EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Juri Hazov

DIISELMOOTORI TOITESÜSTEEMI PIHUSTUSRÕHU MÕJU TAHMA MOODUSTUMISELE

INFLUENCE OF SPRAY PRESSURE IN DIESEL ENGINE FUEL SYSTEM ON EXHAUST SOOT

Bakalaureusetöö
Tootmistehnika õppekava

Juhendaja: dotsent Risto Ilves, *PhD*

Tartu 2020

Eesti Maaülikool
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

LÜHIKOKKUVÕTTE

Autor: Juri Hazov

Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia

Pealkiri: Diiselmootori toitesüsteemi pihustusrõhu mõju tahma moodustumisele

Lehekülgi: 43	Jooniseid: 18	Tabeleid: 8	Lisasid: 4

Osakond: Tootmistehnika

ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Tehnikateadused, T370; 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.14.Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine, T130

Juhendaja: dotsent Risto Ilves, PhD

Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2020

Tahma moodustumine diiselmootoris on suureks probleemiks keskkonnale ja inimeste tervisele. Seetõttu on oluline uurida erinevate mootori juhtparameetrite mõju tahma osakalule diiselmootori heitgaasides.

Töö eesmärgiks oli uurida pihustusrõhu mõju tahma moodustumisele diiselmootoris.

Töös uuriti pihustusrõhu mõju tahma moodustumisele ühisanumtüüpi toiteaparatuuriga diiselmootoris, kasutades diislikütust (E-klassi) ja biodiislikütust (HVO biodiislikütus). Mootori kiirusrežiimiks oli 2300 p/min, koormusteks 50, 75 ja 100%. Katsemootoriks oli common rail (ühisanum) sissepritse süsteemiga AVL 5402 CR DI mootor. Eesti Maaülikooli Tehnikamaja mootorilaboris mõõdeti vastavate seadmete abil tahma ja heitgaaside osakaalude muutused pihustusrõhu tõusmisel.

Töö tulemustena selgus, et rõhu tõusmine vähendab tahma moodustumist vaid selle tõusmisel kuni 650 bar-ni. Edasisel rõhu tõusmisel hakkas tahma kogus kasvama. Saadud andmete järgi, kõige suuremat mõju tahmasuse vähenemisele avaldab pihustusrõhk 650 bar, mootori koormusel 75%. Lisaks selgus, et HVO biolisandiga diislikütus võrreldes tavalise diislikütusega vähendab tahma moodustumist 25% võrra mootori koormustel 50% ja 100%.

Märksõnad: diislikütus, HVO, pihustusrõhk, common rail, AVL 5402 CR DI

Estonian University of Life Sciences
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

ABSTRACT

Author: Juri Hazov

Curriculum: Engineering

Title: Influence of spray pressure in diesel engine fuel system on exhaust soot

Pages: 43	Figures: 18	Tabels: 8	Appendixes: 4

Department: Production engineering

Field of research and (CERC S) code: Technical sciences, T370; 4. Engineering, 4.14 Industrial Engineering and Management, T130

Supervisors: docent Risto Ilves, PhD

Place and date: Tartu 2020

Increased soot formation is an important problem for the whole ecology, including humans health and nature well-being. Therefore, it is important to study the effect of different engine main parameters on the soot content in diesel engine exhaust gases.

The aim of this work is to study the effect of injection pressure on soot formation.

The effect of injection pressure on soot formation was investigated in diesel engine with common rail fuel injection system, using two diesel fuels (E-class and HVO biodiesel) at engine speed 2300 rpm and three engine loads. The experiment was performed on AVL 5402 CR DI engine. Using the equipment in the engine laboratory of Estonian University of Life Sciences, the changes in amount of soot in exhaust gases with increasing pressure were measured.

As a result of the investigation, it was found that an increase in injection pressure reduses soot formation only till it rises to 650 bar. When it rises further the amount of soot starts to increase. According to obtained data, the most serious effect on the reduction of soot formation was achieved by injection pressure 650 bar at an engine load of 75%. Also, it was found that HVO biodiesel at 50% and 100% engine loads is more effective than diesel fuel and reduces soot formation by 25%.

Key words: diesel fuel, HVO, injection pressure, common rail, AVL 5402 CR DI

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTTE....2
ABSTRACT....3
SISSEJUHATUS....6
1. DIISELMOOTOR, SELLE KÜTUSED JA HEITMED....7
1.1. Diislikütuse tootmine....7
1.2. Diislikütuse klassifitseerimine....7
1.3. Diislikütuse olulisemad omadused....8
1.4. Biokütused....9
1.4.1. Biodiislikütus....9
1.4.2. Sünteetiline diislikütus....10
1.5. Diiselmootorid ja nende eelised....10
1.5.1. Diiselmootori toitesüsteem....11
1.6. Diiselmootori puudused....13
1.6.1. Tahma moodustumine....13
1.6.2. Tahma vähenemise olulisus....18
1.6.3. Tahma osakaalu mõõtmine mootori heitgaasides....18
1.6.4. Uuringud pihustusrõhu mõjust tahma osakaalule heitgaasides....19
2. KATSEMETOODIKA JA KATSESEADMED....22
2.1. Katseseadmed....22
2.2. Katsekütused....25
2.3. Katsemetoodika....27
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS....28
3.1. Diislikütuse katsetulemused....28
3.2. HVO katsetulemused....29
3.2.1. HVO ja diislikütuse katsetulemuste võrdlemine....30
3.3. Katsetulemuste võrdlemine teiste uuringute tulemustega....32
KOKKUVÕTE....33
KASUTATUD KIRJANDUS....34
LISAD....36
Lisa 1. Diislikütusega katsetuse tulemused....37

Lisa 2. HVO katsetuse tulemused 39
Lisa 3. Diislikütuse kvaliteedi sertifikaat 41
Lisa 4. HVO biodiislikütuse sertifikaat 42

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on diislikütus ja mootoribensiin peamisteks energiaallikateks sisepõlemismootoritele. Diislikütuse põlemisel diiselmootoris on üks suur puudus, mis mõjutab mootorit ja ümbritsevat keskkonda. See on tahma kujunemine diislikütuse mittetäielikul põlemisel. Selle probleemi lahendamiseks on oluline uurida parameetreid ja nende muutuseid, mis võivad mõjutada diislikütuse põlemist ja tahma moodustumist.

Antud lõputöö eesmärgiks oli uurida pihustusrõhu mõju tahma moodustumisele diiselmootoris. Töö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised ülesanded:

1. Anda ülevaade diiselmootoritest, nende kütustest ja tahma moodustamisest diiselmootoris.
2. Koostada katsemetoodika diiseltoiteaparatuuri pihustusrõhu mõju uurimiseks heitgaaside tahmasusele.
3. Viia läbi katsetused diislikütuse ja biodiislikütusega, et uurida pihustusrõhu mõju mootori heitgaaside tahmasusele.
4. Katseandmete analüüs ja süntees.

Katsete läbiviimine ja andmete kogumine toimus Eesti Maaülikooli Tehnikamaja mootorilaboris. Katsetused olid sooritatud AVL 5402 CR DI mootori peal. Kasutati kahte kütust (ülemineku diislikütust ja biodiislikütust).

Bakalaureusetöö sisuline osa koosneb kolmast peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade diislikütuse tootmistehnoloogiast, selle klassifitseerimisparameetritest, liigitusest ja omadustest. Kirjeldatakse diiselmootori ehitust ja tööpõhimõtet, eeliseid ja puuduseid. Toodud on ülevaade tahma moodustumise põhjustest, selle mõõtmismetoodikatest ja mõõteseadmetest. Välja on toodud erinevate teadlaste uuringute tulemused. Teises peatükis tutvustatakse kasutatud katseseadmeid, kütuseid, katseskeemi ja katseprotsessi. Kolmandas peatükis analüüsitakse saadud katsetulemusi ja võrreldakse teiste uuringute tulemustega.

1. DIISELMOOTOR, SELLE KÜTUSED JA HEITMED

1.1. Diislikütuse tootmine

Diislikütus on üldiselt diiselmootorites kasutatav kütus, mille süütamine toimub silindris küttesegu kokku surumisel ilma sädemeta. Diislikütuse peamiseks tooraineks on nafta ja seda valmistatakse kahel ümbertöötamise viisil, destilleerimisel ja krakkimisel. Need kaks viisi erinevad teineteisest sellega, et destilleerimisel süsivesinike molekuli struktuur ei muutu aga krakkimisel süsivesinike struktuur muutub. Naftat destilleeritakse atmosfäärirõhul destillatsiooniseadmetes. Protsess toimub temperatuuril 150°C – 360°C. Rafineerimata- ehk toornaftas on palju teisi süsivesinikke, nendel on erinev keemistemperatuur ja nad aurustuvad temperatuuri tõstmisel. Selle meetodi eesmärgiks on eraldada mittevajalikud komponendid kütusest. Krakkimist läbivad juba kõrgema kvaliteediga diislikütused, selleks et süsivesinikke lõhustuda ja saada nendest kütusesse sobivad komponendid [1].

1.2. Diislikütuse klassifitseerimine

Euroopas kasutatav diislikütus peab vastama Euroopa Liidu standardile EN 590. Diislikütused jagunevad kergekesk- ja keskdestillaatideks, mis sobivad kiirekäigulistele mootoritele, mille koormus ja kiirus varieeruvad sageli ja laialdaselt (nt. veoautod ja sõiduautod). Raskdestillaadid sobivad keskmise- ja madala kiirusega, ning püsiva koormusega mootoritele, mis on kasutusel rongide ja laevade peal, siia kuuluvad ka statsionaarsed mootorid [2].

Standard EN 590 on aastatega muutunud. Põhilised kriteeriumid millele diislikütus peab vastama:

- EN 590: 1993 – väävli sisaldus max.0.2% ja tsetaaniarv min.49, nii nimetatud Euro 1 diislikütus.

- EN 590: 1996 – väävli sisaldus max.0.05% ja tsetaaniarv min.49 (Euro 2 diislikütus).
- EN 590: 1999 – väävli sisaldus max.0.035% ja tsetaaniarv min.51 (Euro 3 diislikütus).
- EN 590: 2004 – väävli sisaldus max.0.005%, tsetaaniarv min.51 ja biodiisli FAME (Fatty acid methyl esters ehk rasvhapete metüülestrite segu) sisaldus 5% (Euro 4 diislikütus).
- EN 590: 2009 – väävli sisaldus max.0.001% (väävlivaba), tsetaaniarv min.51 ja biodiislikütuse FAME sisaldus 7% (Euro 5 diislikütus) [3].

Olenevalt kliimast, jagatakse diislikütus selle hangumistemperatuuri järgi kolme rühma: talvine, suvine ja ülemineku diislikütused. Hangumistemperatuur näitab diislikütuse vastupidavust madalatele temperatuuridele. Madalal temperatuuril hakkab parafiin diislikütuses kristalliseeruma, mistõttu ei pääse kütus filtrist läbi, toimub torustiku ummistumine ning katkeb kütuse juurdevool. Standard EN 590 määrab 6 diislikütuse temperatuuri klassi (A...F), lisaks on ka 5 arktilist diislikütuse klassi (0...4). Nende klasside madalamad filtreeritavuse piirid on järgmised:

- Suvine diislikütus: Klass A (5°C), Klass B (0°C), Klass C (– 5°C).
- Ülemineku diislikütus: Klass D (– 10°C), Klass E (– 15°C), Klass F (– 20°C).
- Talvine diislikütus: Klass 0 (– 20°C), Klass 1 (– 26°C), Klass 2 (– 32°C), Klass 3 (– 38°C), Klass 4 (– 44°C) [4].

1.3. Diislikütuse olulisemad omadused

Tsetaaniarv on indikaator, mis iseloomustab aega, mis kulub diislikütuse süttimiseks silindris. Optimaalseks tsetaaniarvuks peetakse vahemikku 45 kuni 55. Mida kõrgem on tsetaaniarv, seda kiirem on kütuse põlemine.

Leekpunkt on minimaalne temperatuur, mille juures diislikütuse aur süttib kokkupuutel lahtise leegiga. Indikaator on otseselt seotud fraktsioonkoostisega (kvaliteedi näitaja). Madala leekpunkti korral suureneb diislikütuse süttimise tõenäosus. Leekpunk on kütuse ohutuse näitaja.

Hangumispunkt ehk filtreeritavuse temperatuur on piir, millel diislikütus filtrist läbi ei pääse, mistõttu mootori käivitamine muutub võimatuks.

