32.505	32.265	31.88	32.217
5	1640	212.735	211.636	208.189	210.853	33.556	33.416	32.924	33.299
6	1660	216.576	215.235	212.02	214.610	34.53	34.357	33.866	34.251
7	1680	221.057	219.03	216.365	218.817	35.626	35.326	34.96	35.304
8	1700	224.337	222.65	220.132	222.373	36.574	36.311	35.916	36.267
150	4540	165.194	165.443	165.164	165.267	76.512	76.602	76.505	76.540
151	4560	163.22	164.344	163.544	163.703	75.975	76.461	76.102	76.179
152	4580	161.332	162.974	162.394	162.233	75.472	76.185	75.943	75.867
153	4600	159.839	161.271	159.871	160.327	75.122	75.776	75.134	75.344
154	4620	157.8	159.038	158.101	158.313	74.511	75.089	74.64	74.747
155	4640	156.008	156.703	155.345	156.019	74.021	74.346	73.694	74.020
156		Korelācijas koeficienta aprēķini							
157	1. atkārtojums	100.00%	99.98%	99.89%	99.98%	100.00%	99.99%	99.96%	99.99%
158	2. atkārtojums	99.98%	100.00%	99.93%	99.99%	99.99%	100.00%	99.96%	99.99%
159	3. atkārtojums	99.89%	99.93%	100.00%	99.96%	99.96%	99.96%	100.00%	99.98%
160	vid.	99.98%	99.99%	99.96%	100.00%	99.99%	99.99%	99.98%	100.00%

Jaudas un griezes momenta raksturlīkņu datu tabulas fragments,
darbinot automobili Opel Insignia ar FDD

