

BIOETANOL OTTOMOOTORI KÜTUSENA

J. Olt, V. Mikita, T. Sõõro, A. Küüt, R. Tamm, E. Raidla, R. Ilves, K. Ritslaid,
V. Raudsepp, U. Viitkar

Eesti Maaülikool, Eesti Lennuakadeemia

ABSTRACT. *Bioethanol as a Fuel in Spark-ignition Engine.* Due to the limited oil resources and growing environmental pollution mainly, using bioethanol as an alternative fuel in spark-ignition engines is becoming more and more topical. Insufficient information about the power and economy characteristics of biofuel or biofuel additive engines has given an impact to test these qualities. In the present research it has been studied how bioethanol as engine fuel and fuel additive influences a spark-ignition engine power, torque, fuel consumption and composition of exhaust gas. The main results of the study have been outlined in the article.

Keywords: *biofuels, bioethanol, spark-ignition engine, power, torque, specific fuel consumption*

Sissejuhatus

Etanooli on kasutatud ottomootori kütusena juba autoehituse algusaegadest. Esimeseks kommertssõidukiks, mille kütuseks võis kasutada kas bensiini, petrooleumi või etanooli, oli teatavasti 1908. aastal ehitatud auto Ford T. Bensiini hinna langus ning alkoholi tarbimise piiramine Ameerika Ühendriikides 1919. aastal muutsid etanooli kasutamise mootorikütusena ebaotstarbekaks (Biomassi, 2008; Ford, 2009).

Etanooli on väikeste kogustena kasutatud hiljem bensiini lisandina (5–10%) kütuseturust sõltuvuse vähendamiseks ja bensiini detonatsioonikindluse suurendamiseks.

1970. aastate energiakriis andis olulise tõuke alternatiivkütuste otsingule ja kasutuselevõtule. Brasiilias võeti valitsuse toel 1970. aastatel ulatuslikult kasutusele suhkruroost toodetud odava etanooli ja bensiini segu – gasohol (10% etanooli ja 90% bensiini). Praeguseks on Brasiilias etanooli sisaldust etanoolilisandiga kütustes suurendatud kuni 25%-ni. Üle 10%-lise etanoolisisaldusega kütuse kasutamisel on mootorihitajad pidanud kohandama sõidukite mootorid etanooli sisaldavale kütusele (Common, 2009). Brasiilias on 1970. aastate lõpust alates kasutatud mootorikütusena ka puhast etanooli selleks projekteeritud mootoriga sõidukitel.

Tehniliselt kõrgtasemel väljaarendatud sise põlemismootorid ja mootorikütuste ülimalt efektiivne tootmine naftast on kaasa aidanud maailma motoriseerumisele. Seetõttu on kasvanud nõudlus mootorikütuste järele ja keskkonna saastatus. Kui siia lisada naftavarude piiratus ja kütuste hinnatõus, siis on mootorikütustega seotud piisavalt palju probleeme, mis kõik on sundinud otsima alternatiivkütuseid.

Taastoodetava tooraine tõttu on kõige lootustandvamateks alternatiivseteks mootorikütusteks osutunud biokütused. Biokütustel on lisaks taastoodetavale toorainele teisigi positiivseid külgi võrreldes naftast toodetud kütustega. Kuna taimed tarvitavad süsihappegaasi, tekib biokütuste tootmise ja tarbimise tsüklis süsihappegaasi ringlus, mis vähendab atmosfääri paisatava süsihappegaasi hulka. Biokütused on väävlivabad. Biokütuste kasutamisel on mootorite heitgaasid puhtamad ja väheneb keskkonna saastamine heitgaaside mürgiste komponentidega (CO, HC ja NO_x).

Kõige levinum biokütus – bioetanool – moodustab üle 90% kasutatavatest vedelatest biokütustest (Biomassi, 2008). Suurimad bioetanooli tootjad on Brasiilia ja Ameerika Ühendriigid. Euroopas hakati biokütustele suuremat tähelepanu pöörama 2001. aastast alates. Kuni selle ajani oli nafta hind olnud suhteliselt stabiilne. Biokütuste tootmine on üldiselt energiamahukas. Seetõttu on biokütuste hind kõrgem traditsiooniliste, naftast toodetud mootorikütuste hinnast. Esialgu pole biokütused konkurentsivõimelised ilma riikliku toetuseta (maksusoodustusteta). Siiski kasutatakse biokütust kogu maailmas aina rohkem.

Võtmesõnad: biokütus, etanool, ottomootor, võimsus, pöördemoment, kütuse erikulu

Uurimismaterjal

Kuna etanooli on vähem või rohkem kasutatud mootorikütusena juba pikka aega, siis on omandatud kogemusi etanooli kui mootorikütuse kohta. Etanoolist on üldiselt teada, et see on kõrge oktaaniarvuga ja suure detonatsioonikindlusega kütus (tabel 1). Bioetanooli bensiinist suurem oktaaniarv võimaldab tõsta mootori surveastet, mis parandab mootori võimsuslikke ja ökonoomsuslikke omadusi.

Etanooli kütteväärtus on vaid 69% bensiini kütteväärtusest. Madalama kütteväärtuse tõttu on etanooli kasutamisel kütusekulu suurem kui bensiini puhul.

Etanoolis sisalduv hapnik, etanooli väiksem energiasisaldus ja suurem kütusetarve põhjustavad võrreldes bensiiniga etanooli madalama põlemistemperatuuri mootori silindris. Et etanool sisaldab ka hapnikku, siis toimub põlemine täielikumalt ning väheneb CO, HC ja NO_x emissioon.