Hägustumispunkt ehk ummistumispunkt iseloomustab kütuse kasutatavust madalal temperatuuril. Hägustumispunkti temperatuuril hakkab diislikütuses leiduv parafiin kristalliseeruma, mis põhjustab filtreerimissüsteemi ja torustiku ummistumise ning võib katkestada kütuse juurdevoolu.

Diislikütuse tihedus iseloomustab fraktsioonkoostist. Mida väiksem tihedus, seda rohkem on kergeid fraktsioone kütuses.

Diislikütuse viskoossus näitab selle voolavuse võimet. Mida kõrgem viskoossus, seda halvemini kütus pihustatakse silindrisse, kütus põleb osaliselt, mille tagajärjeks on suurem kütuse kulu, heitgaasides suureneb toksiliste ainete ja tahma sisaldus.

Vee sisaldus diislikütuses, mis ei või ületada 0.02% vastavalt standardile EN 590, võib sattuda kütusesse kondensaadiga, mis tekkib paagis. Vee osakaalu suurenemine kütuses võib põhjustada filtrite ummistumist [5].

1.4. Biokütused

1.4.1. Biodiislikütus

Biodiislikütus on taimsetest või loomsetest õlidest toodetud metüülester. Üheks nendest on biodiislikütus FAME (Fatty Acyd Methyl Esters) ehk rasvhapete metüülestrite segu. Umbes 80% biodiislikütust toodetakse rapsiõlist (RME), kasutatakse ka sojaõli (SME) ja teisi looduslike rasvu. Biodiislikütust valmistatakse rafineeritud õli ümberesterdamisel metanooliga, kasutades katalüsaatorina kaalium- või naatriumhüdroksiidi [6].

Teise põlvkonna biodiislikütus on HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). HVO tooraineks on samuti orgaanilised jäätmed (nt.kasutatud toiduõli, kalarasv jne), kuid tema keemiline koostis on identne fossiilse diislikütusega. HVO on miinuskraadide suhtes vastupidav ja sobib ka talveperioodil kasutamiseks [20].

Biodiislikütuseid lisatakse diislikütusesse erinevates proportsioonides. On ka võimalused toota biodiislikütust vetikatest ning kasutatud õlist (nt. restoranide toidurasvajäätmed) aga neid ei kasutata nii laialdaselt. Vetikate ja tsüanobakterite kasutamine biodiislikütuse tootmiseks on väga perspektiivne, aga majanduslikult raskesti realiseeritav. Mõned

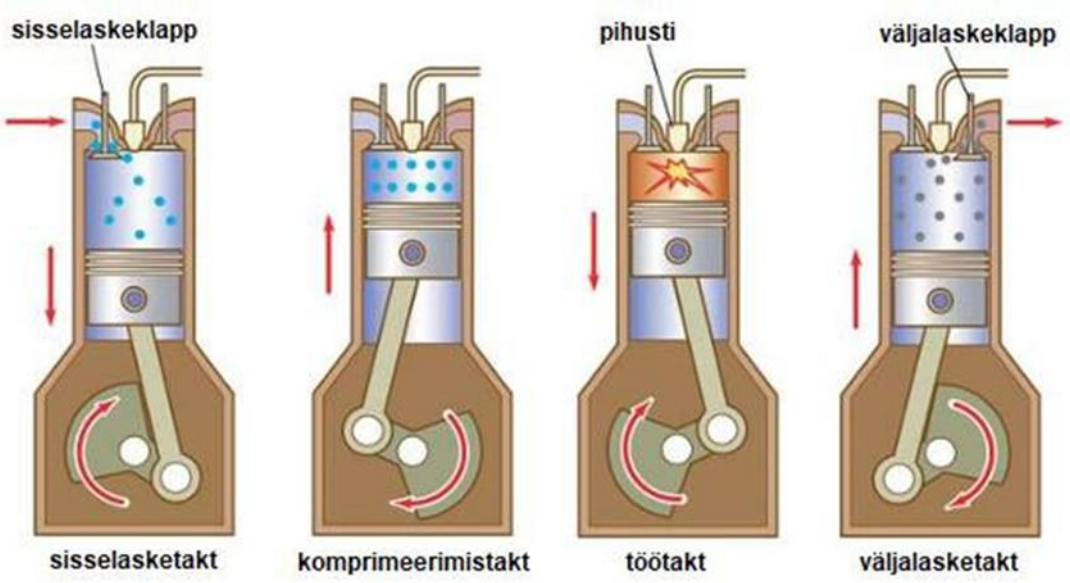
vetikaliigid sisaldavad kuni 40% lipiide, mida saab töödelda biodiislikütuseks või sünteetiliseks diislikütuseks. Vetikad annavad 10 kuni 100 korda rohkem õli ühe pinnaühiku kohta kui õlitaimed [7].

1.4.2. Sünteetiline diislikütus

Teiseks alternatiiviks on sünteetiline diislikütus, mis toodetakse kas gaasi, vedeliku või tahke ainetest. Tänapäeval kõige levinum lähteaine on maagaas, kuid sünteetilisi kütuseid saab toota ka sellistest allikatest nagu kivisüsi ja biomass. Kõige tuntum sünteetilise kütuse tootmistehnoloogia on Fischer-Tropschi (FT) protsess, mis töötati välja 1920. aastatel Saksamaal. Suuremad naftaettevõtted on seda protsessi edasi arendanud ja seda peetakse kasulikuks maagasi kasutamise võimaluseks. Sünteetilise diislikütuse eelisteks on see, et seda võib kasutada olemasolevates mootorites, mingeid modifikatsioone pole vaja teha ja seda võib lisada tavalisse diislikütusesse. Sünteetilise diislikütuse suurepärasteks omadusteks on kõrge tsetaaniarv ja madal väävlisisaldus. Sünteetiline diislikütus võib soodsalt mõjuda mootori jõudlusele ja heitgaaside koostisele [8].

1.5. Diiselmootorid ja nende eelised

Diiselmootorid on kasutusel laialdaselt erinevates valdkondades, nagu transport ja energiatootmine. Neil on kõrge soojuslik kasutegur, töökindlus ja kõrge kütusesäästlikus. Diiselmootori kaks olulist erinevust teistest sisepõlemismootoritest on tema kõrgrõhu toitesüsteem ja kütuse süütamise viis. Kütus pihustatakse silindrisse ja seal see süttib ise ilma sädemeta, mis tagab kütuse ühtlase põlemist. Diiselmootori töötsükkel on näidatud joonisel 1.1.



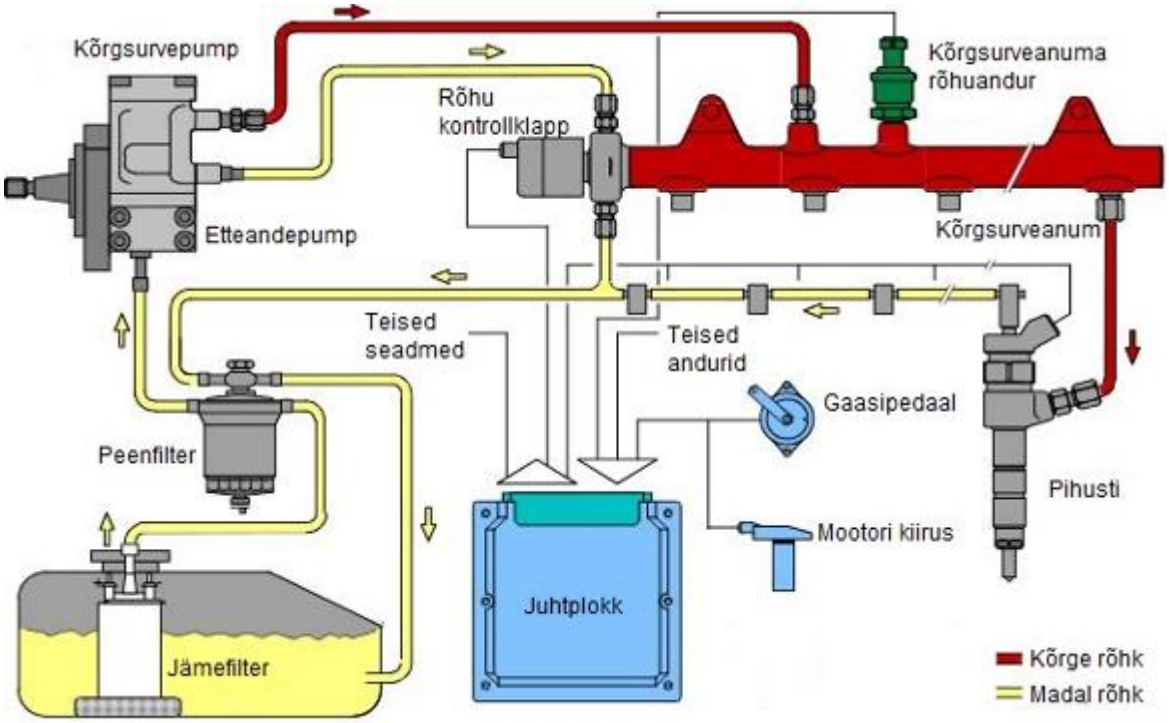
Joonis 1.1. Diiselmootori töötsükkel [2].

Diiselmootori eelised võrreldes bensiinimooriga:

1) kõrge ökonoomsus;
2) kõrge kasutegur;
3) kõrge töökindlus;
4) võimalus töötada alternatiivkütuste peal modifitseerimata.

1.5.1. Diiselmootori toitesüsteem

Diiselmootori toitesüsteemi peamine erinevus võrreldes teiste sisepõlemismootorite toitesüsteemidega on selles, et enamus protsesse toimub kõrge surve all, mis saadakse kõrgsurvepumba abiga. Tänapäeva diiselmootorites on enim kasutatav ühisanum-sissepritsesüsteem (inglise keeles *common rail direct fuel injection*), mille skeem on näidatud joonisel 1.2. Selle süsteemi on välja töötanud autode ja automootorite tootja Fiat ja edasi arendanud firma Bosch spetsialistid. Võrreldes varem kasutatud sissepritsesüsteemidega, on ühisanumtüüpi pritsesüsteemi eelisteks väiksem kütusekulu kuni 15% -i, kõrgem mootori võimsus ja madalam müra- ning vibratsioonitase.



Joonis 1.2. Ühisanumtüüpi pritsesüsteem (*common rail*) [9].

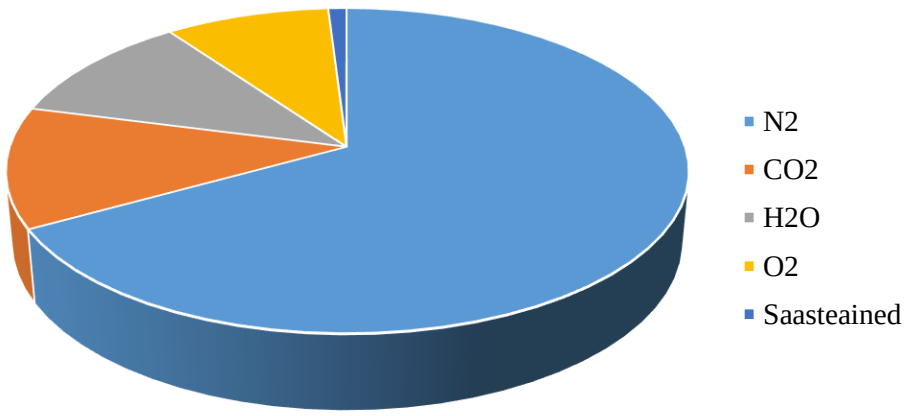
Etteandepump suunab kütuse läbi jämefiltri, edasi läbib kütus peenfiltri ja jõuab 0.5 MPa rõhu all kõrgsurvepumpa. Peenfiltrisse pumbatav kütus läbib osaliselt filtrielemendi ja puhastatud kütus siseneb kõrgsurvepumba. Filtreerimata kütus voolab tagasi kütusepaaki.

Kõrgsurvepumbast suunatakse kütus kõrgsurveanumasse, kus rõhku reguleerib kontrollklapp. Kui kontrollklapp avaneb juhtploki käsul, siis liigne kütus pumbast eemaldatakse ja kütusetoru kaudu voolab tagasi paaki. Iga pihusti on ühendatud kõrgsurveanumaga ja pihusti sees on elektromagnet klapp (solenoid), mida juhitakse juhtplokiga. Juhtplokk kogub andmed kolvi asendi, mootori kiiruse, gaasipedaali ümberpaigutamise ja kõrgsurveanuma rõhu kohta. Nende andmetele tuginedes juhtplokk arvutab välja mootorile vajaliku kütuse kogu, annab käsku elektromagnetklapile kütuse pihustamiseks silindritesse ja määrab pihusti avamise kestust. Juhtplokk korrigeerib pihustamise parameetreid mootori tööajal ja juhib kogu süsteemi [9].

