

# KVALITATIIV- JA KVANTITATIIVMEETODIL VALMISTATUD KÜTTESEGU HINDAMINE MOOTORMEETODIL

Jüri Olt, Villu Mikita, Risto Ilves\*, Arne Küüt  
Eesti Maaülikool, tehnikainstituut, e-mail: risto.ilves@emu.ee

**ABSTRACT.** In the article the research results concerning the possible uses of alternative fuels and their feeding methods in diesel engines are presented. The alternative fuel-air mixture under study comprises diesel fuel, liquid fuel made of lignocellulose raw materials, and fuel additive improving the cetane number of the mixture. The quantitative correlation of fuel components and their methods of use in a diesel engine are determined by optimizing different fuel-mixing methods. In order to evaluate the composition of the fuel-air mixture, qualitative and quantitative mixing methods are used. In the research paper different mixing methods of fuel components and the influence of created fuel-mixtures on the combustion process are analyzed. The possible methods of use of the fuel-mixture under study in a diesel engine are analyzed. The composition of a local alternative fuel-air mixture is developed and motor method is used to test its methods of use. The physical-chemical properties of the alternative fuel-air mixture are evaluated by measuring the indicator factors and output parameters of the engine. In the article a recommended practice is presented as for how to create an alternative fuel-air mixture and how to use it in diesel engines. The author also evaluates the perspective of developing this kind of an alternative air-fuel mixture.

**Keywords:** qualitative and quantitative fuel mixing methods, indicator index of combustion process, adjustment characteristic of the injection pumps and diesel engines.

## Sissejuhatus

Impordil põhinev vedelkütuseturg ja selle kujundatav mootorikütuse hind muutub tarbijale üha kallimaks. Energiakandjate kõrged hinnad mõjutavad otseselt pakutavate toodete ja teenuste konkurentsivõimet ja tarbijaskonna ostuvõimet. Üks olukorra leevendamise tee on alternatiivsete mootorikütuste, näiteks etanoolkütus, kasutuselevõtt. Eestis on olemas ajaloolised traditsioonid etanooli tootmiseks, kuid puuduvad kogemused selle kasutamisega mootorikütusena. Etanoolil on mitmeid puudusi, miks seda ei saa kasutada mootoris põhikütusena, näiteks: diislikütusest madalam eripõlemissoojus, põlemisprotsessi endotermiline iseloom, halb segunemine teiste kütustega, väikesed määrimisomadused, halvad käivitusomadused ja puhta etanooli tootmise kõrge hind.

Artiklis esitatakse uurimistulemused kohalikust lignotselluloosest toormaterjalist valmistatud etanooli kasutamiseks diiselmootori lisandkütusena. Analüüsitakse uuritavate kütusesegude võimalikke kasutus-

meetodeid ja nende mõju diiselmootori põlemisprotsessile. Küttesegu koostise hindamisel kasutatakse kvalitatiivseid ja kvantitatiivseid segumoodustusviise. Kütusekomponentide vahekorrd küttesegus ja nende kasutusmeetodid määratakse kindlaks erinevate segumoodustusviiside optimeerimise teel. Töötatakse välja minimaalse kontsentratsiooniga etanoolkütus, mille füüsikalisi-keemilisi omadusi ja kvaliteeti hinnatakse mootori põlemisprotsessi indikaatornäitavate ning mootori väljundparameetrite mõõtmisega stendikatsetustel. Artiklis esitatakse tehniline lahendus alternatiivkütuse kasutamiseks diiselmootoris. Samas antakse hinnang väljavalitud alternatiivkütuse kasutamise perspektiivsuse kohta vabariigis. Artikli autorite pakutava lahenduse uudsus seisneb selles, et mootoril kasutatakse kahte toitesüsteemi: põhi- ja abitoitesüsteemi, millega tagatakse vastavalt baaskütuse juhtpritsite ja lisandküttesegude manustamine etteantud koormusrežiimile. Selline lahendus kindlustab mootori hea käivitumise ja selle töötamise laias töörežiimide vahemikus. Lisandkütus suunatakse tööprotsessi sisse-laskekolektori kaudu.

Uurimustöö eesmärk on leida minimaalne etanoolsegu kontsentratsioon, millega mootor on võimeline töötama testplaani ülekoormuspiirkonnas rahuldavalt. Stendikatsetustel kasutati etanoolkütuseid kontsentratsiooniga 90%; 80%; 70% ja 60%. Mootoris toimuva põlemisprotsessi analüüs näitas, et kvalitatiivsel ja kvantitatiivsel teel erinevate kütuste suunamine põlemisprotsessi on tehniliselt lubatav. Seda tõestasid mootori D-120 stendikatsetused. Katsetustel selgus, et 60% etanoolkütus töötab hästi mootori lisandkütusena ja ei tekita mootorile tehnilisi tõrkeid. Pärast keskpikka katsetuste tsükli etanoolkütustega ei halvenenud katsemootori indikaatornäitavud ega surveprotsessi lõpp-rõhk. Baaskütuse pilootpritsite vähenemisest tingitud võimsuskao saab kompenseerida etanoolkütuse lisamisega. Etanoolkütuse tootmistehnoloogia on suhteliselt lihtne ja odav. Kuni 70-protsendilise etanooli tootmisega saab tänapäeval hakkama iga farmer. Mootori kohandamiseks etanoolkütusele piisab täiendavast karbureerimisseadmest. Etanooli kasutamine mootorikütusena suurendab energiajulgeolekut, vähendab oluliselt ettevõtjate maksukoormust, toodangu omahinda ja keskkonna saastet.