Tabel 1. Bioetanooli ja bensiini olulisemad omadused (Biomassi, 2008)**Table 1.** The most important characteristics of bioethanol and petrol (Biomassi, 2008)

Kütuse omadus	Bensiin	Bioetanool
Molekulkaal, $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$	111	46
Tihedus, 15 °C, $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	0,75	0,80–0,82
Hapnikusisaldus, massi %	–	34,8
Kütteväärtus, $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	41,3	26,4
Aurumissoojus, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	180	930
Oktaaniarv (RON)	97	120
Oktaaniarv (MON)	86	102
Stõhhiomeetriline õhu ja kütuse suhe ($m_{\text{õhk}}\cdot m_{\text{kütus}}^{-1}$), kg	14,7	9,0

Etanool põhjustab korrosiooni ja lagundab kummi- ja plastidetaile. Suure etanoolisisaldusega kütuste korral tuleb mootoriehitusel kasutada korrosioonikindlaid materjale (roostevaba teras) ning suure floorisisaldusega plastikuid.

Kuna etanooli on bensiinist enam kui viis korda suurem aurustumissoojus, võib tekkida raskusi mootori käivitamisel, eriti jaheda ilmaga.

Väikese etanoolisisaldusega etanooli ja bensiini segu (5–10% etanooli) saab kasutada tavalises ottomootoris ilma mootorit ümber seadistamata. Suurem etanoolisisaldus kütuses (üle 10% etanooli) nõuab mootori kohandamist, suure etanoolisisaldusega kütust (üle 25% etanooli) saab kasutada vaid selle kütuse tarvis spetsiaalselt konstrueeritud mootoris. Enamus autotootjaid lubab kasutada kuni 10% etanoolisisaldusega kütuseid tavautodel ilma mootoreid ümberseadistamata.

Niinimetatud paindliku kütusekasutusega autodel (*flexible-fuel vehicle*) võib kasutada nii bensiini, etanooli kui nende segusid. Paindliku kütusekasutusega autosid kasutatakse kõige enam USA-s, Brasiilias ja Rootsis. Tänapäevaks on paindliku kütusekasutusega autosid kasutusel juba üle 6 miljoni.

Kui etanoolisisaldus bensiinis on 5% või enam, siis tähistatakse kütus tähega E, mille järel olev arv osutab etanooli sisaldust kütuses mahuprotsentides (Common, 2009).

Kütused E5 ja E10 leiavad laialdast kasutamist Ameerika Ühendriikides. Kütused E20 ja E25 on levinud Brasiilias alates 1970. aastatest. Kütused E20 ja E25 nõuavad mootori seadistamist etanooli sisaldava kütuse jaoks. Kütustele E20 ja E25 kohandatud automootorid ei pruugi töötada korralikult madala etanoolisisaldusega kütuse või puhta bensiini kasutamisel. Bensiin ning kütused E5 või E10 võivad põhjustada neil detonatsiooni.

Kütus E85 on kasutusel kõige enam USA-s ja Rootsis. Kütust E85 kasutatakse paindliku kütusekasutusega autodel (*flexible-fuel vehicle*) tavakütusena. Kütused E70 ja E75 on paindliku kütusekasutusega autode talvised kütused. Kütust E70 kasutatakse USA-s külmades piirkondades ja kütust E75 Rootsis külmal aastaajal külmkäivituse probleemide vältimiseks paindliku kütusekasutusega autodel.

Kütus E100 (ei sisalda bensiini, vahel tähistatakse ka E95) on kasutusel Brasiilias seitsmekümnendate aastate lõpust alates etanoolimootoriga sõidukitel ning viimasel ajal paindliku kütusekasutusega sõidukitel.

Praeguseks on kasutusel väga erineva etanoolisisaldusega biokütused. Kuna ei ole piisavalt informatsiooni selle kohta, kuidas mõjutavad erineva etanoolisisaldusega kütused tänapäevase mootori võimekust (mootori poolt arendatavat võimsust ja pöördemomenti), mootori ökonoomsust (mootori kütusekulu, kütuse erikulu) ning heitgaaside puhtust, või on informatsioon kohati vasturääkiv, siis oli käesolevas töös seatud eesmärgiks uurida katseliselt ja võrrelda mootori nimetatud omadusi erineva etanoolisisaldusega kütuste ja bensiini kasutamisel. Samuti oli eesmärgiks püüda hinnata erineva etanoolisisaldusega kütuste kasutamise otstarbekust mootori tööparameetritest lähtudes.

Metoodika

Mootori võimsuslikud ja ökonoomsuslikud näitajad ning heitgaaside puhtuse parameetrid määrati bensiini ja erinevate biokütuste katsetamisel katsemootoril Eesti Maaülikooli ja Eesti Lennuakadeemia mootorite katselaboris.

Uuritavad kütused. Uuritavateks kütusteks olid bensiin 95, bioetanool (96,3% vol) ja bioetanoolkütused E15, E30, E50 ning E85 (joonis 1). Uuritavad bensiin 95 ja kütus E85 olid AS-i Eesti Statoil tanklas müüdivad kütused. Bioetanooli sisaldavad kütused E15, E30 ja E50 segati Eesti Maaülikooli ja Eesti Lennuakadeemia mootorite katselaboris sobiva koguse bensiini lisamisega bioetanoolkütusele E85.

Katsemootor. Katsemootorina kasutati 1998. aasta 4-silindrilist elektroonilise hargprijatega toitesüsteemiga ottomootorit *Audi A4 ADR*. Mootori tehniline karakteristik on esitatud tabelis 2 (Autokataloog, 1996). Et võimaldada katsemootoril töötada bioetanoolkütustega, oli mootori elektroonilisse juhtimissüsteemi mootori juhtploki (ECU) ja pihustite vahelisse ahelasse lülitatud *flexi tune sequential* bioetanooliseade (Flexi, 2009). Bioetanooliseadmel oli ühendus ka λ -andurile. Lisatud bioetanooliseade võimaldab kasutada kütusena bensiini, etanooli ning nende segu igas vahekorras. Bioetanooliseade kompenseerib etanooli madalama energeetilise väärtuse elektrooniliselt juhitavate pihustite pikema lahtiolekuajaga. Sarnast seadet rakendatakse ka pärast 2005. aastat valmistatud *flexible-fuel vehicle* sõidukitel.