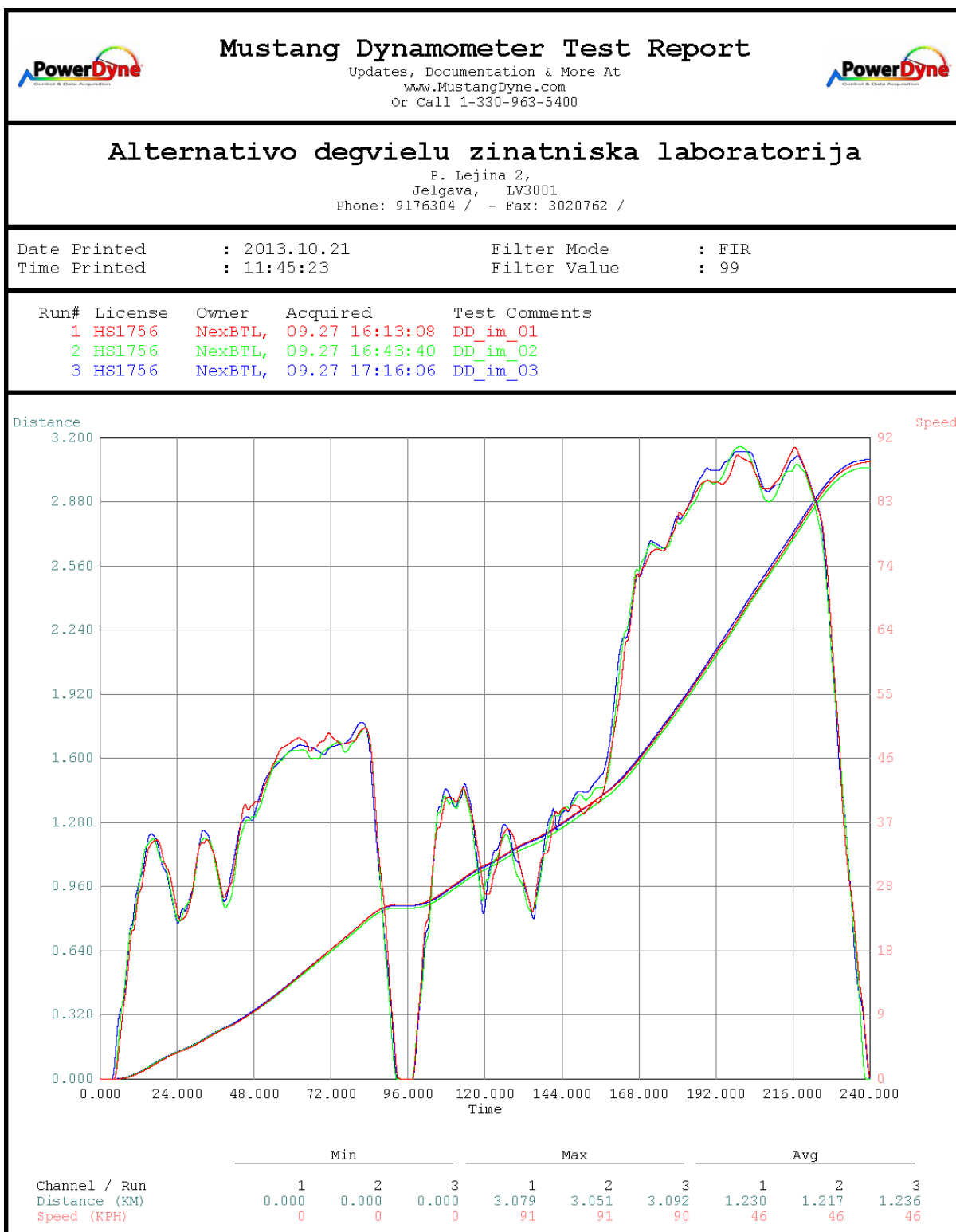
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Klokv. apgr., min ⁻¹	Griezes moments, N m				Jauda, kW			
2	Testa Nr.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.
3	1600	203.513	198.069	193.135	198.239	31.408	30.624	29.989	30.674
4	1620	207.176	203.889	197.889	202.985	32.328	31.914	31.023	31.755
5	1640	210.555	206.847	202.348	206.583	33.201	32.683	32.079	32.654
6	1660	213.726	211.456	207.26	210.814	34.086	33.808	33.217	33.704
7	1680	217.149	214.809	211.534	214.497	34.993	34.69	34.271	34.651
8	1700	220.607	219.612	215.999	218.739	35.962	35.856	35.375	35.731
150	4540	158.945	161.095	160.792	160.277	73.684	74.654	74.517	74.285
151	4560	156.51	159.757	159.027	158.431	72.902	74.383	74.064	73.783
152	4580	154.075	157.223	157.43	156.243	72.13	73.564	73.675	73.123
153	4600	152.105	154.953	155.487	154.182	71.565	72.85	73.112	72.509
154	4620	149.825	153.398	153.952	152.392	70.85	72.499	72.764	72.038
155	4640	147.57	151.085	151.563	150.073	70.133	71.735	71.971	71.280
156		Korelācijas koeficienta aprēķini							
157	1. atkārtojums	100.00%	99.93%	99.82%	99.95%	100.00%	99.97%	99.97%	99.99%
158	2. atkārtojums	99.93%	100.00%	99.96%	100.00%	99.97%	100.00%	99.99%	99.99%
159	3. atkārtojums	99.82%	99.96%	100.00%	99.96%	99.97%	99.99%	100.00%	99.99%
160	vid.	99.95%	100.00%	99.96%	100.00%	99.99%	99.99%	99.99%	100.00%

Jaudas un griezes momenta raksturlīkņu datu tabulas fragments,
darbinot automobili Opel Insignia ar BioDD7