## Metoodika

Etanooli kasutamist mootorikütusena on uuritud põhjalikult juba XX sajandil. Mitmetes riikides, nagu Brasiilia, USA, Boliivia, Uruguai, Saksa LV ja Rootsi, kasutatakse täna etanooli mootori põhikütusena. Välja on töötatud mootorikütuste tehnoloogiad ka etanooli ja

mootoribensiini ning etanooli ja diiselmootori segude kasutamiseks. Olulisemad sellealased uurimustööd on toodud mitmetes patentides, näiteks WO 2009106647, ning artiklites (Demirbas, 2006; Bialkowski, 2009). Vaatamata läbiviidud uuringutele ja olemasolevatele tehnoloogiatele on Euroopa Liidus täna mitmeid riike, kus alternatiivkütuseid veel ei kasutata. Järelikult on olemas mitmeid objektiivseid faktoreid ja seadusandlike puudusi, mis takistavad seda tegemast. Nimetatud faktorite väljaselgitamine peaks olema tänaste uurimistööde prioriteet. Osa faktoreid käsitletakse ka käesolevas uurimustöös.

Eesti geograafiline asukoht, vaba tootmismaa olemasolu, elanikkonna kõrge haridustase ja selle traditsiooniline side põllumajanduslikku tootmisega loovad head võimalused kaasaegsete, kohalikust lignotselluloosist toormaterjalist valmistatud vedelkütuste väljatöötamiseks, tootmiseks ja kasutamiseks. Merekliima ja geograafiline laiuskraad mõjutavad Eesti riigi kütuste tootmis- ja kasutustehnoloogiate spetsiifikat. Oluliseid faktoreid on õhutemperatuuri ja -niiskuse muutmine aasta lõikes laiades piirides ja eri kombinatsioonides. Eesti Vabariigis kasutatav mootorikütus peab võimaldama mootoril töötada temperatuurivahemikus +40...–40°C. Täiendav geograafiline mõjufaktor on Venemaa turu lähedus. Üldteada on fakt, et Venemaa on maailmas üks suurimaid ahju- ja mootorikütuste tootjaid. Venemaa ei ole tootnud alternatiivkütuseid ega kavatseda seda ka lähitulevikus teha. Endiste liiduvabariikide kütusevajadused kaeti fossiilsete kütustega. Ka täna tuuakse Eestisse olulisel määral Euroopa Liidu standarditele mittevastavat kütust. Viitamata ei saa jätta ka faktile, et Venemaa masinaehitusturu lähedus mõjutab meie kütuseturgu. Venemaa põllundustehnika suhteline odavus soosib Eesti farmereid hankima ja kasutama Venemaal toodetud masinaid. Eestis on hetkel kasutuses olevatest traktoritest ca 82% toodetud SRÜ-s. Samas on nende traktorite valmistuskvaliteet väga kõrv.

Uurimistöö eesmärgiks püstitati võimalikult madala kontsentratsiooniga etanoolisegu väljatöötamine ja selle kasutamine mootori lisandkütusena. Ajendiks oli inus-

tada farmereid tootma kohalikke alternatiivkütuseid ilma rektifitseerimis- ja segamisprotsesse kasutamata. Täiendavalt uuriti võimalusi, kuidas minimaalsete kulutustega kohandada enamlevinud põllumajanduslik traktor ümber etanoolkütuste kasutamiseks. Uurimise alla võeti etanoolisegud kontsentratsioonidega 90%, 80%, 70% ja 60%.

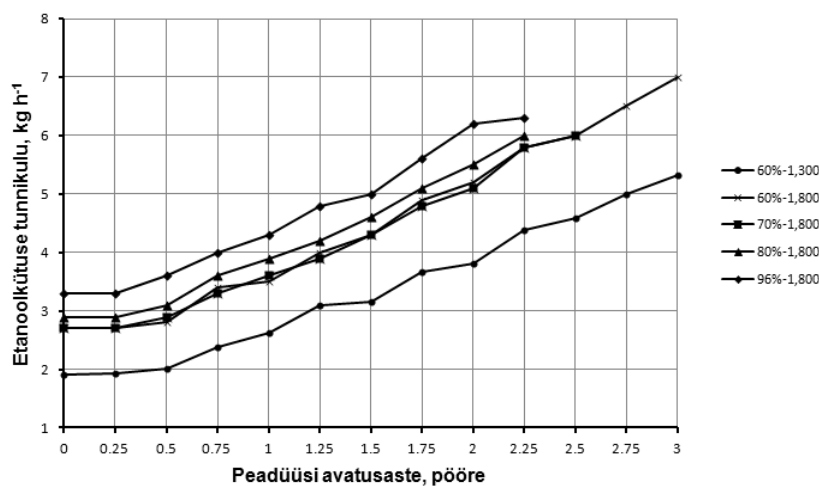
Etanoolkütuse manustamiseks kasutati karburatsiooni tekitavat lisaseadet, mis ühendati mootori sisse-laskekolektoriga. Antud meetodil saab kütust manustada sisselaskeklapi avatusperioodil. Mootori põlemisprotsessi toimimiseks vajalikku tsükletteade kogust (piloopritse) muudeti standardse toiteaparatuuri abil. Viimase ülesanne on käivitada mootor ja tagada põlemisajastus sõltuvalt mootori töörežiimist. Edasise mootori töörežiimide juhtimise tagab operaator etanoolisegu lisamisega. Katsemootori küttesegu koosnes summaarselt järgmistest komponentidest: diiselmootor, etanool, õhk ja vesi.