Joonis 1. Uuritavad kütused: bensiin 95, bioetanool-kütused E85, E50, E30, E15, bioetanool 96,3% vol
Figure 1. Test fuels: petrol 95, biofuels E85, E50, E30, E15, bioethanol 96.3% vol

OBD-i (*on-board diagnostics*) abil oli ühendatud mootori juhtploki personaalarvuti, mille diagnostikaprogrammiga sai lugeda infot mootori tööparameetrite kohta.

Mootorite katsestend. Mootori Audi A4 ADR koormamiseks kasutati firma *Schenck GmbH* mootorite katsestendi *Dynas3 LI250*. Stendi piduriks on asünkroonmootor, mille pöörlemissagedust muudetakse sagedusmuunduri abil (joonised 2 ja 3). Stendi nimivõimsus $P_n = 250$ kW, nimivoolutugevus $I_n = 390$ A, nimipöörlemissagedus $n_n = 4980$ min⁻¹, pöördemoment nimipöörlemissagedusel $M_n = 480$ N·m (Dynas3, 2009). Katsestendi juhtimiseseadmega (joonis 4) juhtiti katset: käivitati ning seisati katsetatavat mootorit, reguleeriti õhuklapi avatust ning mootori koormust. Katsestendi juhtimiseseadmelt oli võimalik jälgida vääntvõlli pöörlemissagedust n , min⁻¹; mootori pöördemomenti M , N·m; võimsust P , kW ja õhuklapi avatust.

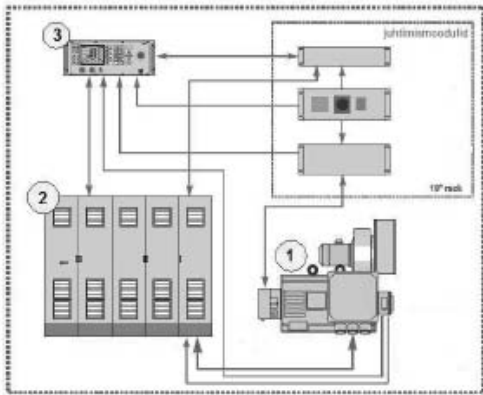
Tabel 2. Audi A4 ADR mootori tehaseandmed (Autokataloog, 1996)

Table 2. The producer's data of Audi A4 ADR engine (Autokataloog, 1996)

Audi A4 ADR	Tehaseandmed
Silindrite arv	4
Silindrite asetus	reasmootor
Töömaht, cm ³	1781
Silindri läbimõõt, mm	81
Kolvikäik, mm	89,4
Surveaste	10,3
Klappe silindri kohta	5
Gaasijaotusmehhanism	DOHC
Nimivõimsus, kW	92
Nimipöörlemissagedus, min ⁻¹	5800
Suurim pöördemoment, Nm	173
Pöörlemissagedus suurima pöördemomendi korral, min ⁻¹	3950
Kütusekulu, l·(100 km) ⁻¹	7,8
Süütesüsteem	Motronic 3.2/Map-DIS
Sissepritsesüsteem	Motronic 3.2/MFI-s
Toitesüsteemi rõhk, bar	4

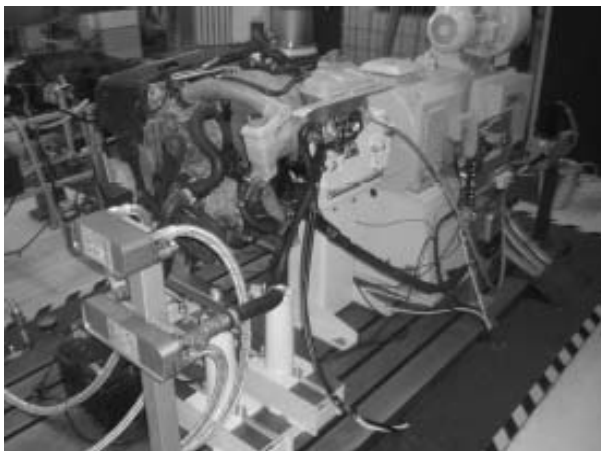
Uuritava kütuse tarvis oli spetsiaalne roostevabast terasest 25 l mahutavusega paak. Paak asub elektroonilisel kaalul. Katsetel kulutatud kütuse kogused määrati elektroonilise kaalu näidu põhjal. Pihustite avatuse aja mõõtmiseks kasutati ostilloskoopi *Tektronix TDS 2022*.

Süsinikdioksiidi (CO₂), süsinikoksiidi (CO), põlemata süsivesinike (HC), lämmastikoksiidide (NO_x) ja hapniku (O₂) sisaldust heitgaasides mõõdeti heitgaaside koostise mõõturiga *Bosch BEA 350*. Lisaks mõõdab nimetatud seade ka mootori õlitemperatuuri, vääntvõlli pöörlemissagedust ning määrab liigõhuteguri (λ).



Joonis 2. Mootorite katsestendi põhiosade skeem: 1 – pidurdusseade pöörlemisageduse ja pöördemomendi anduritega, 2 – sagedusmuundur, 3 – katsestendi juhtimiseseade (Eesti, 2009)

Figure 2. Block diagram of the engine test bench: 1 – AC induction motor with torque and speed acquisition, 2 – variable frequency drive, 3 – test bench controller (Eesti, 2009)



Joonis 3. Mootorite katsestendi Dynas3 LI250 piduriseade katsetatava Audi A4 ADR mootoriga

Figure 3. Engine test bench Dynas3 LI250 and triable Audi A4 ADR engine



Joonis 4. Mootorite katsestendi Dynas3 LI250 juhtimiseseade

Figure 4. Controller of the Dynas3 LI250 test bench

Heitgaaside koostis mõõdetakse tühikäigu pöörlemisagedusel. Katalüüsmuunduriga autodel mõõdetakse heitgaaside koostis lisaks veel pöörlemisagedusel 2000 min^{-1} .