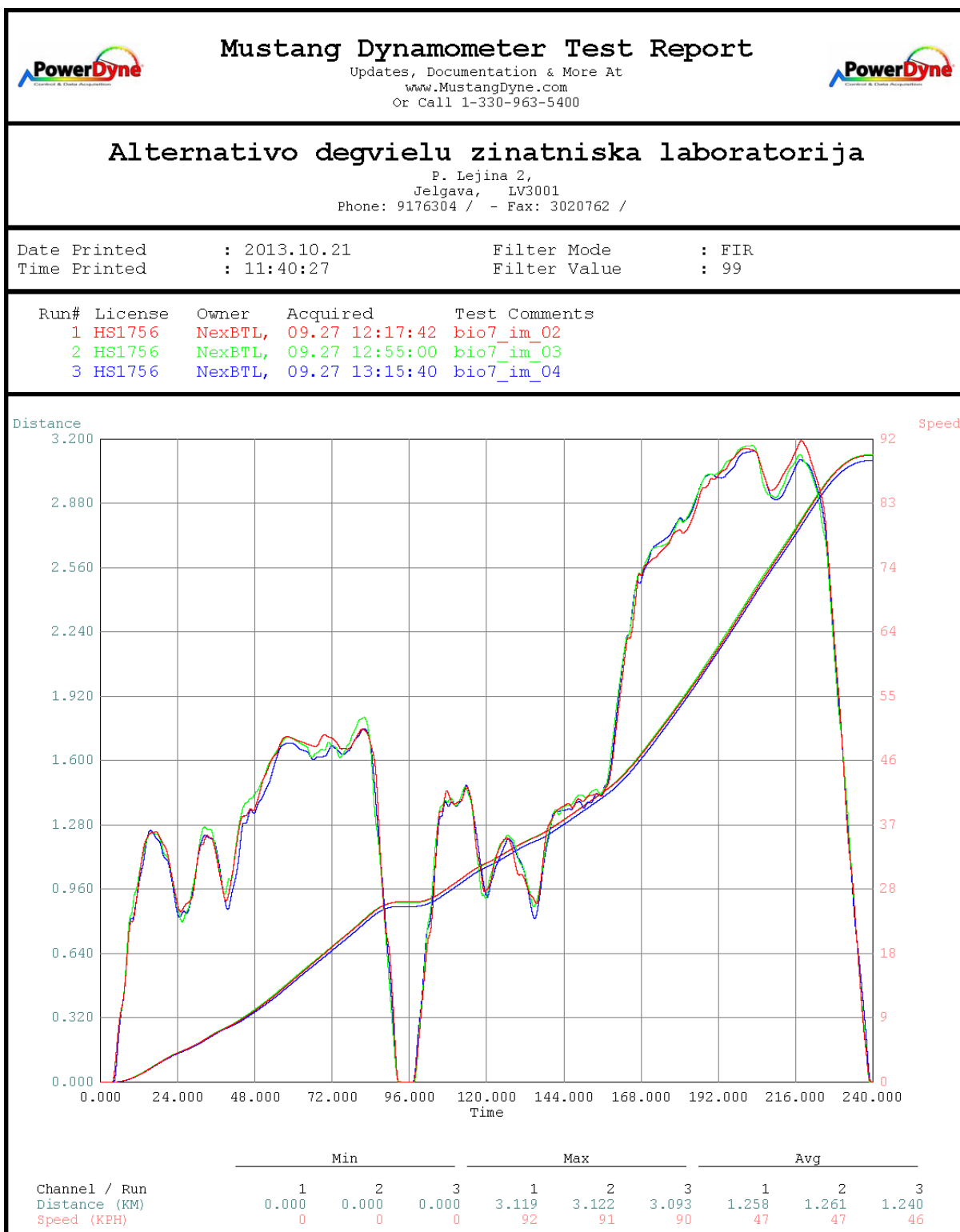
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Klokv. apgr., min ⁻¹	Griezes moments, N m				Jauda, kW			
2	Testa Nr.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.	1. atkārtojums	2. atkārtojums	3. atkārtojums	vid.
3	1600	203.266	196.392	203.257	200.972	31.409	30.418	31.388	31.072
4	1620	207.227	200.659	207.364	205.083	32.35	31.42	32.39	32.053
5	1640	211.448	205.128	211.337	209.304	33.386	32.454	33.342	33.061
6	1660	214.601	209.786	215.718	213.368	34.217	33.577	34.418	34.071
7	1680	218.754	213.832	218.69	217.092	35.295	34.56	35.281	35.045
8	1700	222.008	218.456	222.866	221.110	36.161	35.725	36.325	36.070
150	4540	165.157	165.914	167.282	166.118	76.484	76.82	77.442	76.915
151	4560	162.843	164.075	164.97	163.963	75.777	76.36	76.755	76.297
152	4580	160.827	162.614	163.362	162.268	75.206	76.036	76.398	75.880
153	4600	158.834	160.981	161.297	160.371	74.642	75.619	75.754	75.338
154	4620	157.832	158.817	159.63	158.760	74.525	74.991	75.354	74.957
155	4640	156.293	157.181	157.798	157.091	74.153	74.57	74.833	74.519
156		Korelācijas koeficienta aprēķini							
157	1. atkārtojums	100.00%	99.88%	99.98%	99.98%	100.00%	99.98%	99.99%	100.00%
158	2. atkārtojums	99.88%	100.00%	99.91%	99.96%	99.98%	100.00%	99.97%	99.99%
159	3. atkārtojums	99.98%	99.91%	100.00%	99.99%	99.99%	99.97%	100.00%	99.99%
160	vid.	99.98%	99.96%	99.99%	100.00%	100.00%	99.99%	99.99%	100.00%