## Tulemused ja arutelu

### Diiselmootori etanoolkütuse valik

Uurimuse eesmärgil viidi läbi seeria katsetusi 60%, 70%, 80% ja 90%-se kontsentratsiooniga etanoolkütusega. Katsete käigus mõõdeti põhilised mootori väljundparameetrid, vastavad indikaatoridogrammide ja heitgaaside koostised. Katsetingimused olid: vāntvōlli pōrlemis-sagedus vastas nimipōrlemis-sagedusele ( $n_{e,nom}$ ); pritsemoment vastas nimimomendile ( $\alpha_{i,nom}$ ); mootori pōrdemoment ( $T_e$ ) oli konstantne; regulaatorihoova ja hammaslati asendid varieerusid. Katse käigus muudeti etanoolkütuse pealeandmise kogust. Katsetulemused on esitatud joonistel 1...3.

Jooniselt 1 nähtub, et karburatsiooni tekitava seadme peadüüsi tootlikkus sõltub etanoolkütuse kontsentratsioonist ja mootori vāntvōlli pōrlemis-sagedusest. Etanoolkütuse tunnikulu ja peadüüsi avatusastme vaheline funktsionaalne seos on ligikaudu lineaarse sõltuvusega.



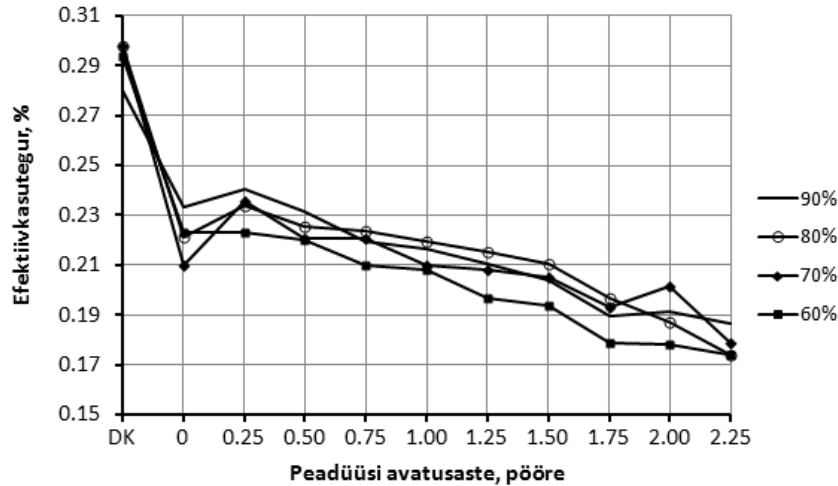
**Joonis 1.** Etanoolkütuste tunnikulu sõltuvus peadüüsi avatusastmest, valmistamise kontsentratsioonist ja vāntvōlli pōrlemis-sagedusest ( $n_e = 1,300...1,800 \text{ min}^{-1}$ )

**Figure 1.** Fuel consumption depending on main metering jet opening ratio by different ethanol fuel concentration (60...96%) and crankshaft rotational speed ( $n_e = 1,300...1,800 \text{ rpm}$ )

Mootori väljundparameetrite analüüsi põhjal saab teha järgmised järeldused (joonis 2, 3):

1) mootori efektiivkasutegur sõltub etanoolkütuse kontsentratsioonist;

2) mootori kasutegur väheneb etanoolkütuse kasutamisel võrreldes diislikütusega kuni 30%;  
3) 90% etanoolkütus suurendab mootoritöö efektiivsust võrreldes 60% etanoolkütusega 6...8%.



**Joonis 2.** Mootori efektiivkasuteguri sõltuvus etanoolkütuse kontsentratsioonist ja peadüüsi avatusastmest nimikoormusel (DK – diislikütus)

**Figure 2.** Effect between the actual efficiency and opening ratio of main metering jet by different ethanol fuel concentration on the mode of nominal rotational speed (DK – diesel fuel)

60% etanoolkütuse kasutamise analüüsi põhjal saab teha järgmised järeldused:

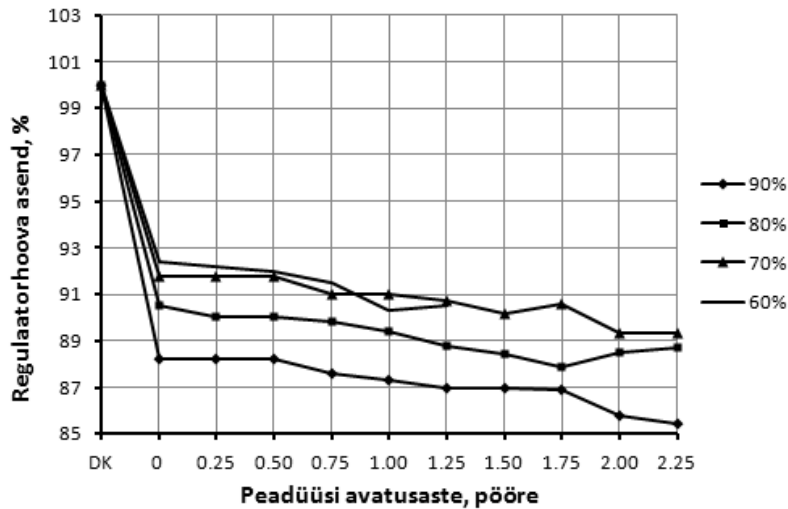
- 1) 60% -list etanoolkütust võib diislikütusele lisada kuni  $3...4 \text{ kg h}^{-1}$ ;
- 2) lühiajalise ülekoormuse korral võib vastavat kütust lisada kuni  $5 \text{ kg h}^{-1}$ ;
- 3) etanoolkütuse lisamisel  $5.5 \text{ kg h}^{-1}$  ja rohkem langeb mootoritöö efektiivsus järsult: põlemisprotsess muutub hilisemaks 14...16 vändvõlli pöördnurga kraadi ja põlemisprotsessi lõpprõhk väiksemaks 10...12 bar.

Ülejäänud, s.o 70%, 80% ja 90% kontsentratsiooniga etanoolkütuste kasutamise kohta saab teha järgmised järeldused:

- 1) kõikide eespool nimetatud etanoolkütuste pealeandmine kuni  $2.5 \text{ kg h}^{-1}$  lisaks põhikütusele ei muuda praktiliselt mootori D-120 põlemisprotsessi algarvmeid ( $p_{z,max} = 50 \text{ bar}$  ja  $\alpha_{pz,max} = 10^\circ$ );
- 2) mida suurem on etanoolkütuse kontsentratsioon, seda suurem on selle tunnikulu;

- 3) 80% ja 90%-lise kontsentratsiooniga etanoolkütuste kasutamisel on indikaatorrõhu muutuse kiirus  $\Delta p \Delta \alpha^{-1}$  suurem ja põlemisprotsessi II faas püsivam kui 60% ja 70% etanoolkütuste kasutamisel;
- 4) seevastu on madalama kontsentratsiooniga etanoolkütuse põlemisprotsessi rõhutõus laugjam, mis lubab vastava kütuse suuremakoguselise kasutamist, ilma et mootoritöö oluliselt halveneks (joonis 3);
- 5) samas 90%-lise etanoolkütuse lisamisel koguses  $5.5 \text{ kg h}^{-1}$  ja rohkem põlemisprotsessi lõpprõhk väheneb 13 bar ning põlemisprotsess muutub hilisemaks kuni 10 kraadi.

Etanoolkütuste kasutamisel on vaja teada toiteaparatuuri väljastatud pilootpritse kogust, mida mootor saab konkreetsetel koormusrežiimil. Selleks kasutati kõrgrõhupumba reguleerimiskarakteristiku andmeid, mis on esitatud tabelis 1. Katsemootori maksimaalne koormusrežiim on  $n_e = 1,300 \text{ min}^{-1}$ , mis vastab kõrgrõhupumba kiirus-režiimile  $n_p = 650 \text{ min}^{-1}$ .



**Joonis 3.** Regulaatorhoova asendi sõltuvus seadme peadüüsi avatusastmest erinevate etanoolkütuste kasutamisel ja väntvõlli nimipöörlemissagedusel

**Figure 3.** The effect between opening ratio of the governor level and opening ratio of main metering jet by different ethanol fuel concentration on the mode of nominal rotational speed

**Tabel 1.** Kõrgrõhupumba tsüklietteande sõltuvus hammaslati asendist ja pumba nukkvõlli pöörlemissagedusest

**Table 1.** The effect of camshaft rotational speed and position of control rack to pump fuel delivery

Nukkvõlli pöörlemis- sagedus ( $\text{min}^{-1}$ )	Hammaslati asend (mm) ja sellele vastav tsüklietteanne ( $\text{mm}^3$ tsükkel $^{-1}$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0	6.3	17.5	25.0	37.5	50.0	65.0	85.0	105.0
500	0	6.0	18.0	31.0	40.0	54.0	67.0	84.0	101.0
600	0	8.0	19.7	34.1	44.3	57.0	72.1	86	102.7
650	0	9.0	20.6	35.6	46.5	58.5	74.6	87	103.5
700	0	10.0	21.4	37.1	48.6	60.0	77.1	87.9	104.3
800	0	12.2	23.9	37.5	49.0	60.9	76.4	88.4	105
900	0	14.4	23.3	37.8	49.4	61.7	75.6	88.9	105.6
970	1.6	12.9	23.2	38.1	50.5	60.8	73.2	88.7	106.2