Katsete käik. Reaalselt töötab auto mootor valdavalt keskmise koormusega mootorivõlli keskmistel pöörlemisagedustel ja suhteliselt vähe aega töötab ta nimikoormusega võlli nimipöörlemisagedusel. Mootori võimsuslike ja ökonoomsuslike näitajate ning heitgaaside puhtuse erinevatest kütustest sõltuvuse uurimiseks võeti osalised mootori kiirus- ja koormuskarakteristikud. Eelnevalt võetud tühikäigukarakteristiku põhjal on mootorivõlli pöörlemisagedusel $n = 3950 \text{ min}^{-1}$, mille juures mootor arendab suurimat pöördemomenti, seguklapp avatud 34%. Mootori töö stabiilsuse ja edasiste katsete turvalisuse tagamiseks peeti uurimistöö esimesel etapil otstarbekaks, arvestades mootori jääkressurssi, võtta mootori osaline kiiruskarakteristik õhuklapi 34% avatuse juures. Kiiruskarakteristiku võtmisel suurendati mootori koormust piirini, mil mootor töötas veel stabiilselt. Mootorivõlli pöörlemisageduste vahemikuks kujunes 1350–3950 min^{-1} . Koormuskarakteristiku võtmisel hoiti mootorivõlli pöörlemisagedus konstantne (2900 min^{-1}) ja muudeti õhuklapi avatuse astet piirides 30–70% (intervalliga 5%).

Tulemused ja arutelu

Mootori võimekus. Mootori võimekust kirjeldavad mootori arendatavad võimsus P , kW ja pöördemoment M , Nm. Kui võrrelda katsemootori arendatud võimsust ja pöördemomenti biokütuste kasutamisel mootori arendatud võimsuse ja pöördemomendiga naftast toodetud bensiini kasutamisel, võib märkida järgmist.

Väiksema bioetanooli sisaldusega kütuste (E15, E30) kasutamisel langes mootori võimsus võrreldes bensiini kasutamisel arendatava võimsusega. Katsetatud kütustest andis kütus E30 kõige väiksema võimsuse. Bioetanool (96,3% vol) andis samuti nagu kütus E15 bensiinist väiksema võimsuse. Mootori suurimal koormusel ei erinenud oluliselt kütuse E15 ja bioetanooli kasutamisel mootori poolt arendatav võimsus bensiini kasutamisel arendatavast võimsusest.

Bensiinist suurema võimsuse tagasid katsemootoril kütused E50 ja E85. Suurimal koormusel arendas katsemootor suurimat võimsust kütuse E85 kasutamisel (joonis 5).

Bioetanooli sisaldavate kütuste kasutamisel olid mootori poolt arendatava pöördemomendi muutused võrreldes bensiini kasutamisel arendatava pöördemomendiga sarnased eelkirjeldatud võimsuste muutustega. Kõige väiksemat pöördemomenti arendas katsemootor kütuse E30 kasutamisel. Bioetanooli ja kütuse E15 kasutamisel arendas mootor väiksemat pöördemomenti kui bensiini kasutamisel, välja arvatud mootori töötamisel suure koormusega, mil kütuse E15 ja bioetanooli kasutamisel mootori arendatav pöördemoment ei erinenud bensiini kasutamisel arendatavast pöördemomendist.

Mootor arendas suurimat pöördemomenti kütuste E50 ja E85 kasutamisel. Suurimal koormusel andis suurima pöördemomendi kütus E85 (joonis 5).

Kütused E50 ja E85 tagasid mootori parimad võimsuslikud omadused. Kütuse E50 kasutamisel oli mootori võimsus keskmiselt 8,5% suurem, kui bensiini kasutamisel. Kütus E85 tagas suurimal koormusel 5,6% suurema võimsuse kui bensiin.

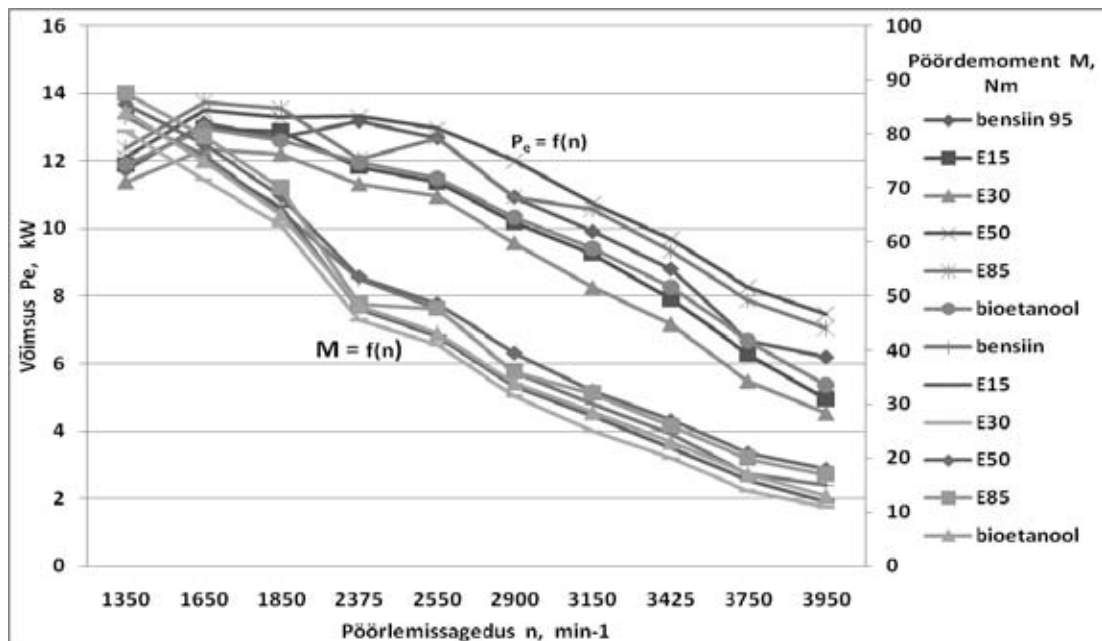
Võimsusest lähtudes oleksid katsemootoril kõige otstarbekamad kütused E50 ja E85. Kõige ebaotstarbekam oleks kütus E30.