1.6. Diiselmootori puudused

1.6.1. Tahma moodustumine

Tahma moodustumine on diiselmootorite üks tõsisemaid puudusi. Diiselmootori heitgaaside ligikaudne koostis on kujundatud diagrammil (joonis 1.3): lämmastik (N2) – 67%, süsihappegaas (CO2) – 12%, vesi (H2O) – 12%, hapnik (O2) – 9% ja ohtlikud ühendid (CO, HC, NOx, SO2,) – 1% [10]. Tahma osakesed kujunevad enamasti süsinikust. Tahma koostises võivad leiduda elemendid nagu süsinik (C), vesinik (H), lämmastik (N), hapnik (O) ja väävel (S).



Joonis 1.3. Diislikütuse heitgaaside koostis.

Tahm kujuneb diiselmootori silindris kõrge temperatuuri all kütuse mittetäielikul põlemisel. Ideaalis tekiks silindris täieliku põlemine ainult süsihappegaas ja vesi, kuid küttesegu põlemisprotsess mootoris pole 100% efektiivne. Tahm tekkib süsivesinike põletamisel. Diiselmootori tahmaheide määratakse tahma moodustumise ja oksüdeerumise erinevusega [11].

Tahm moodustub rohkem diiselmootorites kui bensiinimootorites sissepritse- ja süttimisviisi tõttu. Erinevalt bensiinimootoritest, kus kütuse ja õhu segu süüdatakse sädemega, diislikütuse ja õhu segu süttib silindris kõrge temperatuuri tõttu. Diiselmootorites kütus ja õhk ei segune nii ühtlaselt kui bensiinimootorites, mistõttu tekivad küttesegus tihedad

tsoonid, mis süttimisel tekkitavad tahma. Tahma osakesed moodustuvad peamiselt süsinikust. Moodustumise protsess algab kütuse molekulist, mille koostises on 12 kuni 22 süsiniku aatomit ja vesiniku/süsiniku suhe on ligikaudu 2. Põlemisprotsessi lõpus tekivad parisaja nanomeetrise läbimõõduga osakesed, mis koosnevad väiksematest keradest (20 nm – 30 nm), H/C suhtega 0.1. Tahma moodustumine toimub põlemiskambris temperatuuril 727°C – 2527°C ja rõhul 5.066 MPa – 10.13 MPa [12].

Üldtuntud tahma moodustumise mudel diiselmootorite jaoks on Hiroyasu-Nagle and Strickland (HSN) Soot Model. Mudel koosneb kahest etapist: 1) moodustumise etapp, kus tahm on seotud otse kütuseaurumolekulidega ja 2) oksüdatsiooni etapp, mis kirjeldab tahma molekulide lagunemis hapniku molekulide toimel. Tahma massi muutumise näitaja *Ms* on erinevus tahma moodustumise näitaja *Msf* ja tahma oksüdatsiooni näitaja *Mso* vahel, vastavalt järgmise valemile:

$$M_s = M_{sf} - M_{so}$$

tahma moodustamise ja oksüdatsiooni näitajad võib saada:

$$M_{sf} = K_f \cdot M_{fv}$$

$$M_{so} = K_o \cdot M_s$$

kus K_f moodustamise näitaja koefitsient;

K_o on oksüdatsiooni näitaja koefitsient;

M_{fv} on kütuse aurumass;

M_s tekkinud tahma mass [19].

Keemiliselt tahma moodustumise protsess näeb välja järgmine. Esimeses tahma moodustumise faasis tekib tahm kütuse molekulide oksüdatsioonil ja/või pürolüüsi produktidest. Need ained sisaldavad süsivesinikke nagu atsetüleen ja selle analooge (C2nH2), ja polüaromaatseid süsivesinikke (PAH). Nende molekulide põlemisel reageerivad nad hapnikuga, mis viib esimeste väikeste tahma osakeste moodustumiseni (d < 2nm). On kasulik määratleda kütuse ja oksüdeerija segu koostis tahma moodustumise alguses leegis, süsiniku/hapniku suhte kaudu. Tasakaalu võrrandid näitavad, et tahma moodustumine peaks toimuma siis, kui

$$C_mH_n + yO_2 \rightarrow 2yCO + (n/2)H_2 + (m - 2y)C_S$$

m muutub suuremaks kui *2y*, teiste sõnadega C/O suhe ületab ühte (*m* – C aatomite arv, *n* – H aatomite arv, *y* – O_2 molekulide arv). Kõige halvemal juhul, moodustub suurim tahma kogus näiteks 100g diislikütuse kohta järgmiselt:

$$C_{12}H_{24} + O_2 \rightarrow 2CO + 12H_2 + 10C_S$$

$m(C_{12}H_{24})= 100g$

$n(C_{12}H_{24})= m/M= 100g/(12.01\cdot12 + 1\cdot24)g/mol= 0.59$ mol – ainehulk

$m(C_S)= n\cdot M= 10\cdot0.59mol\cdot12.01g/mol= 70.86g$ – tahma mass

Antud juhul kasutati protsessis minimaalselt hapniku kütuse põletamiseks. Järgmine olukord, kui C/O suhe on 2:

$$C_{12}H_{24} + 3O_2 \rightarrow 6CO + 12H_2 + 6C_S$$

$m(C_S)= n\cdot M= 6\cdot0.59mol\cdot12.01g/mol= 42.52g$ – tahma mass

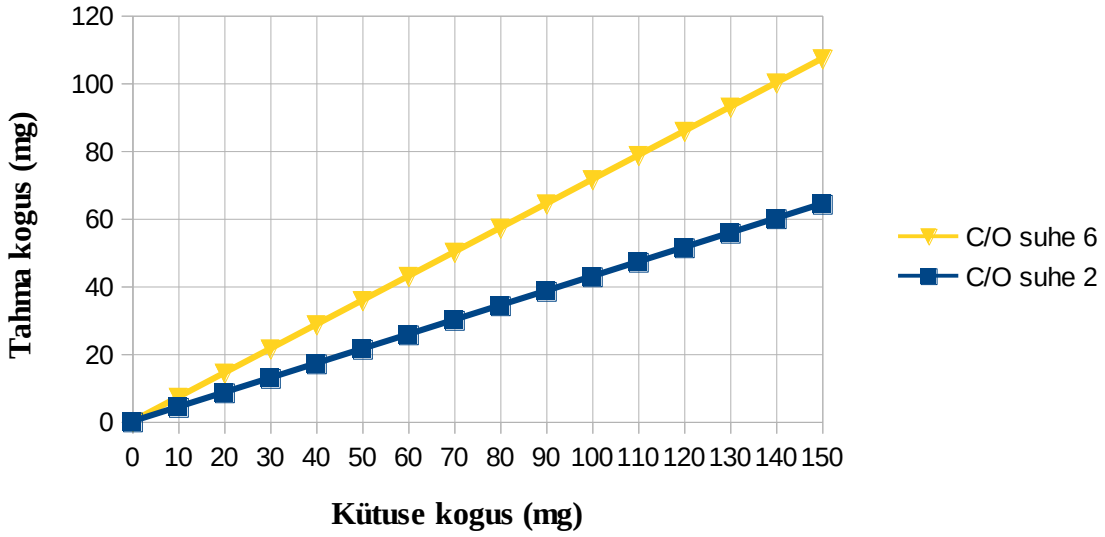
Sellel olukorral 100g kütuse kohta moodustus 42.52g tahma. Juhul kui C/O suhe on 1 ja tahm puudub on järgmine võrrand:

$$C_{12}H_{24} + 6O_2 \rightarrow 12CO + 12H_2 + 0C_S$$

$m(O_2)= 0.59\cdot6\cdot (16\cdot2)g/mol= 113.28g$ – hapniku mass

Selleks, et tahma põlemisprotsessis ei moodustuks, peaks hapniku mass 100g kütuse kohta olema 113.28g, mis on raskesti saavutatav.

Süsiniku ja hapniku suhte mõju tahma moodustumisele on toodud joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Tahma moodustumise sõltuvus süsiniku ja hapniku suhtest.

Jooniselt on näha, kui rohkem süsiniku aatomi on ühe hapniku aatomi kohta, seda suurem tahma osakaal põletatud kütuse kohta.

Vastav kütuse/õhu ekvivalentsuhe on antud valemiga:

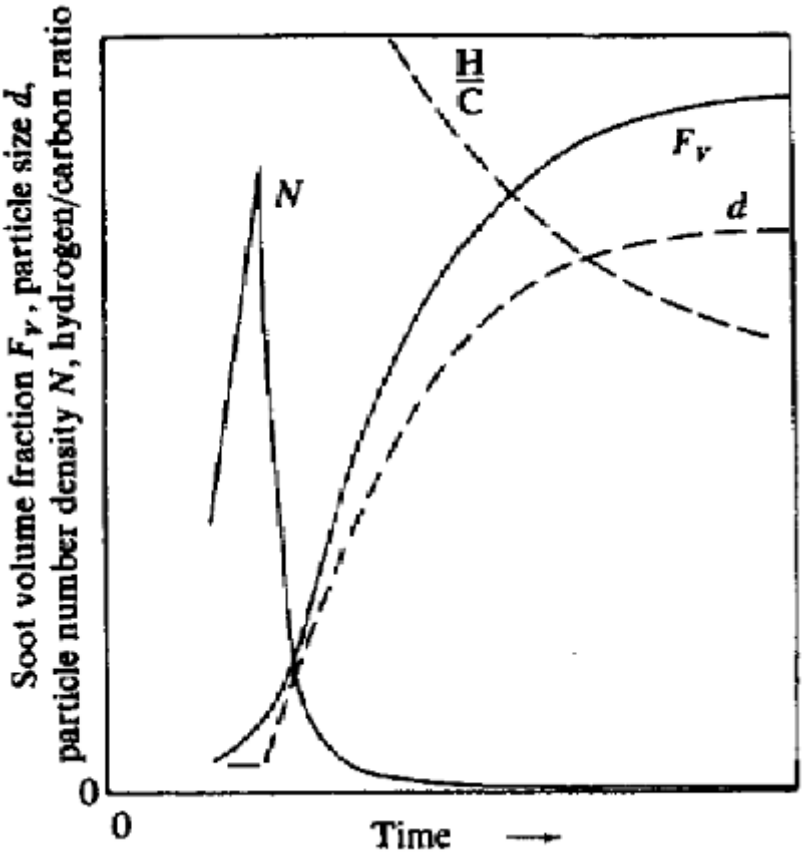
$$\phi = 2(C/O)(1 + \delta)$$

kus $\delta = n/(4m)$ ja $n/m = 2$; kui C/O suhe on 1, ϕ võrdub 3. Tahma moodustumine suureneb kiiresti koos kasvava C/O suhtega [12].

Suurem osa tahma pääseb kergesti väljalasketoru kaudu väliskeskkonda, kuid osa tahma pääseb kolvirõngaste vahelt õli sisse. Enamus nendest on sfäärilise kujuga ja vaid 0,03 mikromeetrise läbimõõduga, kuid need võivad moodustada suuremaid osakesi. Üksikud tahmaosakesed ei kujuta mootori osadele ohtu, kuid tahmatükid võivad neid kahjustada. See on tahma osakeste liitumise faas, tahma osakeste kasvamine. Tahma osakese ruumala (F_v, tahma ruumala/kogu ruumala) võib väljendada järgmise valemi järgi:

$$F_v = (\pi/6)Nd^3$$

kus N on tahma osakeste arv mahuühiku kohta, d on osakeste suurus (sfääride keskmine läbimõõt). Nende parameetrite vahelised seoseid võib jälgida joonisel 1.5.



Joonis 1.5. Tahma ruumala F_v, osakeste arvu tiheduse N, osakeste suuruse d ja vesiniku/süsiniku suhte muutumine põlemisel [12].

Osakeste arvu muutumise kiirust sõltuvalt ajast (t) võib kirjutada järgmiselt:

$$(dN/dt) = \acute{N}_n - \acute{N}_a ,$$

kus $\acute{N}_n$ on kiirus, millega värsked tuumad ilmuvad ja $\acute{N}_a$ on sfääride aglomeratsiooni kiirus, kui osakesed põrkuvad ja kleepuvad teineteise külge. Põlemisprotsessi alguses N hakkab kasvama, siis $\acute{N}_n > \acute{N}_a$. N on suurema väärtusega juhul kui $\acute{N}_n = \acute{N}_a$. Protsessi lõpus, N langemisel $\acute{N}_n < \acute{N}_a$.