## Heitgaaside analüüsitulemused

### Segukoostistegur

Diiselmootorites toimub kvalitatiivne segumoodustus. Segukoostistegur ( $\lambda_a$ ) väljendab ühe kilogrammi kütuse põlemisest tegelikult osavõtva õhukoguse ( $V_{O2,teg}$ ) ja teoreetiliselt selleks vajamineva õhukoguse ( $V_{O2,teor}$ ) suhet.

$$\lambda_a = \frac{V_{O2,teg}}{V_{O2,teor}} = \frac{B_{a,teg}}{(B_{a,teor} \cdot B_f)} = \frac{B_{a,teg}}{(14.5 \cdot B_f)}$$

Õhu kogus, mis võtab osa ühe kilogrammi kütuse põlemisest mootori silindris, on tegelik õhukogus ( $B_{a,teg}$ ). Mootori töötamisel võivad tegelik ja teoreetiliselt vajalik õhukogus ( $B_{a,teor}$ ) olla järgmistes vahekordades:

$$B_{a,teg} \leq B_{a,teor}, \text{ siis } \lambda_a \leq 1;$$

$$B_{a,teg} = B_{a,teor}, \text{ siis } \lambda_a = 1;$$

$$B_{a,teg} \geq B_{a,teor}, \text{ siis } \lambda_a \geq 1.$$

Koormuskarakteristiku korral, kus mootori pöörlemis- sagedus on püsiv muutub tarvitata õhukogus vähe ja võimsuse reguleerimine toimub  $B_f$  muutmise teel. Seega

muutub  $\lambda_a$  laias diapsoonis. Värske küttesegu ( $M_{vk}$ ) kogus moolides määratakse järgmise valemiga:

$$M_{vk} = \lambda_a \cdot V_{O2,teor} + \frac{1}{\mu_k},$$

kus  $\mu_k$  – kütuse aurude molekulaarmass ( $\mu_{k,diiselküte} = 180 \dots 200 \text{ kg kmol}^{-1}$ ). Arvestades suhtarvu 1  $\mu_k^{-1}$  väiksust, võime värske küttesegu hulga määrata seosega:

$$M_{vk} = \lambda_a \cdot V_{O2,teor}.$$

Kütuse-õhusegu põlemisproduktide koostis ja maht kilomoolides ( $M_r$ ) on võrdne:

$$M_r = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{HC} + M_{N_2} + M_{H_2} + M_{O_2}.$$

Kiirekäigulise diiselmootori nimirežiimil on segukoostisteguri väärtused piirides 1.3...2.3 (Merker *et al.*, 2004). Väiksemad segukoostisteguri väärtused vastavad forsseeritud diiselmootoritele, mis eristuvad teistest mootoritest väiksema õhuerikuluga. Samas väiksemad  $\lambda_a$  väärtused saavutatakse suurematel koormusrežiimidel, kus esineb kütuse keemiliselt mittetäielik

põlemine. Sellega kaasneb CO, põlemisgaaside temperatuuri tõus ja vaatamata vähesel hapniku hulgal küttesegus ka NO<sub>x</sub> hulga suurenemine. Lubatud  $\lambda_a$  piirväärtus regulaatorarakteristiku alusel nimirõõrlemissagedusel on  $\lambda_{a,nom} = 2.78$ .

Segukoostisteguri mõõtmistulemused 60% etanoolkütuse korral: koormusrežiimi kasvades segukoostistegur väheneb kuni kaks korda. Peadüüsi ristlõikeava suurenedes ( $B_{f,et}$  kasvab) segukoostistegur väheneb kuni 25%. Katseandmetest nähtub, et  $\lambda_a$  parameeter ei sea piire etanoolkoguse kasutamise hulgal. Pigem on tendents segukoostisteguri väärtuse kahanemisele etanoolihulga kasvades küttesegus. Katseandmete alusel saab teha segukoostisteguri mõjust heitgaaside koostise kohta järgmised järeldused:

- CO on kõige väiksem piirkonnas, kus  $\lambda_a = 1.4 \dots 2.0$ ;
- $\lambda_a$  muutumisel CO kasvab kiiresti;
- NO<sub>x</sub> ja CO<sub>2</sub> väärtused on maksimaalsed piirkonnas, kus  $\lambda_a = 1.4 \dots 2.0$ ;
- $\lambda_a$  vähenedes HC väheneb monotoonset;
- soovitatav mootori töörežiim on nimirõõim, seal eraldub vähem CO ja HC;
- heitgaaside koostist mõjutavad kõige rohkem mootori tühikäigu-, ülekoormus- ja kiirendusrežiimid.

### Vingugaas

Vingugaas (CO) on värvitu, lõhnatu ja maitsetu gaas ning sissehingamisel mürgine. Kopsudes ühineb verega ja takistab hapniku absorbeerumist. Kõrge vingugaasisaldus õhus põhjustab teadvuse kaotuse ning surma. Vingugaas põleb hästi, tema tihedus on õhuga võrreldes 0.97. Vingugaasi maht põlemisprotsessi keskstaadiumis moodustab 1...6% põlemiskambri mahust. Väljalaskeprotsessi alguseks muutub vingugaasi põhimass süsinikoksiidiks. Vingugaasi täielikku oksüdeerimist silindris takistab hapniku puudujääk ja põlemiskiiruse langus. Sõltuvalt mootori konstruktsioonist, selle tehnilisest seisukorrast ja mootori töörežiimist võib CO kontsentratsioon heitgaasides muutuda piirides 0.001...1%. Tootmishoonetes on CO lubatud piirkontsentratsioon 0.02 mg l<sup>-1</sup> või 0.0016%.