Mootori ökonoomsuslikud näitajad. Kütuse tunnikulu B , $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ suurenes kiiruskarakteristiku põhjal enam-vähem proportsionaalselt bioetanooli sisalduse suurenemisega kütuses. Erandiks oli kütus E30, mille tunnikulu oli kõige lähedasem bensiini tunnikulule. Suurimad olid kütuse E85 tunnikulu (48,0% suurem bensiini tunnikulust) ning bioetanooli tunnikulu (53,8% suurem bensiini tunnikulust) (joonis 6).

Koormuskarakteristiku põhjal oli kütuste E15, E30 ja E50 tunnikulu üsna ühesugune, olles sõltuvalt koormusest bensiini tunnikulust 14–30% suurem. Kütuse E85 ja bioetanooli tunnikulu oli vastavalt 43% ja 63% suurem bensiini tunnikulust (joonis 7).

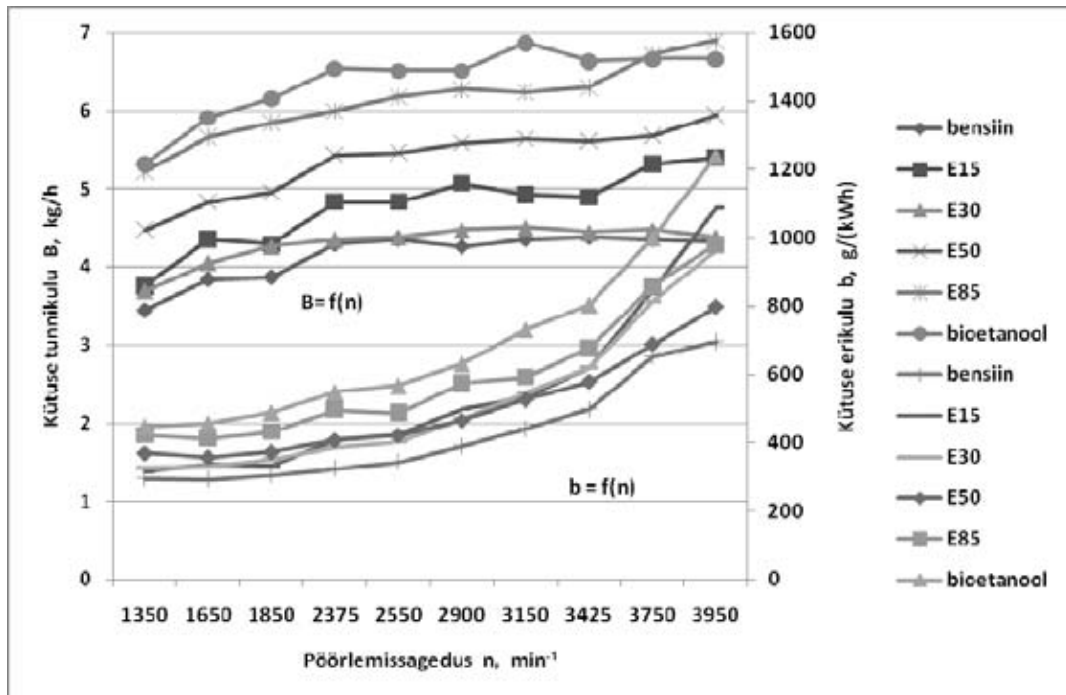
Ka kütuse erikulul b , $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ kasvas bioetanooli sisalduse suurenemisega kütuses. Siiski kütuste E15, E30 ja E50 erikulud ei erinenud palju üksteisest. Suurima erikuluga olid kütused E85 ja bioetanool (vastavalt 31–45% ja 50–61% suurem bensiini erikulust olenevalt mootorivõlli pöörlemissagedusest ja mootori koormusest) (joonised 6 ja 7).

Kiiruskarakteristiku põhjal oli mootori kasutegur η kõige väiksem kütuse E15 kasutamisel (11,7% väiksem kui bensiini kasutamisel). Bensiiniga sarnase või bensiinist suurema kasuteguri andsid kütused E50, E85 ja bioetanool. Muudest kütustest keskmiselt natuke suurema kasuteguriga oli kütus E85 (5,0% suurem mootori kasutegurist, kui kütuseks on bensiin) (joonis 8).

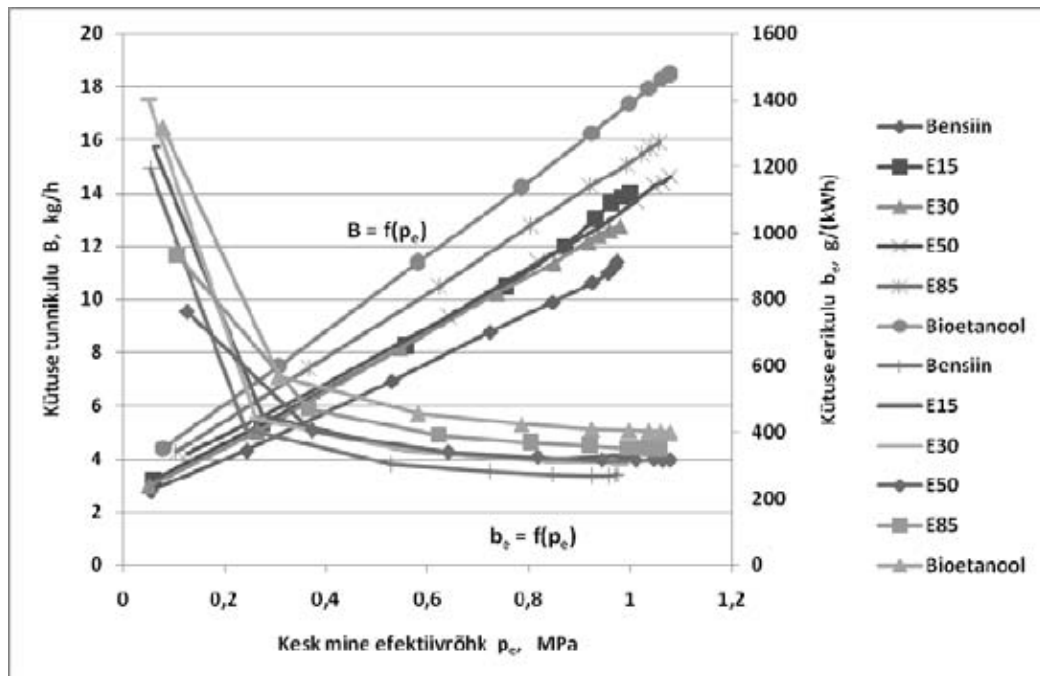


Joonis 5. Mootori võimsus P_e ja pöördemoment M sõltuvalt mootorivõlli pöörlemissagedusest n erinevate kütuste kasutamisel