Kahe tahma osakeste sfääride põrkumine võib olla põhjuseks nende koagulatsioonile, siis nendest kujuneb sferoid. Eksperimendid näitavad, et koagulatsioonil osakeste arvu tiheduse vähenemise kiirus oli proportsionaalne koagulatsiooni koefitsiendiga (K) ja osakeste ruutarvu tihedusega [12]:

$$-(dN/dt) = KN^2$$

Tahma sisalduse tõus mootorõlis võib põhjustada järgmiseid probleeme:

1) õli ja määrdeainete viskoossuse suurenemist;
2) ladestuste moodustumist mootori detailide peal;
3) õlifiltrite ummistumist;
4) tahma ladestumine kolvirõngaste peal, mis põhjustab nende lagunemist ja kulumist [13].

1.6.2. Tahma vähenemise olulisus

Peale selle, et tahmaheitmed negatiivselt mõjutavad mootori jõudlust, on nad veel põhjuseks inimeste mitmetele haigustele. Peenemad tahmaosakesed põhjustavad hingamisteede haigusi. Väga väikeste tahmaosakeste atmosfääri sattumine avaldab inimeste tervisele kahjulik mõju, nii lühiajalist kui ka pikaajalist. Väikesed tahmaosakesed on põhjustanud ka järgmiseid haigusi: kroonilised kopsuhaigused, kopsuvähk ja astma. Teadusuuringud näitavad, et need korrelatsioonid on tihedamalt seotud tahmaosakestega, mille läbimõõt ei ületa 2,5 mikromeetrit, sest nendel on lihtsam sügavale kopsu tungida. Tahmaosakeste kogus atmosfääris määrab ka sissetuleva päikesekiirguse kogust, mis omakorda aitab kaasa piirkondlikule ja globaalsele soojenemisele.

Tahmasust mõjutavate faktorite uurimine ja tahma vähenemine on oluline, et hoida inimeste tervist ja keskkonna ning muidugi, et pikendada diiselmootorite tööiga ja parandada nende jõudlust [11].

1.6.3. Tahma osakaalu mõõtmine mootori heitgaasides

Tahma osakeste kahjuliku mõju tõttu ümbritsevale keskkonnale, kehtestati regulatsioonid selle heitkogustele alates 80-ndatest aastatest. Heitgaaside tahma koguste reguleerimiseks on vaja neid mõõta. Selle jaoks on arendatud mitmeid erinevaid meetodi ja seadmeid. Peamiselt kasutatakse kolme meetodit tahma määramiseks: suitsu läbipaistmatuse mõõtmine, massi meetod ja tahma osakeste arvu meetod.

Suitsu läbipaistmatuse mõõtmiseks kasutatakse optilisi andureid. Need andurid annavad informatsiooni tahma koguse kohta heitgaasides reaalajas. On kaks tüüpi andureid:

läbipaistmatuse mõõtjad, mis hindavad suitsu heitgaasides, ja suitsuarvu mõõtjad, mis optiliselt määravad kogutud tahma kogust paberfiltrite peal. Esimese tüüpi andurid mõõdavad valgusvoo absorptsiooni koefitsienti, mille mõõtühikuks on m^{-1}. Absorptsiooni koefitsient tähistab valguvalgusvoo sumbumisastet, mis on põhjustatud heitgaasidega valguse neeldumisest ja hajumisest. Tahma heitmete massi määramiseks nende andmete põhjal olid välja arvutanud nende vastastikused korrelatsioonid. Kasutatakse kustutamise, hajumise ja neeldumise andureid, mille andmete puhul mõõdetakse valguse jaotust (fraktsioon). Peamiselt on kasutusel läbipaistmatuse mõõtur (mõõdab valguse kustumist), fotomõõtur (mõõdab valguse hajumist) ja fotoakustilised andurid (mõõdavad valguse neeldumist). Filtri suitsuarvu mõõtmiseks kasutatakse punktmõõturit. Need andurid on levinud, sest nad annavad informatsiooni tahma kogusest heitgaasides reaalajas.

Teine meetod on massi meetod, kus mõõdetakse tahma osakeste massi, mis on kogutud heitgaasidest. Selle meetodi realiseerimiseks kasutatakse gravimeetrilist analüüsi. Selleks kasutakse kaalu ja heitgaasifiltrit, mille kaalu järgi määratakse tahma kogus.

Viimane ja kõige vähem kasutatav meetod on tahma osakeste arvu meetod, kus arvutatakse osakeste numbriline kogus. See meetod vajab täpsemaid seadmeid, väikeste osakeste arvutamiseks. Osakeste proovivõtusüsteem koosneb lahjenduskanali proovivõtturist, lenduvate osakeste eemaldajast, arvutusseadmest ja ülekandetorust. Süsteemi ülesandeks on arvutada tahma osakeste arvu ühe kuupsentimeetri kohta [14].

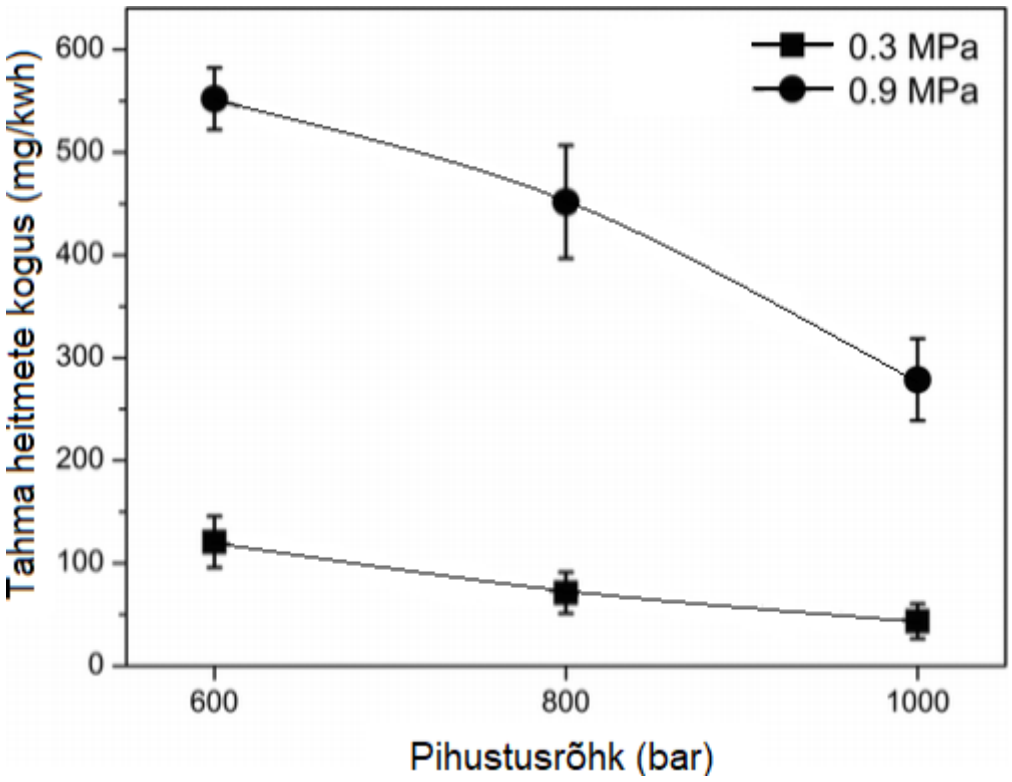
1.6.4. Uuringud pihustusrõhu mõjust tahma osakaalule heitgaasides

Tahkete osakeste moodustumise põhjuste ja nende vähendamise võimaluste kohta maailmas on tehtud palju uuringuid. Suurem osa uuringuid baseerusid kütuse uurimiste peal. Nad otsisid tahma moodustumise põhjust diislikütuse keemilise koostise komponentides ja selle vähendamiseks proovisid määrata vastavaid kütuse proportsioonid ja leida diislikütusele alternatiivi.

Teised uuringud tuginesid rohkem kütuse pihustuse ja põlemise tingimustele. Uuriti, kuidas mõjub kütuse pihustuse viis ja selle laienemine silindris enne kokkusurumist tahma osakeste kujunemisele. Selles uuringus oli suur tähelepanu pööratud kütuse pihustusnurgale [15] ja

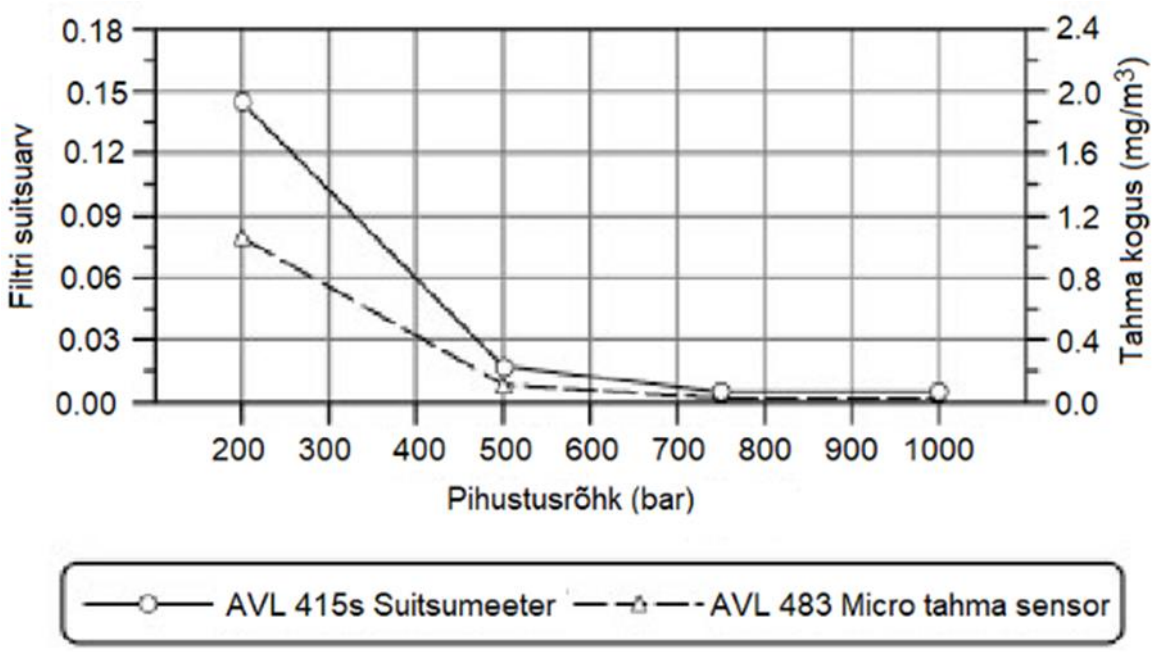
kolvi kujule [16], sest just need olid otsustavad tegurid, mis mõjutasid kütuse levimist silindris ja mõjutasid selle mittetäieliku põlemist.

Oli ka sarnane uuring sellele, mis on läbi viidud sarnaselt autori tööga. Uuringus vaadeldi rõhu mõju tahma moodustumisele. Seal analüüsiti kõrgsurvepumbaga tekitatud kütuse pihustusrõhu mõju tahma moodustumisele. Nad vaatlesid tahma osakeste füüsikalisi ja keemilisi muutusi. Selleks koguti raskeveoki diiselmootori andmeid kahel koormusel (0.3 MPa ja 0.9 MPa) ja kolmel pihustusrõhul (600 bar, 800 bar, 1000 bar). Kütuse tsetaniarv oli 51. Mootori võimsus 96 kW ja pöördemoment 450 Nm (1450 p/min). Andmete kogumiseks nad kasutasid tahma osakeste arvu meetodi, võtsid heitgaasiproovid, mida pärast analüüsiti elektronmikroskoobi all. Tahma kogust mõõdeti gravimeetrilise analalüüsi (massi meetod) abil. Selgus, et kütuse pihustusrõhu tõusmisel tahma kogus heitgaasides väheneb. Mootori madalal koormusel pihustusrõhu tõusmisel 600 bar-lt 1000 bar-ni viib tahma heitmete massi vähenemise 64%-ni ja kõrgel koormusel 50%-ni. Vaid rõhu tõusmine ei mõjutanud tahma osakesi, mille arv suurenes. 0.9MPa koormusel tahma koguse vähenemise madal efektiivsus oli seotud vähese hapniku jõudmisega silindritesse ja lühiajalise põlemiskestusega. Seda võib hästi jälgida joonisel 1.6 [17].