Järgmised katsetulemused on esitatud 60% etanoolkütuse kasutamise kohta. Koormusrežiimi kasvamisest kõikide peadüüsi avatusastmete korral CO hulk heitgaasides väheneb. Ilmekas seos kehtib etanooli tunnikulu  $B_{f,et} = 3.0$  kg h<sup>-1</sup> ja rohkem korral, kus CO sisaldus heitgaasides erinevatel režiimidel erineb kuni 41%. Samas konkreetset koormusrežiimil etanooli tunnikulu suurenedes kasvab CO kogus heitgaasides monotoonset. Koormusrežiimil, kus  $V_f = 35.6$  mm<sup>3</sup> tsükli<sup>-1</sup> oli CO koguse erinevus peadüüsi alg- ja lõppavatusel korral heitgaasides 0.059 mahu% (24%).

### Süsinikdioksiid

Süsinikdioksiid (CO<sub>2</sub>) on värvitu nõrgalt kirbe lõhnaga ja mitte mürgine gaas. Õhu ja kütuse põlemisel tekib CO<sub>2</sub> tõuseb atmosfääri ja moodustab ümber maakera süsinikdioksiidi kihi. Maakeralt peegelduv soojus ei suuda läbida atmosfääris olevat süsinikdioksiidivööd, mistõttu koos päikesekiirgusega liituv soojushulk tõstab maakera keskmist temperatuuri. Teatud kriitilise CO<sub>2</sub>

mahu korral atmosfääris võib tekkida maakeral kasvuhoone efekt. Seetõttu on oluline, et mootorite poolt õhku paisatav CO<sub>2</sub> ei omaks kasvatendentsi.

Järgmised katsetulemused on esitatud 60% etanoolkütuse kasutamise kohta. Koormusrežiimide kasvamisest ( $V_f = 20.6$ ; 35.6 ja 46.5 mm<sup>3</sup> tsükli<sup>-1</sup>) ja erinevate peadüüsi avatusastmete korral CO<sub>2</sub> hulk heitgaasides kasvab. Ilmekas seos kehtib etanooli tunnikulu  $B_{f,et} = 3.0$  kg h<sup>-1</sup> korral, kus vastav erinevus ulatub kuni 4.16 mahu% (57%). Konkreetset koormusrežiimil etanoolkütuse tunnikulu suurenedes kasvab ka CO<sub>2</sub> kogus heitgaasides. Koormusrežiimil, kus  $V_f = 46.5$  mm<sup>3</sup> tsükli<sup>-1</sup> oli CO<sub>2</sub> koguse erinevus peadüüsi alg- ja lõppavatusel korral heitgaasides kuni 2.65 mahu% (28%).

### Süivesinikud

Heitgaasid sisaldavad eri liike süivesinikuühendite (HC), mis on üldjuhul tervisele ohutud ja mille organism ära tarvitab. Samas esineb süivesinike hulgas ühendeid, mis on mürgised, vähkitekivad, silma-kurgu limaskestast ärritavad. Suur kogus süivesinikke õhus põhjustab happevihmu ja fotokeemilist sudu. Mootori heitgaasides olevate HC-de hulk on normeeritud.

Katsetulemused 60% etanoolkütusega näitavad, et väikestel koormustel, kus pilootpritsse kogus on väike, esineb küttesegu mittetäielik põlemine ja HC hulk heitgaasides kasvab. Kõrgematel koormusrežiimidel, kus pilootpritsse kogus on suurem, väheneb HC hulk heitgaasides monotoonset, sõltumata etanoolkütuse tunnikulu kasvamisest.

### Hapnik

Hapnik (O<sub>2</sub>) on värvusetu, lõhnatu ja maitsetu õhust raskem gaas, mis vees lahustub halvasti. Hapnik on tugev oksüdeerija, oksüdeerides lihtaineid ja ühendite koostisesse kuuluvaid elemente oksiidideks. Lihtainena leidub hapnikku õhus, kus teda sisaldub mahu järgi 21% (1/5) ja massi järgi 23%. Diislikütuses hapnik praktiliselt puudub. Etanoolkütuses ja õhus olev hapnik liituvad diislikütusega silindris küttesegu moodustamisel.