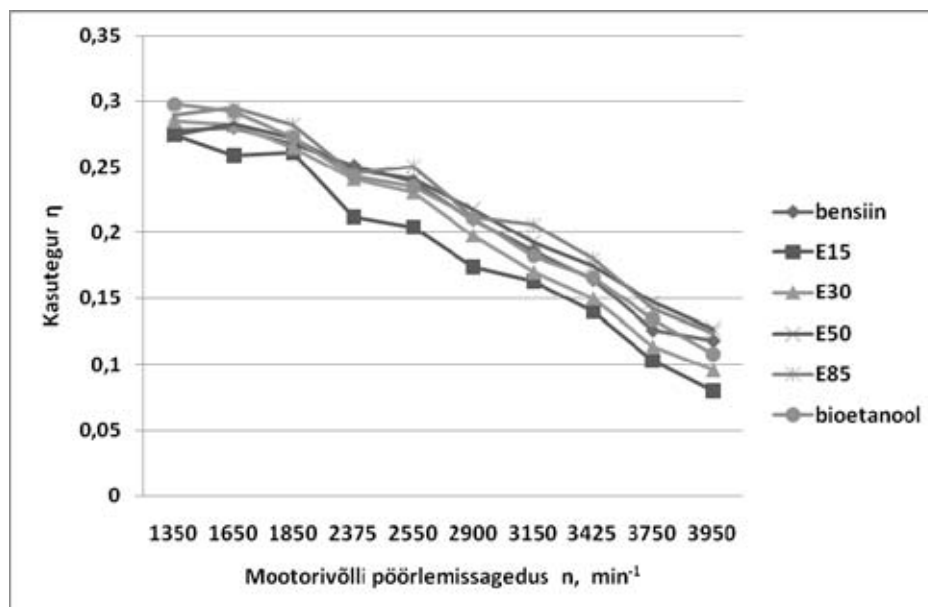
Figure 5. Output power P_e and torque M depending on the speed frequency of the engine n in case of different fuels



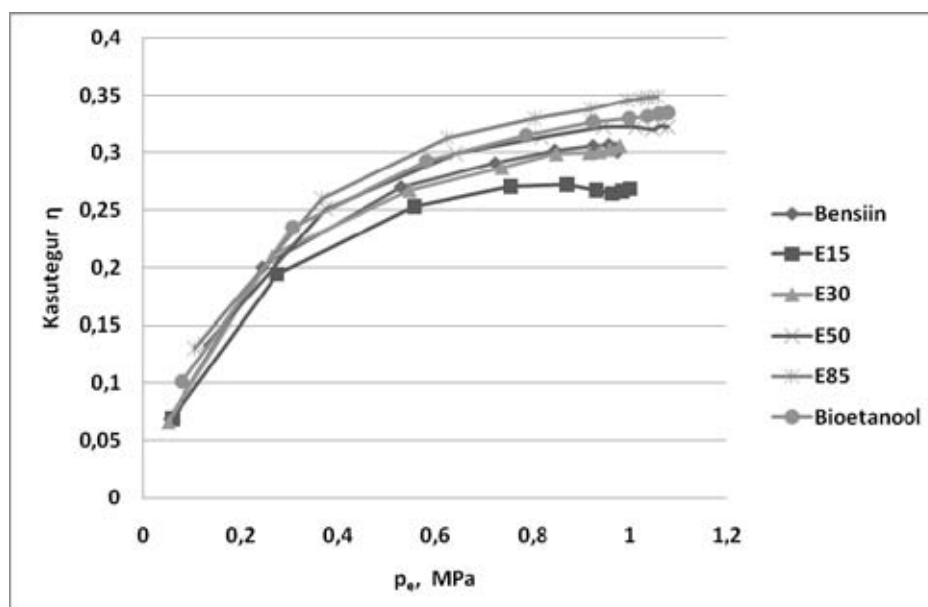
Joonis 6. Kütuse tunnikulu B ja erikulu b sõltuvalt mootorivõlli pöörlemissagedusest n erinevate kütuste kasutamisel
Figure 6. Fuel consumption B and specific fuel consumption b depending on the speed frequency of the engine n in case of different fuels



Joonis 7. Kütuse tunnikulu B ja erikulu b_e sõltuvalt mootori koormusest erinevate kütuste kasutamisel: p_e – keskmine efektiivrõhk, MPa
Figure 7. Fuel consumption B and specific fuel consumption b_e depending on engine load in case of different fuels: p_e – mean effective pressure, MPa



Joonis 8. Mootori kasutegur η sõltuvalt mootorivõlli pöörlemissagedusest n erinevate kütuste kasutamisel
Figure 8. Engine power efficiency η depending on the speed frequency of the engine n in case of different fuels



Joonis 9. Mootori kasutegur η sõltuvalt mootori koormusest erinevate kütuste kasutamisel: p_e – keskmine efektiivrõhk, MPa

Figure 9. Engine power efficiency η depending on the load of the engine in case of different fuels: p_e - mean effective pressure, MPa

Mootori töötamisel suurema koormusega oli mootori kasutegur kütuse E85 ja bioetanooli kasutamisel vastavalt 5,0% ja 4,6% suurem kui bensiini kasutamisel.