Jaudas un griezes momenta raksturlīkņu datu tabulas fragments,
darbinot automobili Opel Insignia ar HVO7

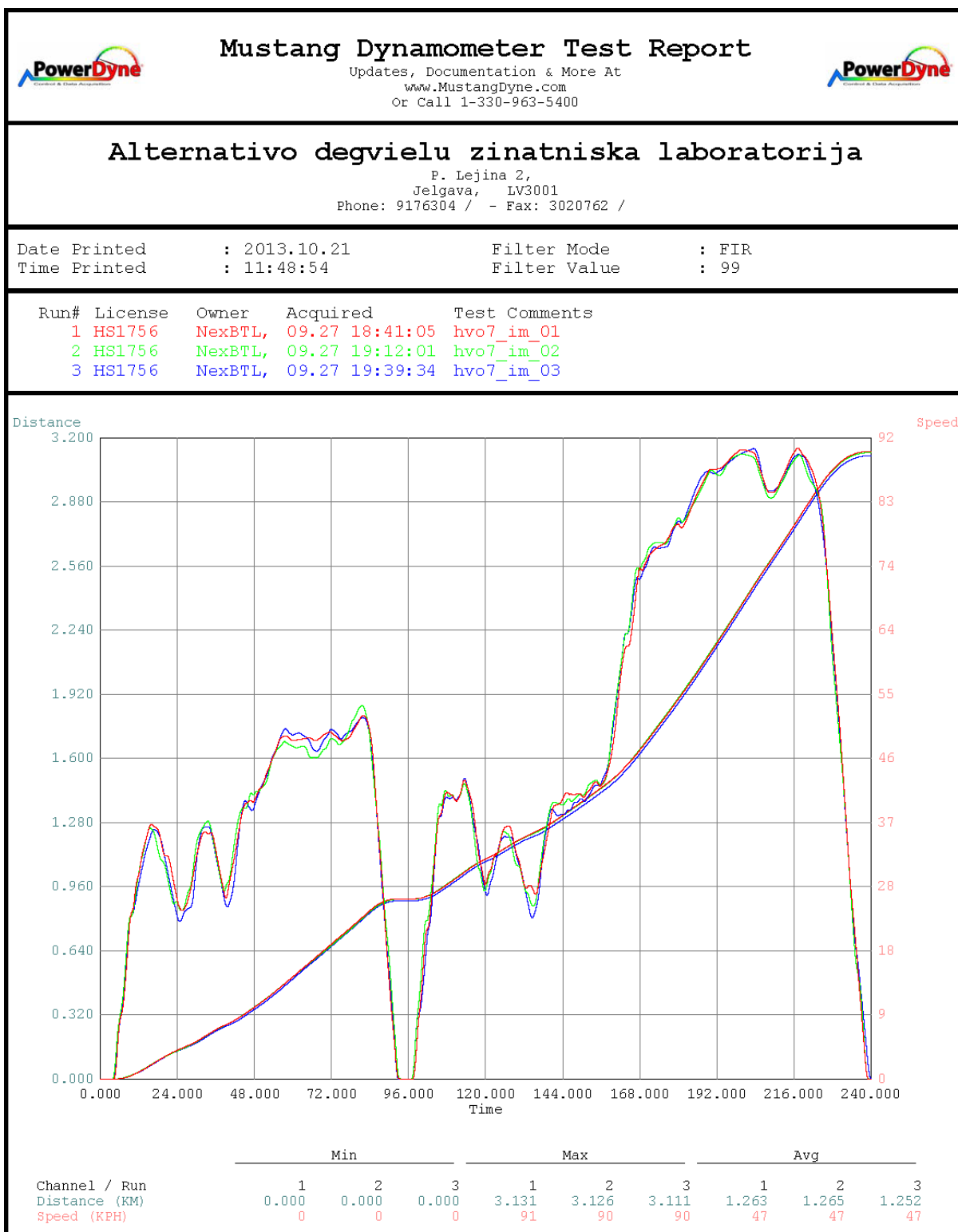
20. pielikums. Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili
ar FDD pētījumu programmā PP-3