### Lämmastikoksiidid

Põlemisprotsessi kõrgete temperatuuride juures tekib lämmastikdioksiid (NO<sub>2</sub>). Nimetatud gaas on redisepruuni värviga, mürgise lõhnaga ja vees raskesti lahustuv. Sissehingamisel võib kahjustada kopsukudesid. NO<sub>2</sub> tihedus õhus võrreldes on 1.58. NO<sub>2</sub> hulk diiselmootori heitgaasides muutub piirides 0.001...0.2%. Lubatud NO<sub>2</sub> hulk õhus, arvutades ümber N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kujul, ja selle kontsentratsioon võib olla kuni 0.005 mg liitri<sup>-1</sup> kohta ehk 0.0001%. Lämmastikoksiidid veega ühinedes tekitavad happevihmasid, mis on aga lahjendatud lämmastikhape ning põhiliselt kahjutu loodusele. Teatud kontsentratsiooni, kõrguse, niiskuse ja päikesekiirguse juures lämmastikoksiidid ja süivesinikud moodustavad sudu. Lahja küttesegu ja kõrge temperatuuri juures töötavate mootoritega võib õhku paisata piisavalt suure koguse lämmastikoksiide, mis võivad atmosfääris esile kutsuda happevihmasid.

Katsetulemused 60% etanoolkütusega näitavad, et väikestel koormusrežiimidel töötaval mootoril NO<sub>x</sub> sisal-

dus heitgaasides on stabiilne ja kuni 10 korda väiksem lubatud piiridest. Suurtel koormustel lämmastikoksiidi hulk heitgaasides kasvab kuni 650 mahu ppm-ni, kuid ei ületa heitgaasides ettenähtud piirväärtusi.

### Diiselmootori suitsusus

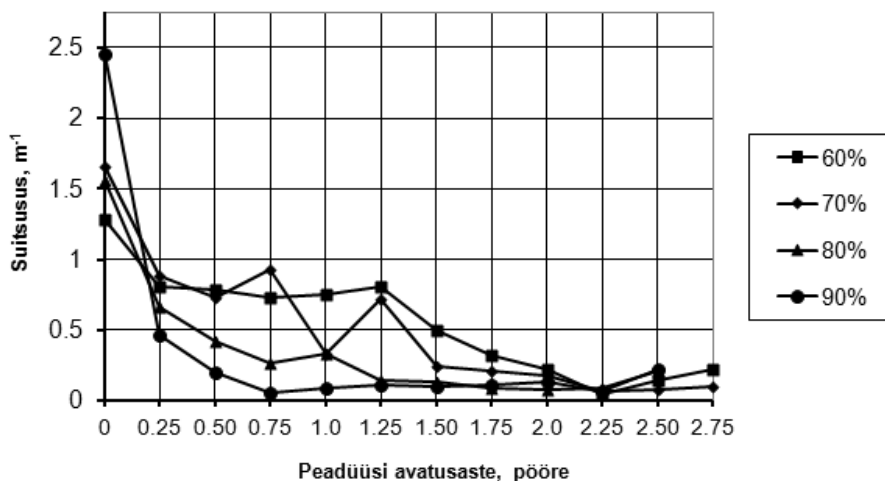
Suitsusus on tingitud heitgaasides olevate üliväikeste tahke süsiniku (tahm = nõgi) osakeste kaalutud olekus, mis tekivad diiselmootori pürolüüsil põlemisprotsessis. Põlemisprotsessis toimuvad paralleelselt tahma tekkimine ja selle väljapõletamine. Hästi ettevalmistatud küttesegu kiirel põlemisel algab kohe pärast selle süttimist intensiivne tahma moodustamine. See protsess toimub kiiremini kui väljapõletamine. Järgnevas põlemisprotsessi arengus hakkab tahma väljapõletamine domineerima selle tekkeprotsessi üle. Viimase kütseportsjoni põlemisprotsessis tahma tekkimine lõpeb ja selle väljapõletamine jätkub kuni vahetult väljalaskeklapi avamiseni. Silindris väljalaskeprotsessi algul tahma tekkeprotsessi suurust saab hinnata diiselmootori heitgaaside suitsuse taseme järgi. Küttesegu turbulentsiooni intensiivistamisega on võimalik lisada põlemiskolletesse hapnikku. Selle tulemusena väheneb tahma tekkimise protsess ja suureneb ajalisel mõõtmel tahma väljapõletamisprotsess. Põlemisprotsessis tekiv leegi maksimaalne temperatuur ületab olulisel määral heitgaaside maksimaalset temperatuuri (Pulkrabek,

2009). Leegi temperatuur saavutab maksimaalse väärtuse ca 14...16 kraadi peale ÜSSI. Järgneva 50 vändvõlli pöördnurga kraadi jooksul leegi temperatuur praktiliselt ei muutu.

Faktorid, mis mõjutavad heitgaaside koostist ja suitsust diiselmootori tööprotsessis, võib jaotada kolme rühma: a) konstruktiivsed faktorid (seotud mootori ehitusega ja eksploatatsioonis muuta ei saa); b) eksploatatsioonilised faktorid ja reguleeringud; c) mootori eksploatatsioonilise kvaliteet (kütus, õlid, tehnohoolded järjepidevus, töörežiimide jälgimine, jms). Heitgaaside koostist mõjutavad oluliselt:

- mootori SKG kulumine ja dehermeetilisuse kasv;
- õhufiltri mustumine ja sellest tingitud alarõhu muutumine sisselaskeprotsessis;
- nõgi ja tagi ladestumine silindri-kolvigrupi detailidele;
- gaasijaotusfaaside muutumine;
- toiteaparatuuri reguleeringu muutumine;
- õhulaengu tihedus;
- väljalaskeüsteemi takistuse muutus;
- sisseimetava õhu koostis ja eeljahutus.