Koormuskarakteristiku järgi oli väikese etanoolisisaldusega kütuse E15 kasutamisel mootori kasutegur keskmiselt 10% väiksem kui bensiini kasutamisel. Kütus E30 ja bensiin andsid praktiliselt sama kasuteguri. Kütuste E50 ja E85 ning bioetanooli kasutamisel oli mootori kasutegur suurem kui bensiinil. Suurima kasuteguri andis kütus E85 (joonis 9).

Mootori kasutegurist lähtudes on katsete põhjal otsustatav kasutada suure bioetanooli sisaldusega kütuseid (uuritavatest kütustest E85 ja bioetanool). Neil on küll suur kütusekulu ja kütuse erikulu, kuid eriti kütus E85 tagab suure mootori võimsuse ja pöördemomendi ning kasuteguri. Kõige ebaotstarbekam kütus on E15.

Katsemootoril mõõdeti väiksemad süsinikoksiidi (CO) ja süsivesinike (HC) sisaldus bensiini, kütuse E85 ja bioetanooli kasutamisel. Heitgaasid olid kõige puhastamad kütuse E85 korral. Suurim süsinikoksiidi ja süsi-

vesinike sisaldus mõõdeti enamasti kütuse E15 kasutamisel (joonis 10).

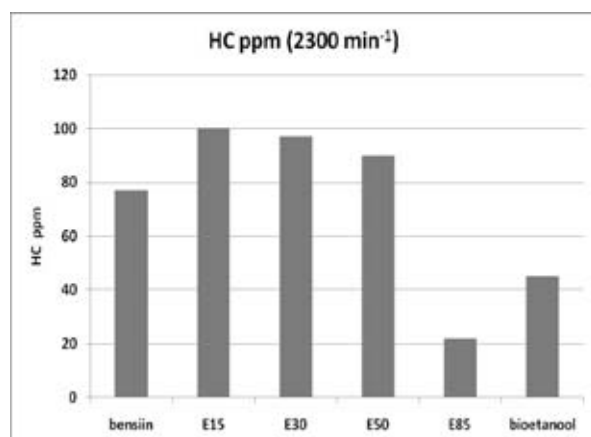
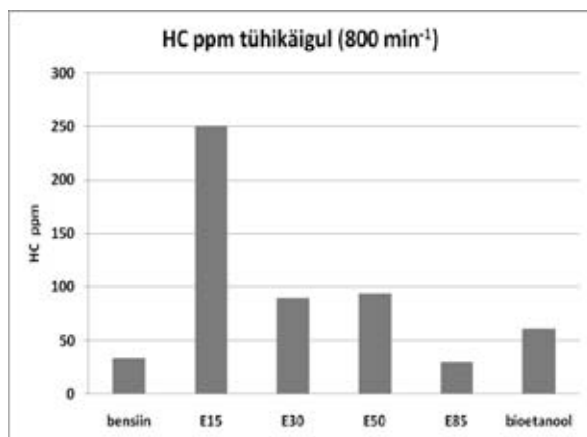
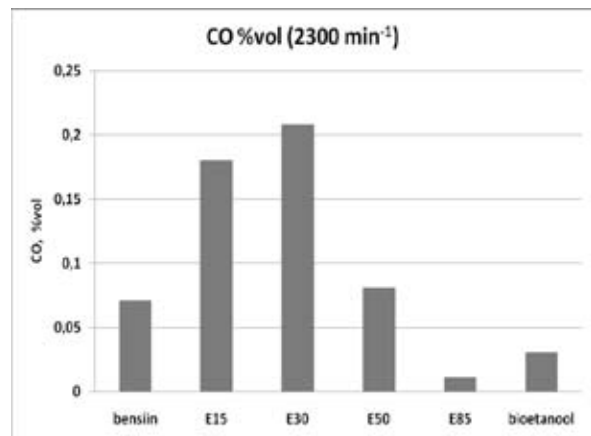
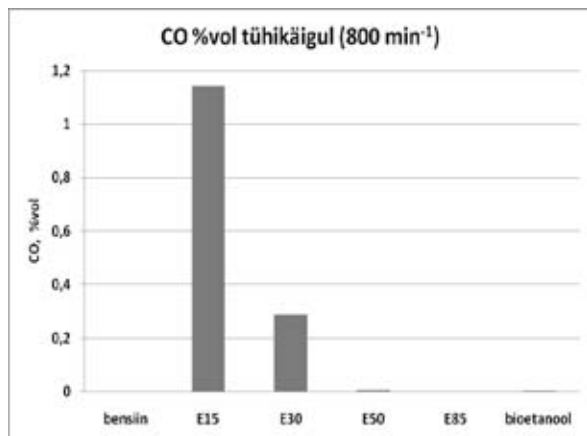
Katsete põhjal saab iseloomustada uuritud biokütuseid järgmiselt.

Biokütus E15. Kütuse E15 kasutamisel arendas mootor väiksemat võimsust ja momenti kui bensiini kasutamisel. Võrreldes bensiiniga suurenes kütusekulu keskmiselt 15% ja kütuse erikulu 27%. Mootori kasutegur osutus selle kütuse korral kõige väiksemaks (12% väiksem kui bensiini kasutamisel). Vingugaasi (CO) ja süsivesinike (HC) sisaldus heitgaasides olid ühed suuremad.

Biokütus E30. Kütuse E30 kasutamisel arendas mootor väiksemat võimsust ja momenti kui bensiini kasutamisel. Kütusekulu oli kõige lähedasem bensiinikulule (3,7% suurem kui bensiinikulu). Väiksema võimsuse tõttu oli kütuse erikulu 22% suurem kui bensiini erikulu. Mootori kasutegur oli sarnane mootori kasuteguriga bensiini kasutamisel (eriti suurematel koormustel). Antud kütuse kasutamisel olid süsinikoksiidi (CO) ja süsivesinike (HC) sisaldused heitgaasides ühed suurimatest.