Joonis 1.6. Pihustusrõhu mõju tahma kogusele, mootori koormustel 0.3MPa ja 0.9MPa.

Sarnane uuring oli läbiviidud teiste teadlaste meeskonnaga. Nad viitsid läbi oma katse ühel koormusel aga kasutasid kahte erinevat mõõtevahendi. Nende katse tulemused on esitatud joonisel 1.7. Nende mõõtetulemuste kõverad on sarnase kujuga kui toodud joonisel 1.6 , aga üks on asetatud madalam kui teine selle pärast, et nad on mõõdetud erineval skaalal. Eelmise uuringu katse 0.3MPa mootori koormusel kõvera kuju sarnaneb selle uuringu tahma sensoriga mõõdud kõveraga aga ei ole nii eredalt väljendatud ja ei jõua nullini [18].



Joonis 1.7. Pihusturõhu mõju tahma kogusele, mõõdetud suitsumeetriga ja tahma sensoriga, koormusel 0.3MPa.

Töö autoril tekkis küsimus, kas pihustusrõhu kasv vähendab ka heitgaaside tahmasust biodiislikütuse kasutamisel. Samuti on küsitav eeltoodud uuringutes toodud tulemused, sest pihustusrõhk mõjutab pihustusjoa pikkust ja fakli laiust. Seega peaks olema pihustusrõhk valitud vastavalt mootorile. Liiga kõrge või madal pihustusrõhk pärsib kütusepiiskade segunemist õhuga ning tulemuseks on ebaefektiivne põlemine ning suurenenud tahma osakaal heitgaasides [21].

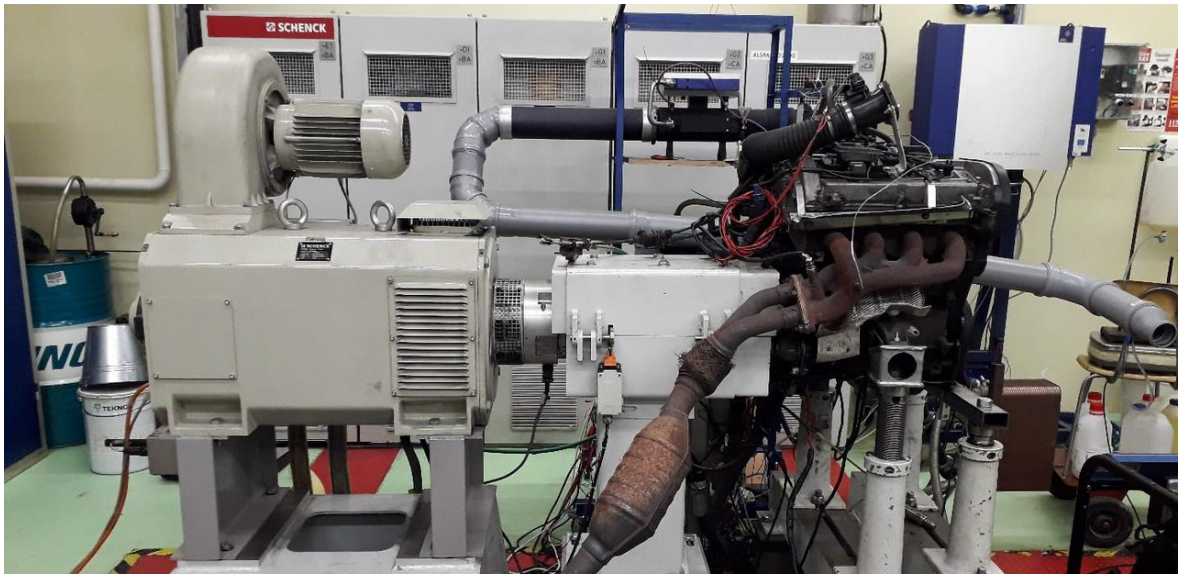
2. KATSEMETOODIKA JA KATSESEADMED

2.1. Katseseadmed

Lõputöös kasutati peamiselt kolme katseseadet, millega koguti selle uuringu katseandmed. Nendeks olid: mootorite katsestend, mootor AVL 5402 CR DI ja heitgaaside analüsaator Bosch BEA 350.

Mootori testimiseks kasutati katsestendi Schenck Dynas3 LI250 (joonis 2.1). Katsestendi tehniline iseloomustus:

- pöördemomendi vahemik 0 – 650 Nm
- maks. pidurdusjõud 250 kW
- maks. pöörlemiskiirus 12000 p/min
- täpsus 0,1%



Joonis 2.1. Dünamomeetriline katsestend Schenck Dynas3 LI250.

Katsestend võimaldab teha mootorikatseid osalise ja täiskoormuse režiimis.

Katsemootoriks kasutati ühesilindrilist diiselmootorit AVL 5402 CR DI (joonis 2.2). Mootori tehniline iseloomustus:

- kolvi läbimõõt 85 mm
- kolvi käik 90 mm
- töömaht 510 cm3
- maks. kiirus 4200 p/min
- maks. silindri rõhk 170 bar
- maks. koormus 14 bar, 2300 p/min kiirusel
- maks võimsus 19 kW, 4200 p/min kiirusel
- surveaste 17/1
- ühisanumtüüpi toitesüsteem (common rail)

Joonis 2.2. Ühesilindriline diiselmootor AVL 5402 CR DI.

Heitgaaside analüsaatoriks kasutati Bosch BEA 350 (joonis 2.3). Heitgaaside analüsaatori mõõdetavad parameetrid:

- CO mõõtevahemik 0.000 – 10.00% vol, täpsus 0.001%
- CO2 mõõtevahemik 0.00 – 18.00% vol, täpsus 0.01%

- HC mõõtevahemik 0 – 9999 ppm vol, täpsus 1 ppm vol
- O2 mõõtevahemik 0.00 – 22.00% vol, täpsus 0.01%
- λ mõõtevahemik 0.500 – 9.999, täpsus 0.001
- NOx mõõtevahemik 0 – 5000 ppm vol, täpsus 1 ppm vol
- läbipaistmatuse aste 0 – 100%, täpsus 0.1%
- neeldumistegur 0 – 10 m^{-1}, täpsus 0.01 m^{-1}
- heitgaasides tahmaosakeste arvutamine

Joonis 2.3. Heitgaaside analüsaator Bosch BEA 350.

2.2. Katsekütused

Esimeseks katsekütuseks oli E-klassi ülemineku diislikütus, mille hangumistemperatuur on – 15 ºC. Kõik olulisemad kütuse omadused on antud tabelis 1. Detailsem informatsioon kütuse kohta on antud kütuse kvaliteedisertifikaadis (Lisa 3).

Tabel 1. Diislikütuse parameetrid

Näitaja	**Tulemus**	**Katsemeetod**
1. Tsetaaniarv	51.3	LST EN ISO 5165
2. Tsetaaniindex	50.6	LST EN ISO 4264
3. Tihedus temperatuuril 15ºC , kg/m^3	834.2	LST EN ISO 3675
4. Polütsükliliste aromaatsete süsivesinike sisaldus, %	3	LST EN 12916
5. Väävlisisaldus, mg/kg	6.8	LST EN ISO 20846
6. Leekpunkt, ºC	59.5	LST EN ISO 2719
7. 10% destillatsioonijäägi koksiarv, %	0.03	LST EN ISO 10370
8. Tuhasisaldus, %	0.001	LST EN ISO 6145
9. Veesisaldus, %	0.001	LST EN ISO 12937
10. Tahkete osakeste sisaldus, mg/kg	4	LST EN 12662
11. Korrosiivsus vaskplaadikaitsel (2t temperatuuril 50 ºC), klass	1a	LST EN ISO 2160
12. Oksüdatsiooni stabiilsus, g/m3	5	LST EN 12205
13. Määrimisvõime (WSD kulumisjälje läbimõõt temperatuuril 60 ºC), µm	380	LST EN ISO 12156-1
14. Viskoossus temperatuuril 40 ºC, mm^2/s	2.468	LST EN ISO 3104
15. Destillatsioon:		LST EN ISO 3405
250 ºC juures, %	43.6	
350 ºC juures, %	94.9	
95% destilleerub temperatuuril, ºC	351	
16. Külmfiltri ummistumise punkt (CFPP), ºC	–18	LST EN 116
17. Alküülnitraatide sisaldus, %	0.076	LST EN ISO 13759
18. Hägustumispunkt, ºC	–6	LST EN ISO 3015
19. FAME sisaldus, %	0	LST EN 14078
20. Mangaanisisaldus, mg/l	<0.5	EN 16576

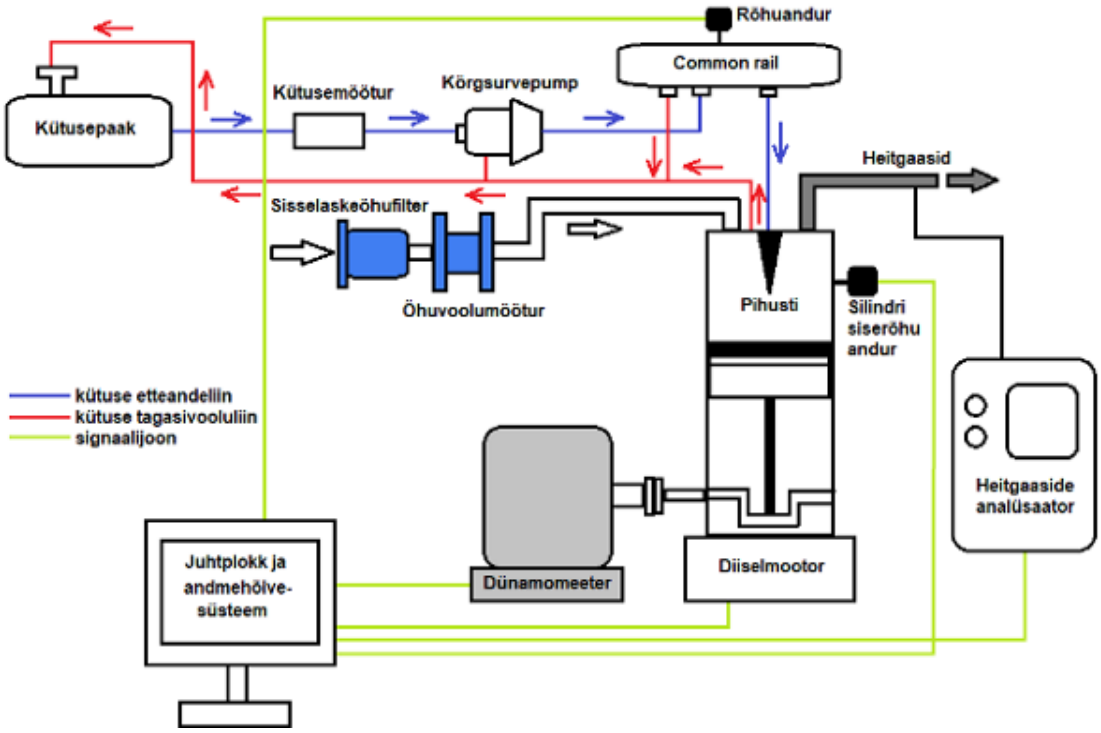
Teine osa katsetest viidi läbi HVO biodiislikütusega, mille omadused on antud tabelis 2. Detailsem informatsioon kütuse kohta on antud kütuse sertifikaadis (Lisa 4).