Mootorite laboris läbiviidud katsetulemused, kus küttesegu moodustus diisli- ja etanoolkütusest, on esitatud joonisel 4.



**Joonis 4.** Etanoolkütuse tunnikulu mõju mootori heitgaaside suitsusele sõltuvalt selle kontsentratsioonist

**Figure 4.** Impact of the ethanol fuel consumption on the opacities of exhaust gases depending on its concentration

Jooniselt 4 selgub, et heitgaaside suitsusus sõltub etanoolkütuse kontsentratsioonist ja selle pealeandmise kogusest. Mida kõrgem on etanoolkütuse kontsentratsioon, seda väiksem on heitgaaside suitsusus. Selline

seaduspärasus kehtib etanoolkütuse pealeandmise koguse juures kuni  $\alpha_j = 2.25$  pööret, mis vastab etanoolkütuse tunnikulule  $B_{f,et} = 2.5 \text{ kg h}^{-1}$ .

### Järeldused

Uurimistöö eesmärk oli välja töötada minimaalse kontsentratsiooniga etanoolkütus, millega diiselmootor töötab rahuldavalt ja selle diagnostilised parameetrid ei välju valmistajatehase kehtestatud piirnormidest.

Läbiviidud uurimistöö tulemused on alljärgnevad.

1. Etanoolkütuse kasutamisel tuleb säilitada standardne toiteaparatuur, millega tagatakse pilootpritse manustamine ja ajastus.
2. Etanoolkütuse pealeandmiseks tuleb kasutada karburatsiooni tekitavat seadet.
3. Diiselmootor D-120 töötab laboratoorses tingimustes rahuldavalt 60% etanoolkütusega.
4. Mootori efektiivkasutegur sõltub etanoolkütuse kontsentratsioonist.
5. 60% etanoolkütust võib kasutada lisaks standardsele diislikütusele kuni  $4 \text{ kg h}^{-1}$ .
6. 70%, 80% ja 90% kontsentratsiooniga etanoolkütuste pealeandmine kuni  $2.5 \text{ kg h}^{-1}$  lisaks põhkütusele ei muuda praktiliselt mootori D-120 põlemisprotsessi algsuureid.
7. Heitgaaside suitsusus sõltub etanoolkütuse kontsentratsioonist ja selle pealeandmise kogusest. Mida kõrgem on etanoolkütuse kontsentratsioon, seda väiksem on heitgaaside suitsusus.

### Kirjandus

- Bialkowski, M. T. 2009. Theoretical and Experimental Investigation of a CDI Injection System Operating on Neat Repesed Oil – Feasibility and Operational Studies – Submitted for the degree of philosophy on completion of research in the School of Engineering and Physical Sciences, *Chemical Engineering*, Heriot-Watt University, The United Kingdom. 423 p.
- Demirbas, A. 2006. Global biofuel strategies – *Energy and Education Science Tehnology*, Turkey. 336 p.
- Merker, G., Schwarz, Ch., Stiesch, G., Otto F. 2004. Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung, Auflage 2. Wiesbaden. 412 p.
- Pulkrabek, W. W. 2009. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Prentice Hall. USA. 411 p.

### Motor method evaluation of fuel-air mixtures created by using qualitative and quantitative methods

Jüri Olt, Villu Mikita, Risto Ilves, Arne Küüt

#### Summary

The purpose of this study was to find minimum concentration of bioethanol mixture, which allows satisfactory engine operation in the overload area of test plan. Ethanol fuels EF 90; EF 80; EF 70 and EF 60 were used for performing by engine testing. The analysis of combustion process in the engine indicates that introduction of different fuels in combustion process by qualitative and quantitative method is acceptable in technical terms. This was also proved by the engine testing performed with test engine D-120. After medium long test cycle with addition of bioethanol to the fuel the engine indicators or cylinder pressure did not deteriorate. The tests revealed that ethanol fuel EF 60% works well as additional fuel and it does not cause significant deterioration of the values of engine output parameters. Production of ethanol as local biofuel is relatively inexpensive and the technology used for production is quite simple. In technological terms, nowadays any farmer can manage producing up to 70% ethanol. Elementary carburettor is all that is necessary for adjusting the engine for ethanol fuel. Ethanol fuel consumption was changed by the extent of opening ratio of main metering jet. In the framework of follow-up research on this subject field tests shall be carried out with diesel engine D-120 in summer, in the course of which common control system for both delivery systems shall be developed. Using ethanol motor fuel enhances energy security and reduces environmental pollution. The concentration of exhaust gas components such as CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> as well as the value of smoke in exhaust gas were significantly reduced when using ethanol fuel. The proportion of hydrocarbons, however, was increased. This may be due to reduced efficiency of combustion process. This issue shall be subject to follow-up research. As far as the selection of ethanol fuel is concerned, 60% fuel does not cause significant deterioration of engine operation or increase the amount of other hazardous compounds in exhaust gases. It is recommended to use a 60% ethanol fuel as minimum concentration in addition to regular diesel fuel so that the ethanol fuel would comprise up to 60% of the entire fuel amount used by medium load of engine.