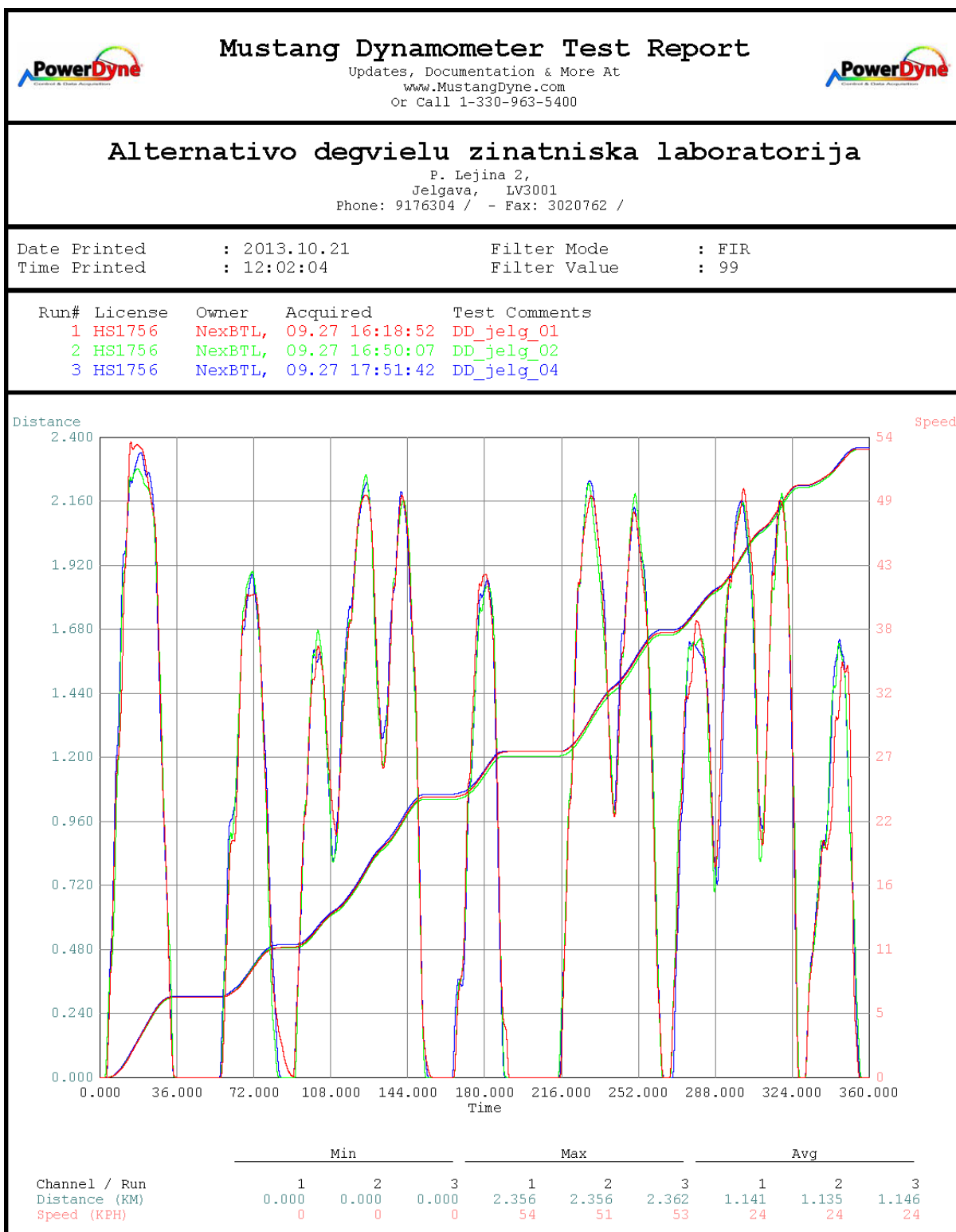
21. pielikums. Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili
ar BioDD7 pētījumu programmā PP-3