Tabel 2. HVO biodiislikütuse parameetrid

Näitaja	**Min**	**Max**	**Katsemeetod**
1. Tsetaaniarv IQT-analüsaatoriga	70		EN 15195
2. Tihedus temperatuuril 15°C, kg/ m^3	770	790	EN ISO 12185
3. Aromaatsed süsivesinikud, %		1	EN 12916
4. Polütsükliliste aromaatsete süsivesinike sisaldus, %		0.1	EN 12916
5. Väävlisisaldus, mg/kg		5	EN ISO 20846
6. Leekpunkt, ^oC	61		EN ISO 2719
7. Mikrosüsiniku jääk, %		0.1	EN ISO 10370
8. Tuhasisaldus 775 ^oC juures, %		0.001	EN ISO 6245
9. Veesisaldus, mg/kg		200	EN ISO 12937
10. Keskmiste destillaatide saastumine, mg/kg		10	EN 12662
11. Korrosiivsus vaskplaadikaitsel (3t temperatuuril 50 ^oC), klass		1b	EN ISO 2160
12. Oksüdatsiooni stabiilsus, g/m_3		25	EN ISO 12205
13. Happesus, mg KOH/g		0.01	ASTMD 3242
14. Viskoossus temperatuuril 40 ^oC, mm^2/s	2	4	EN ISO 3104
15. Destillatsioon:			EN ISO 3405
95% destilleerub temperatuuril, ^oC		320	EN ISO 3405
FBP destillatsioon, ^oC		330	EN ISO 3405
18. Hägustumispunkt, ^oC		–32	ASTMD 5773
19. Filtreeritavustemperatuur, ^oC		–30	EN 116
20. Elektrijuhtivus, pS/m		100	ISO 6297

2.3. Katsemetoodika

Uuring oli läbi viidud ühesilindrilise diiselmootori AVL 5402 CR DI (joonis 2.2) peal, mille parameetrid on kirjeldatud eelmises peatükis. Mootor oli ühendatud katsestendiga Schenck Dynas3 LI250 (joonis 2.1), mis võimaldab mõõta ja reguleerida mootori kiirust ja pöördemomendi. Mootori väljalasketorustikku oli ühendatud heitgaaside analüsaator Bosch BEA 350 (joonis 2.3), millega mõõdeti tahma, vingugaasi (CO), süsihappegaasi (CO_2), süsivesinike (HC), hapniku (O_2) ja lämmastikoksiidide (NO_x) kontsentratsiooni diiselmootori heitgaasides. Pihustusrõhk, kütusekulu, õhukulu ja ülejäänud mootori tööd kontrolliti juhtmooduliga. Seadmetega kogutud andmed salvestati arvutiga. Katsetusteks valiti neli pihustusrõhku (400, 500, 650 ja 800 bar) ja katsed viidi läbi kolmel mootori koormusel 50%, 75% ja 100%. Mootori koormust iseloomustavad pöördemoment ja efektiivrõhk, mis mõõdetakse rõhuanduriga. Katse oli läbi viidud ühel kiirusrežiimil, mootori pöörlemissagedusel 2300 p/min. Fikseeriti ka eel- ja põhipritse pritseajastus. Võrdlemiseks uuriti kahte erinevat kütust: ülemineku diislikütus ja HVO biodiislikütus. Katseskeem on toodud joonisel 2.4. Kõik mõõdetud parameetrid on lisades 1 ja 2 toodud tabelites.

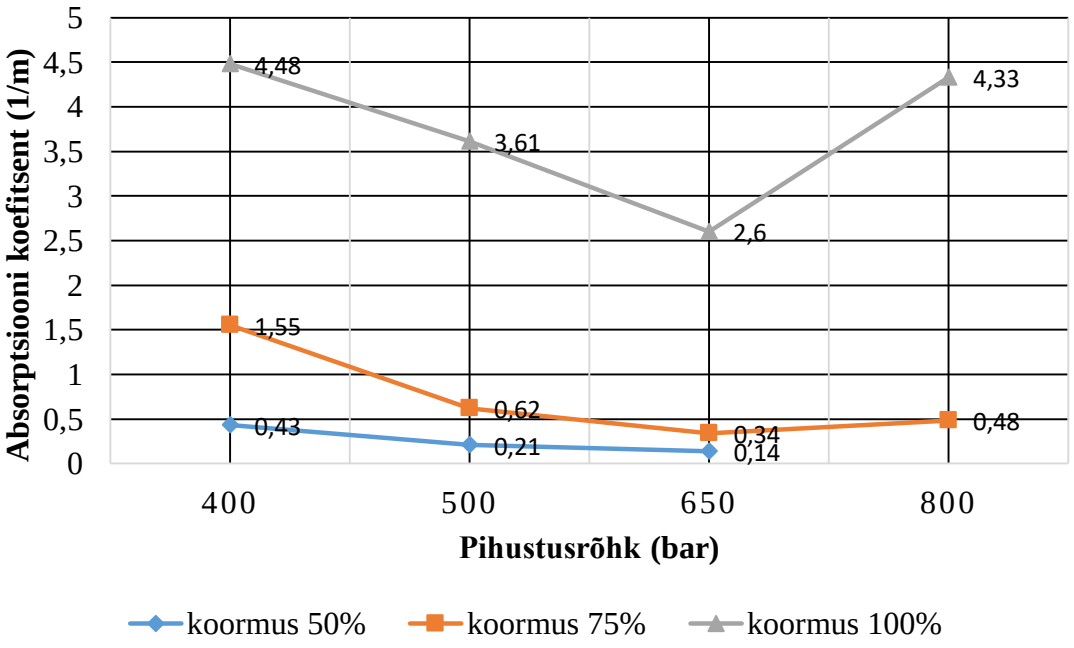


Joonis 2.4. Katseskeem.

3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1. Diiselkütuse katsetulemused

Esimesed katsed olid sooritatud E-klassi ülemineku diiselkütusega. Peamiseks mõõdetavaks parameetriks oli tahma kogus heitgaasides. Lisaks mõõdeti ka teiste ohtlike ühendite osakaalud heitgaasides pihustusrõhu kasvades. Tahma osakaal määrati absorptsiooni koefitsiendiga. Esimene katse tehti 50% mootori koormusel ehk efektiivrõhuga 0.31 MPa, teine 75% rõhul 0.46 MPa, kolmas 100% rõhul 0.61 MPa. Kõige kolme katsete tulemused on toodud tabelites 3, 4 ja 5 (Lisa 1). Pihustusrõhu kasvamise mõju tahma osakaalule heitgaasides võib näha joonisel 3.1.



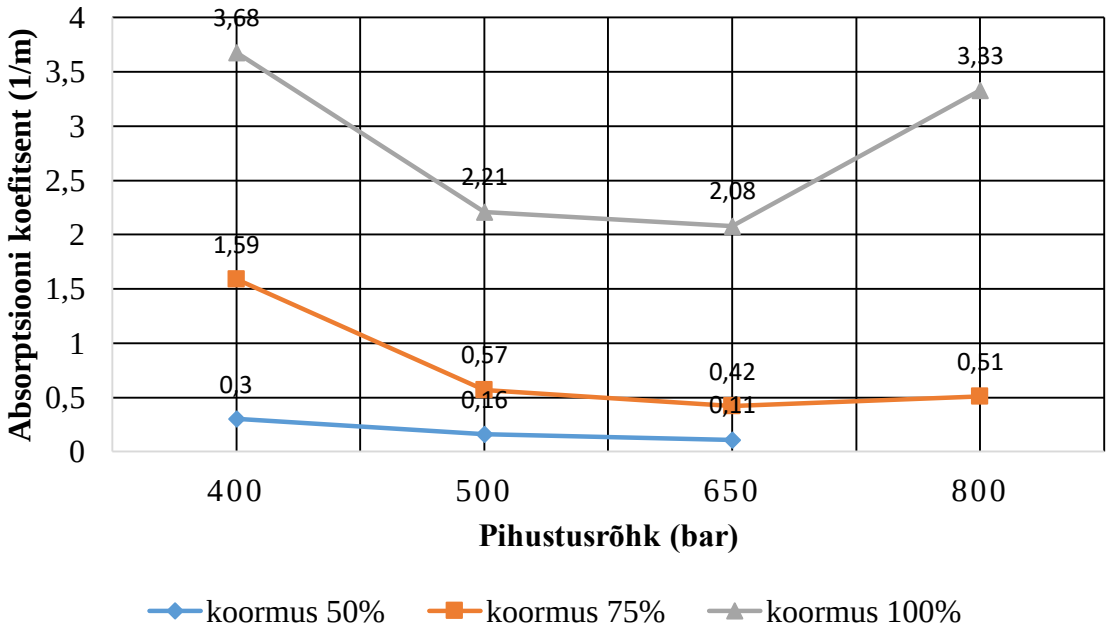
Joonis 3.1. Pihustusrõhu mõju tahma kogusele heitgaasides kasutades ülemineku diiselkütust.

Jooniselt on kohe näha seost mootori koormuse ja tahma koguse vahel. Koos koormuse suurenemisega kasvab tahma osakaal. Selle põhjuseks on kasvav kütusekulu suuremal koormusel. Teine seos on pihustusrõhu ja tahma vahel: pihustusrõhu tõusmisel 400-st kuni 650 bar-ni tahma kogus väheneb. Seda saab põhjendada sellega, et pihustusrõhu tõusmisel kütusejoad muutuvad peenemaks, piiskade suurus kütusejoas väheneb ja õhuga segunemine on efektiivsem. Rõhul 800 bar on tahmasus järsult tõusnud. Sellist tendentsi võib jälgida mootori koormustel 75% ja 100%. Koormusel 50% oli problemaatiline tõsta pihustusrõhku

800 bar-ni ja tuli koguda andmed ainult kolmel rõhul. Selle põhjuseks on mootori juhtmoodulile seatud tehasepoolsed piirangud. Saadud andmete põhjal saab järeldada, et kõige efektiivsem pihustusrõhk tahma vähenemiseks on 650 bar. Küsimuseks oli ka, millisel koormusel on kõige suurem tahma vähenemine? Arvutused näitasid, et kõige rohkem vähenes tahmasus 75% koormusel, sest tahma kogus vähenes 78.1% võrra. Kõige madalam tahma langus oli 100% koormuse juures – 42%, 50% koormusel oli vähenemine 67.4%.

3.2. HVO katsetulemused

Uuringu teine osa oli läbi viidud HVO biodiislikütusega. Nende katsete andmed on toodud tabelites 6, 7 ja 8 (Lisa 2). Pihustusrõhu kasvu mõju tahmasusele on näha joonisel 3.2.



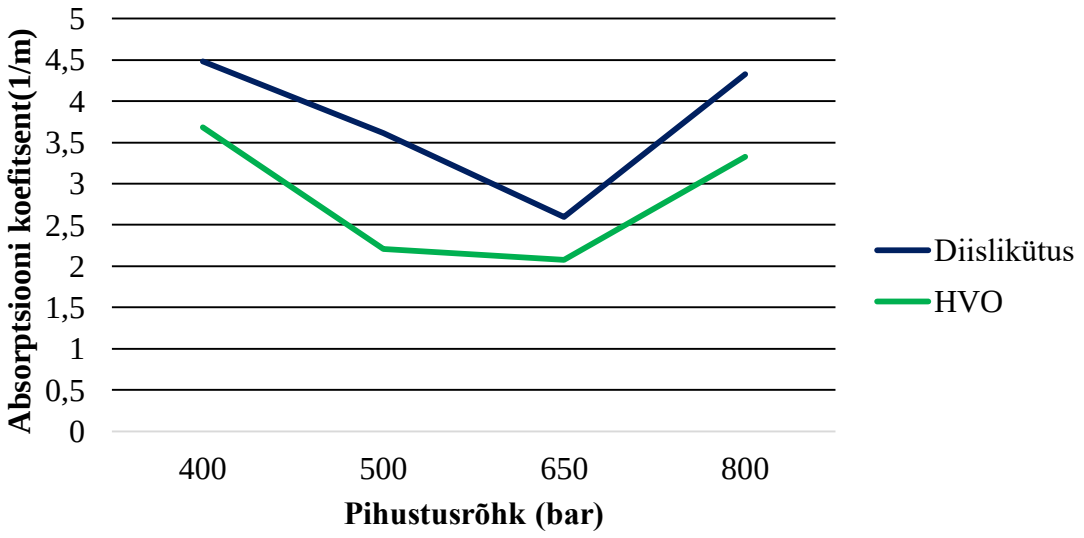
Joonis 3.2. Pihustusrõhu mõju heitgaaside tahmasusele kasutades HVO kütust.

HVO ja diislikütuse kõverad on peaaegu identsed. Mida kõrgem koormus, seda rohkem on tahma sisaldus heitgaasides. Pihustusrõhu kasvu mõju heitgaaside tahmasusele oli samuti sarnane diislikütuse kasutamsega. Nendes katsetes on ka märgata, et pihustusrõhul 800 bar hakkab tahmasus tõusma. Sellist tulemust võib põhjendada sellega, et suuremal rõhul

kütusejoad muutuvad pikkemaks ja pihustamisel sattuvad põlemiskambri seintele, mis takistab nende aurumist ja hapnikuga segunemist. Kasutades AVL 5402 CR DI mootorit, pihustusrõhu 800 bar kasutamine ei ole otstarbekas, sest tahmasus sõltub otseselt mootorist ja selle geomeetriast. Seega on igal mootril optimaalne pihustusrõhk, mille puhul on tahmasus heitgaasides võimalikult madal. Tõustes rõhult 400 bar kuni 650 bar, tahmasus vähenes erinevatel koormustel järgmiselt: 50% koormus – 63%; 75% koormus – 73.6%; 100% koormus – 43.5%. Bio- ja diislikütuse katsetused on andnud tulemused, mille järelduseks võib öelda, et kõige suurema mõju tahma koguse vähenemisele avaldab pihustusrõhk 650 bar mootori koormusel 75%.

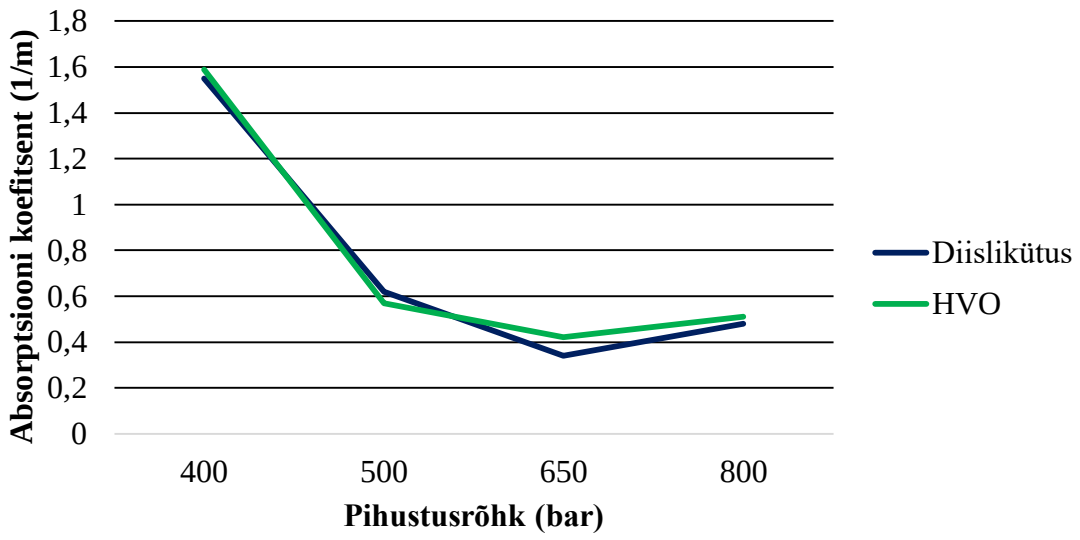
3.2.1. HVO ja diislikütuse katsetulemuste võrdlemine

Selles alapeatükis võrreldakse kahte kütust, selleks et teha selgeks – kui palju vähendab HVO mootori heitgaaside tahmasust. Kas nende kasutamisel väheneb tahma kogus? Vastuse nendele küsimustele võib saada joonistelt 3.3, 3.4 ja 3.5.



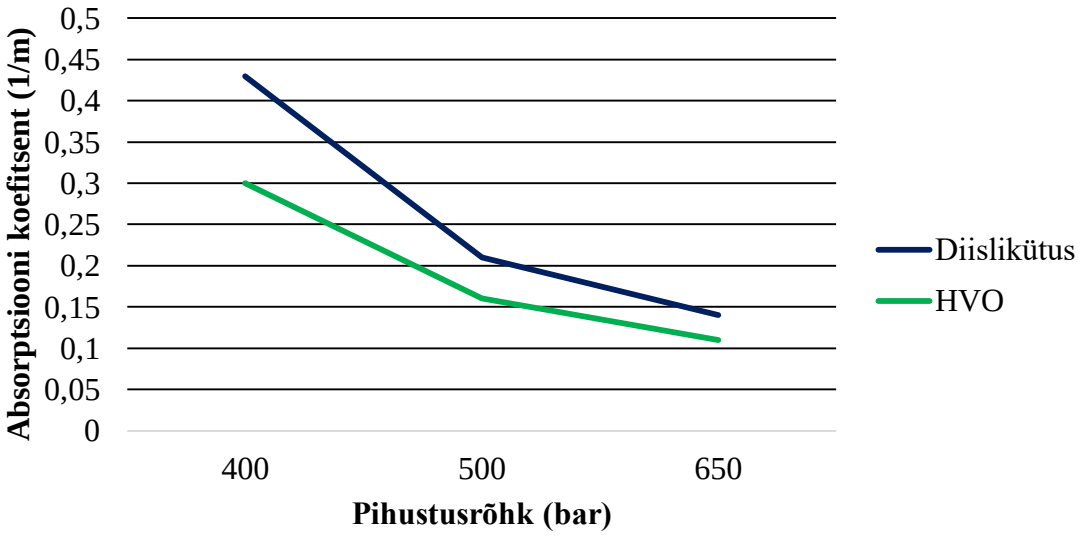
Joonis 3.3. Tahmasus mootori koormusel 100%.

Mootori täiskoormusel on HVO kütuse eelis võrreldes diislikütusega hästi märgatav. Tahmasus väheneb keskmiselt 25% võrra.



Joonis 3.4. Tahmasus mootori koormusel 75%.

Autorile suureks üllatuseks oli mootori koormusel 75% tulemused identsed mõlemal kütusel. Diislikütuse kasutamisel keskmiselt tekkis natuke vähem tahma.



Joonis 3.5. Tahmasus mootori koormusel 50%.

Diagrammil on näha, et madalal mootori koormusel on samasugune olukord kui täiskoormuse juures. Siin HVO kütuse kasutamine vähendab tahma sisaldust heitgaasides 25.1% võrra.

Kui vaadata üldiselt katsetulemusi, võib öelda, et HVO kasutamine diislikütuses on õigustatud ja soodsalt mõjutab ümbritseva keskkonda.

3.3. Katsetulemuste võrdlemine teiste uuringute tulemustega

Esimeses peatükis on antud ülevaade teadlaste uuringutest, kes uurisid seost tahma moodustumise ja pihustusrõhu vahel. Nende katsetulemused näitasid, et mida suurem on rõhk, seda vähem moodustub tahma. Nad tõstsid rõhu 1000 bar-ni ja mitte mingisugust tahma tõusu nendel ei tekkinud. See on ainuke erinevus nende ja antud töö tulemuste vahel. Esimese uuringuga tuli välja sarnane järeldus, et mootori täiskoormusel tahmasuse vähenemise protsent on kõige madalam. Mõlemas uuringus määrati koormus läbi efektiivrõhu. Nad kogusid andmed mootori koormustel 0.3MPa ja 0.9MPa. Nende tulemusi võib võrrelda ainult ühe katse (50% koormusel) kõveraga, sest seal oli koormus 0.31MPa. Kõver joonisel 3.2 (50% koormus) ja teiste uuringu kõverad (joonised 1.6 ja 1.7) koormusel 0.3MPa on peaaegu sama kujuga. Sellel koormusel on ka sarnane esimese uuringu tulemus tahma moodustamise vähenemise kohta, kus tahmasus vähenes 64%, antud töös oli vähenemine 67.4%.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgi saavutamiseks Eesti Maaülikooli mootorilaboris sooritati katsed kahe diislikütustega (HVO biodiislikütus ja E-klassi ülemineku diislikütus) mootori kiirusrežiimil 2300 p/min ja kolmel erineval mootori koormusel. Katsete läbi viimise käigus tõsteti kütuse pihustusrõhu 400 bar-lt kuni 800 bar-ni. Katsete tulemustena uuriti, kuidas mõjutab pihustusrõhu tõusmine tahma moodustumist ja vähendab selle sisaldust heitgaasides. Katsetustest tuli välja, et selline tendents kehtib pihustusrõhu tõusmisel kuni 650 bar-ni. Edasisel rõhu tõusmisel hakkab tahma kogus kasvama. Saadud andmete järgi, kõige suuremat mõju tahma moodustumise vähenemisele avaldab pihustusrõhk 650 bar, mootori koormusel 75%. Sellised järeldused võib teha mõlema kütuse katsetulemuste kohta.

HVO- ja ülemineku diislikütuse võrdlemised näitasid, et HVO üldiselt on efektiivne tahma osakaalu vähendamiseks, sest mootori koormustel 50% ja 100% väheneb tahma kogust 25% võrra.

Lõputöö tulemuste võrdlemine teiste uuringutega näitas sarnasusi, kuid kõrgematel pihustusrõhkudel tekkisid erinevused. Selle põhjuseks võib olla katsemootorite ja katsemetoodika erinevused. Nende ja antud töö järelduseks võib öelda, et pihustusrõhu tõusmise mõju tahmale on kõige väiksem mootori täiskoormusel. Samuti on oluline märkida, et pihustusrõhk ja selle mõju tahmasusele sõltub mootori konstruktsioonist.

Selle lõputöö edasiarendamiseks võiks uurida teisi faktoreid, mis mõjutavad diislikütuse mittetäielikku põlemist nt kolvi kuju. Võib uurida milline põlemiskambri kuju soodustab kõrgemat pihustusrõhu kasutamist mootoris.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Koha, E., Pikner, A.** (1988). Kütused ja määrdeained – 2, ümbertöötatud trükk. Tallinn. 160 lk.
2. Encyclopedia Britannica. Diesel fuel. [*on-line*] https://www.britannica.com/technology/diesel-fuel (02.02.2020)
3. DieselNet. Standards. EU: Fuels: Automotive Diesel Fuel. [*on-line*] https://dieselnet.com/standards/eu/fuel_automotive.php (06.02.2020)
4. Cirkle K. Talvine ja suvine diislikütus. Kvaliteedi nõuded diislikütusele. [veebileht] https://m.circlek.ee/et_EE/pg1334072577369/Talvinejasuvinediislik%C3%BCtus.html (12.02.2020)
5. РусПетрол. Свойства дизельного топлива. [*on-line*] https://www.ruspetrol.ru/materiali/svojstva-dizelnogo-topliva.html (15.02.2020)
6. Energiatalgud. Kütused. [*on-line*] https://energiatalgud.ee/index.php/K%C3%BCtused?menu-60 (19.02.2020)
7. Encyclopedia Britannica. Biodiesel fuel. [*on-line*] https://www.britannica.com/technology/biodiesel (21.02.2020)
8. **Majewski, A.** (2019). Synthetic Diesel Fuel. [*on-line*] https://dieselnet.com/tech/fuel_synthetic.php (21.02.2020)
9. **Jääskeläinen, H., Ferrari, A.** (2014). Common Rail Injection System Control. [*on-line*] https://dieselnet.com/tech/diesel_fi_common-rail_control.php (22.02.2020)
10. ResearchGate. The compositions of diesel exhaust gas. [*on-line*] https://www.researchgate.net/figure/The-compositions-of-diesel-exhaust-gas_fig1_293794340 (28.02.2020)
11. **Xi, J., Zhong, B.** (2006). Soot in Diesel Combustion System. [*on-line*] https://www.researchgate.net/publication/215453602_Soot_in_Diesel_Combustion_System (06.03.2020)
12. **Heywood, J.** (1988) . Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill Education. 930 lk.

13. Growmark, Inc. (2011). Soot in diesel engines. [*on-line*] https://www.gofurthergofs.com/Portals/0/Assets/Knowledge/Whitepapers/Soot-in-Diesel-Engines.pdf (10.03.2020)

14. **Giechaskiel, B., Schiefer, E., Schindler, W., Axmann, H., Dardiotis, C.** (2013). Overview of Soot Emission Measurements Instrumentation: From Smoke and Filter Mass to Particle Number. [*on-line*] https://www.researchgate.net/publication/277653772_Overview_of_Soot_Emission_Measurements_Instrumentation_From_Smoke_and_Filter_Mass_to_Particle_Number (17.03.2020)

15. **Mobasheri, R.** (2016). Influence of narrow fuel spray angle and split injection strategies on combustion efficiency and engine performance in a common rail direct injection diesel engine. [*on-line*] https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1756827716651514 (22.03.2020)

16. **Dimitriou, P., Wang, W., Peng, J.** (2014). A piston geometry and nozzle spray angle investigation in a DI diesel engine by quantifying the fuel-air mixture. [*on-line*] https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/1756-8277.7.1.1 (26.03.2020)

17. **Xu, Z., Li, X., Guan, C., Huang, Z.** (2013). Effects of Injection Pressure on Diesel Engine Particle Physico-Chemical Properties. [*on-line*] https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2013.862589 (29.03.2020)

18. **Buri, S., Spicher, U., Kubach, H.** (2010). Effects of increased injection pressuresof up to 1000 bar – Opportunities in stratified operation in a direct-fuel injection spark-ignition engine. [*on-line*] https://www.researchgate.net/publication/228876150_Effects_of_increased_injection_pressures_of_up_to_1000_bar_-_Opportunities_in_stratified_operation_in_a_direct-injection_spark-ignition_engine (07.04.2020)

19. **Hiroyasu, H., Kadota, T.** (1976). Hiroyasu-Nagle and Strickland (HSN) Soot Model – *SAE Technical Papers 950278*