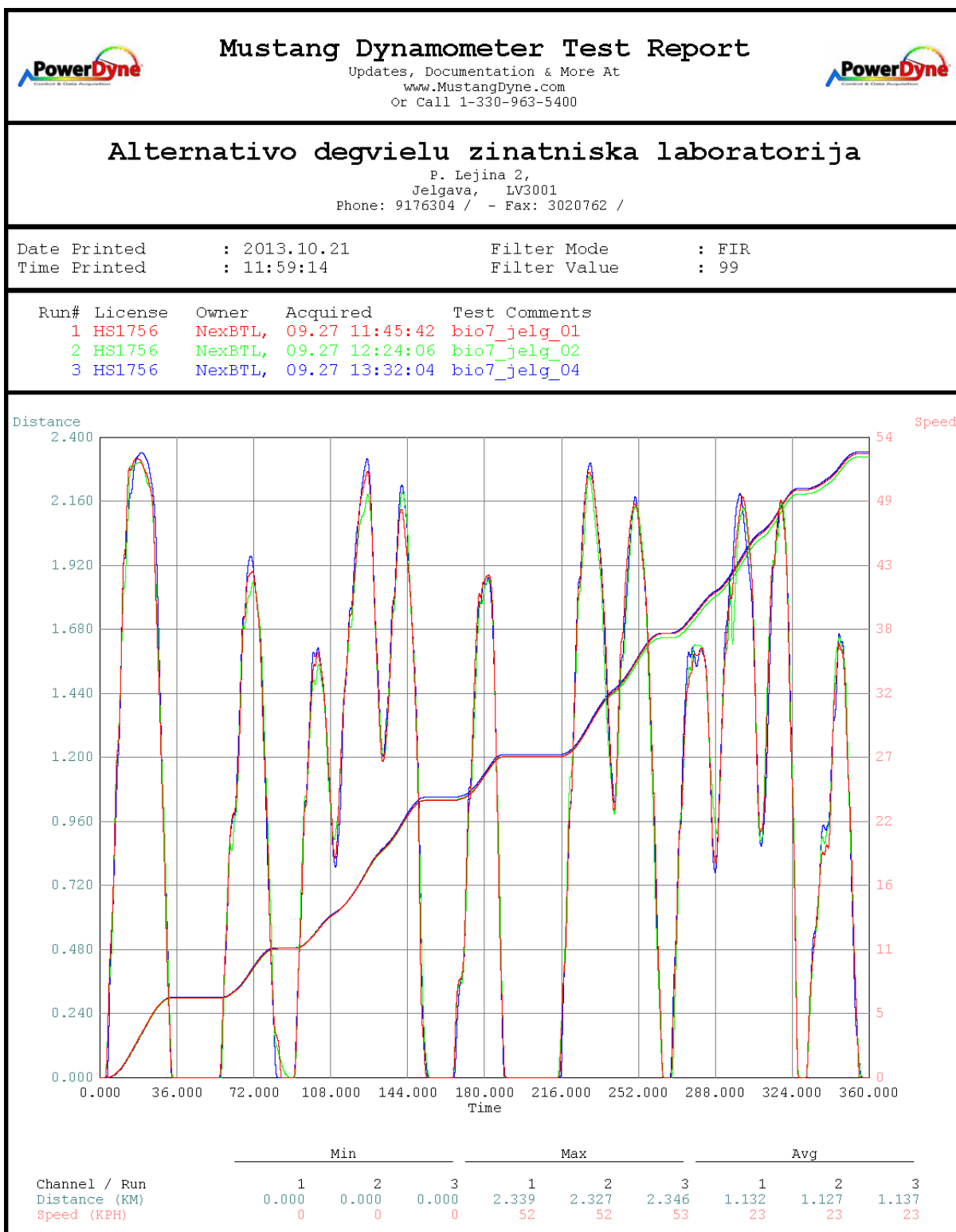
22. pielikums. Cikla IM-240 ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili ar HVO7 pētījumu programmā PP-3



23. pielikums. **Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili ar FDD pētījumu programmā PP-3**



24. pielikums. **Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili ar BioDD7 pētījumu programmā PP-3**



25. pielikums. **Jelgavas cikla ātruma un nobrauktā attāluma liknes, darbinot automobili ar HVO7 pētījumu programmā PP-3**