20. Neste.(2018). Kohustuslik biokütus – mida see sinu jaoks tähendab? [veebileht] https://www.neste.ee/ee/kohustuslik-biokytus (12.04.2020)

21. **Maes, N., Skeen, S., Bardi, M.** (2016). Spray penetration, combustion, and soot formation characteristics of the ECN Spray C and Spray D injectors in multiple combustion facilities. [*on-line*] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119384170 (20.05.2020)

LISAD

Lisa 1. Diislikütusega katsetuse tulemused

Tabel 3. Esimese katse andmed, mootori koormusel 50%

Eelpritse	kraad	17.625	17.625	17.625
Põhipritse	kraad	5.25	5.25	5.25
Koormus	%	50	50	50
Te	Nm	12.5	12.5	12.5
ne	p/min	2300	2300	2300
Pih. rõhk	bar	400	500	650
pe	Mpa	0.31	0.31	0.31
Tahm	1/m	0.43	0.21	0.14
CO	%	0.007	0.008	0.006
CO_2	%	1.57	1.58	1.59
HC	ppm	28	42	27
O_2	%	18.81	18.82	18.88
NOx	ppm	25	33	24
Kütusekulu	kg/h	1.061	0.95	0.96
Kütuse tihedus	kg/m^3	821.58	818.86	821.07
Kütuse temperatuur	°C	25.19	24.81	25.02
Õhukulu	kg/h	32.46	32.41	32.68

Te – pöördemoment

ne – pöörlemiskiirus

pe – efektiivrõhk

ppm – ühik miljoni kohta

Tabel 4. Teise katse andmed, mootori koormusel 75%

Eelpritse	kraad	15	15	15	15
Põhipritse	kraad	5.25	5.25	5.25	5.25
Koormus	%	75	75	75	75
Te	Nm	18.75	18.75	18.75	18.75
ne	p/min	2300	2300	2300	2300
Pih. rõhk	bar	400	500	650	800
pe	Mpa	0.46	0.46	0.46	0.46
Tahm	1/m	1.55	0.62	0.34	0.48
CO	%	0.019	0.008	0.01	0.022
CO_2	%	1.59	1.69	1.69	1.74
HC	ppm	19	26	20	14
O_2	%	18.74	18.61	18.61	18.65
NOx	ppm	17	28	34	22
Kütusekulu	kg/h	1.617	1.359	1.318	1.412
Kütuse tihedus	kg/m^3	824.41	822.88	823.69	824.05
Kütuse temperatuur	°C	25.74	25.3	25.42	25.57
Õhukulu	kg/h	32.03	32.65	32.33	32.18

Tabel 5. Kolmanda katse andmed, mootori koormusel 100%

Eelpritse	kraad	13.125	13.125	13.125	13.125
Põhipritse	kraad	5.25	5.25	5.25	5.25
Koormus	%	100	100	100	100
Te	Nm	25	25	25	25
ne	p/min	2300	2300	2300	2300
Pih. rõhk	bar	400	500	650	800
pe	Mpa	0.62	0.62	0.62	0.62
Tahm	1/m	4.48	3.61	2.6	4.33
CO	%	0.091	0.074	0.091	0.229
CO_2	%	1.36	1.34	1.47	1.5
HC	ppm	16	23	15	16.2
O_2	%	18.86	18.95	18.78	18.7
NOx	ppm	18	21	27.8	19
Kütusekulu	kg/h	1.757	1.875	1.793	1.984
Kütuse tihedus	kg/m^3	825.2	825.55	825.82	825.94
Kütuse temperatuur	°C	25.86	25.91	25.97	26.15
Õhukulu	kg/h	31.12	31.16	31.39	31.39

Lisa 2. HVO katsetuse tulemused

Tabel 6. Esimese katse andmed, mootori koormusel 50%

Eelpritse	kraad	17.625	17.625	17.625
Põhipritse	kraad	5.25	5.25	5.25
Koormus	%	50	50	50
Te	Nm	12.5	12.5	12.5
ne	p/min	2300	2300	2300
Pih. rõhk	bar	400	500	650
pe	Mpa	0.31	0.31	0.31
Tahm	1/m	0.3	0.16	0.11
CO	%	0.005	0.006	0.004
CO_2	%	1.45	1.42	1.45
HC	ppm	11	13	13
O_2	%	18.89	18.95	18.9
NOx	ppm	23	35	38
Kütusekulu	kg/h	1.045	0.953	0.978
Kütuse tihedus	kg/m^3	780.62	779.45	778.47
Kütuse temperatuur	°C	27.85	27.62	27.55
Õhukulu	kg/h	31.71	32.09	31.58

Tabel 7. Teise katse andmed, mootori koormusel 75%

Eelpritse	kraad	15	14.625	14.625	14.625
Põhipritse	kraad	5.25	5.25	5.25	5.25
Koormus	%	75	75	75	75
Te	Nm	18.75	18.75	18.75	18.75
ne	p/min	2300	2300	2300	2300
Pih. rõhk	bar	400	500	650	800
pe	Mpa	0.46	0.46	0.46	0.46
Tahm	1/m	1.59	0.57	0.42	0.51
CO	%	0.029	0.01	0.012	0.034
CO_2	%	1.39	1.44	1.51	1.53
HC	ppm	12	12	13	9
O_2	%	18.98	18.9	18.79	18.75
NOx	ppm	12	23	29	30
Kütusekulu	kg/h	1.698	1.362	1.333	1.44
Kütuse tihedus	kg/m^3	777.06	776.66	775.95	775.4
Kütuse temperatuur	°C	27.68	27.63	27.65	27.74
Õhukulu	kg/h	31.5	32.32	31.76	32.03

Tabel 8. Kolmanda katse andmed, mootori koormusel 100%

Eelpritse	kraad	13.125	13.125	13.125	13.125
Põhipritse	kraad	5.25	5.25	5.25	5.25
Koormus	%	100	100	100	100
Te	Nm	25	25	25	25
ne	p/min	2300	2300	2300	2300
Pih. rõhk	bar	400	500	650	800
pe	Mpa	0.62	0.62	0.62	0.62
Tahm	1/m	3.68	2.21	2.08	3.33
CO	%	0.104	0.048	0.09	0.214
CO_2	%	1.31	1.35	1.39	1.39
HC	ppm	11	7	9	5
O_2	%	19.28	18.98	18.88	18.95
NOx	ppm	14	16	20	11
Kütusekulu	kg/h	1.541	1.711	1.779	1.954
Kütuse tihedus	kg/m^3	774.24	774.19	773.78	773.51
Kütuse temperatuur	°C	27.88	27.92	27.92	28
Õhukulu	kg/h	31.19	30.87	31.65	31.52

Lisa 3. Diislikütuse kvaliteedi sertifikaat

ORLEN Lietuva

Public Company ORLEN Lietuva, DA/TOC Center has been accredited of conformity LST EN ISO/IEC 17025 (Certificate of Accreditation No. LA.GL.013)

Certificate of quality Nr. 143609_3335979

DIESEL grade E

Standard: LST EN 590:2013+A1:2017 **KN: 27101943** **Certificate of quality Registration Date: 2020-03-22** **Sampling date: 2020-03-22**

Level: 1550 **Tank No: RZ-48**

Property	Norm	In fact	Test method
1. Cetane number, min	51,0	51,3	LST EN ISO 5165 LST EN 15195
2. Cetane index, min.	46,0	50,6	LST EN ISO 4264
3. Density at 15 °C, kg/m³	820,0-845,0	834,2	LST EN ISO 3675 LST EN ISO 12185
4. Polycyclic aromatic hydrocarbons, % (m/m), max.	8	3	LST EN 12916
5. Sulfur content, mg/kg, max.	10,0	6,8	LST EN ISO 20846
6. Flash point, °C	above 55	59,5	LST EN ISO 2719
7. Carbon residue (on 10 % distillation residue), % m/m, max.	0,30 *	0,03	LST EN ISO 10370
8. Ash content, % m/m, max	0,010	0,001	LST EN ISO 6245
9. Water content, % m/m, max.	0,020	0,001	LST EN ISO 12937
10. Total contamination, mg/kg, max.	24	4	LST EN 12662
11. Copper strip corrosion (3 h at 50 °C), rating, max.	class 1	1a	LST EN ISO 2160
12. Oxidation stability, g/m³, max.	25	5	LST EN ISO 12205
13. Lubricity, scar diameter (WSD), at 60 °C, µm, max.	460	380	LST EN ISO 12156-1
14. Viscosity, at 40 °C, mm²/s	2,000–4,500	2,468	LST EN ISO 3104
15. Distillation:			LST EN ISO 3405
% (v/v) recovered at 250 °C, max.	65	43,6	
% (v/v) recovered at 350 °C, min.	85	94,9	
95 % (v/v) recovered at, °C, max.	360	351	
16. CFPP temperature, °C, max.	minus 15	minus 18	LST EN 116
17. Alkyl nitrate content, % v/v	report **	0,076	LST EN ISO 13759
18. Cloud point, °C	report **	minus 6	LST EN ISO 3015
19. FAME content, % (v/v), max	7,0	0	LST EN 14078
20. Manganese content, mg/l, max	2,0	< 0,5	EN 16576

Public Company ORLEN Lietuva, being fully responsible as the manufacturer, hereby certifies that "Diesel grade E", related to this declaration, corresponds to the requirements of LST EN 590:2013+A1:2017

*Index value is regulated until the additive for ignition improvement is introduced

**Only under Buyer's request

ORLEN Lietuva

Akcinė bendrovė „ORLEN Lietuva"
Juodeikiai, LT-49467 Mažeikių r.
Lietuva
tel. +370 443 9 21 21
faks. +370 443 9 25 25
juridinio asmens kodas 188651720
PVM mokėtojo kodas LT 886517319

Birutė Vorienė

Senior Document Administrator

Product to railway tank Nr.: 51346096, 51686038, 51348597, 51527679, 50539444, 57493793 loadent from tank RZ-48

Lisa 4. HVO biodiislikütuse sertifikaat

NESTE

Product data sheet

1 (1)
14.12.2016 15:25
hartituu

Selling Name	Shortname	Qualifier
Neste Renewable Diesel, c.p. -32	NEXBTL-32	19216

The text is printed to COQ

Incl. Conductivity Additive STADIS 450

No FAME and No metallic additives (manganese) added
No lubricity additive added

Cold filter plugging point to be tested and reported but not guaranteed

Properties

Property	Unit	Min	Max	Typical value	Method	Laboratory
Appearance at 25°C			C&B		ASTMD4176-1	
Colour, Pt-Co			70		ISO6271-2	
Cetane Number by IQT-analyser		70,0			EN15195	
Density at 15°C	kg/m3	770,0	790,0		ENISO12185	
Aromatics	wt-%		1,0		EN12916	
Polyaromatics	wt-%		0,1		EN12916	
Sulphur, UV	mg/kg		5,0		ENISO20846	
Flash point, Pensky Martens	°C	61,0			ENISO2719	
Micro Carbon Residue 10% bottom	wt-%		0,1		ENISO10370	
Ash, 775°C	wt-%		0,001		ENISO6245	
Water coloumetric	mg/kg		200		ENISO12937	
Contamination in middle distillates	mg/kg		10		EN12662	
Copper Corrosion 3 h 50 °C	no		1b		ENISO2160	
Oxidation stability	g/m3		25		ENISO12205	
Acidity Total (TAN)	mg KOH/g		0,010		ASTMD3242	
Viscosity at 40 °C	mm2/s	2,000	4,000		ENISO3104	
Distillation 95 vol-%	°C		320,0		ENISO3405	
Distillation FBP	°C		330,0		ENISO3405	
Distillation 340°C (E340)	vol-%				ENISO3405	
Distillation 360°C (E360)	vol-%				ENISO3405	
High Frequency Reciprocating Rig	µm/60°C				ENISO12156-1	
Cloud Point, automatic (D2500 equivalent)	°C		-32		ASTMD5773	
Cold filter plugging point	°C		-30		EN116	
Electrical Conductivity	pS/m	100			ISO6297	

Product Data Sheet ID	Version	Status
16192	1	In use

Author By	Approved by
Lionel Rebetez	Lionel Rebetez

Reportid: QCCardTemp_Customer
Systemdate: 14.12.2016 15:25

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Juri Hazov,
(sünnipäev 22. 01.1997)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Diiselmootori toitesüsteemi pihustusrõhu mõju tahma moodustumisele“, mille juhendaja on Risto Ilves,
   1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
   1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
   1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
allkiri

Tartu, 25.05.2020

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev)*