Biokütus E50. Kütuse E50 kasutamisel oli mootori poolt arendatud võimsus ja pöördemoment ühed suurimatest (võimsus oli keskmiselt 8,5% suurem kui bensiini kasutamisel). Kütuse E50 kulu oli tublisti suurem bensiinikulust (29% suurem). Suurema võimsuse tõttu oli kütuse E50 erikulu vaid 17% suurem bensiini erikulust. Kütuse E50 kasutamisel oli mootori kasutegur 2,7% suurem võrreldes mootori kasuteguriga bensiini kasutamisel. Süsinikoksiidi (CO) sisaldus heitgaasides ei olnud oluliselt suurem kui bensiini korral, süsivesinike (HC) sisaldus oli mõnevõrra suurem.

Biokütus E85. Kütuse E85 kasutamisel olid mootori poolt arendatavad võimsus ja pöördemoment ühed suurimad (võimsus oli keskmiselt 5,6% suurem, kui bensiini kasutamisel). Kütuse E85 kulu ja erikulu olid ühed suurimaist (kütusekulu oli keskmiselt 40% suurem ja kütuse erikulu 48% suurem bensiini kulust ja erikulust). Kütuse E85 korral oli mootori kasutegur suurim (keskmiselt 5% suurem kui bensiini korral). Kütus E85 kasutamisel olid kõige väiksemad süsinikoksiidi (CO) ja süsivesinike (HC) sisaldused heitgaasides.



Joonis 10. Süsinikoksiidi (CO) ja süsivesinike (HC) sisaldus heitgaasides tühikäigu pöörlemissagedusel (800 min⁻¹) ja pöörlemissagedusel 2300 min⁻¹

Figure 10. The content of carbon oxide and hydrocarbon in exhaust gases at idle run (800 min⁻¹) and at the speed frequency of 2300 min⁻¹

Bioetanool (kütus E100). Puhta bioetanooli kütusena kasutamisel jäid mootori arendatavad võimsus ja pöördemoment õige vähe väiksemaks kui bensiini kasutamisel (4–5% väiksem kui bensiini kasutamisel). Puhta bioetanooli kasutamisel on kütusekulu ja kütuse erikulu 50–60% suuremad kui bensiinikulu ning mootori kasutegur on 1% suurem kui bensiini korral. Puhta bioetanooli kasutamisel mootorikütusena on süsinikoksiidi (CO) ja süsivesinike (HC) sisaldus heitgaasides üks väiksemaid.

Tuleb arvestada, et katsemootoril kasutatud bioetanooliseade *flexi tune sequential* on kavandatud ja optimeeritud paindliku kütusekasutusega sõidukite (*flexible-fuel vehicle*) tarvis, mille põhikütuseks on biokütus E85. Ka tuleb arvestada, et katsemootoril olid bensiini kasu-

tamiseks ettenähtud pihustid ja toitesüsteemi seadmed. Paindliku kütusekasutusega mootori ja selle elektroonilise juhtimissüsteemi saab kujundada optimaalsena bioetanooli ja bensiini iga suhtega kütusesegu jaoks. Parimad tulemused erinevate biokütuste kasutamisel annab mootori toitesüsteemi ja selle elektroonilise juhtimissüsteemi spetsiaalne seadmestamine ja häälestamine iga bioetanoolkütuse tarvis eraldi. Paljud võimalused erineva koostisega biokütuste positiivsete omaduste maksimaalseks ärakasutamiseks vajavad veel põhjalikumat uurimist.

Üldiselt on suurema detonatsioonikindluse, täielikuma põlemise, suurema kasuteguri ja puhtamate heitgaaside tõttu suuremad eelised suurema bioetanooli sisaldusega biokütustel.

Kasutatud kirjandus / References

Biomassi tehnoloogiauurimised ja tehnoloogiate rakendamise Eestis. 2008. Tallinna Tehnikaülikool (lep7028, vastutav täitja Villu Vares), 176 lk. (http://www.bioenergybaltic.ee/bw_client_files/bio-energybaltic/public/img/File/Lep7028WFinalB.pdf).

Ford Model T. 2009. (http://en.wikipedia.org/wiki/Ford_T).

Common ethanol fuel mixtures. 2009. (http://en.wikipedia.org/wiki/Common_ethanol_fuel_mixtures).

Autokataloog: Mudeliaasta 1997. 1996. AUTOrevüü koostöös kirjastusega Vereinigte Motor-Verlage GmbH & Co. KG, 273 lk.

FlexiTune AutoX4. Installation & User manual. 2009. (http://www.flexitune.se/document/FLEXITUNE_autoX4_Usersmanual.pdf).

Dynas3 LI. 2009. (<http://www.horiba.com/automotive-test-systems/products/mechatronic-systems/engine-test-systems/details/dynas3-li-low-inertia-114/>).

Eesti Lennuakadeemia: Mootorite katselabor: seadmed. 2009. (<http://www.eava.ee/opiobjektid/mk1/mk12/seadmed.html>).

Bioethanol as a Fuel in Spark-ignition Engine

J. Olt, V. Mikita, T. Sõõro, A. Küüt, R. Tamm, E. Raidla, R. Ilves, K. Ristlaid, V. Raudsepp, U. Viitkar

Estonian University of Life Sciences, Estonian Aviation Academy

Summary

Thanks to renewable raw materials, biofuels have turned out to be the most promising alternative engine fuel. In Brazil, in the 70-s, the government gave extensive support to the mixture of cheap ethanol (made of sugarcane) and gasoline – gasohol (10% ethanol, 90% gasoline). The main bioethanol producers are Brazil and the USA. In Europe more attention has been paid to biofuel since 2001. Ethanol has high octane number and it efficiently suppresses detonation (Table 1). As ethanol has lower calorific value than gasoline, fuel consumption for ethanol is higher. As ethanol contains oxygen, its combustion is more effective, CO, HC and NO_x emissions are reduced. As the heat of vaporization of ethanol is more than five times higher than of gasoline, difficulties may arise when starting the engine, especially in cold weather.

If the ethanol content in gasoline is 5% or more, it is labelled with E and a number indicating the ethanol content (volume percentage) in fuel. By now biofuels with different ethanol content are used (E5, E10–E85, E95). As there are no sufficient data about what effect fuels with different ethanol content have on contemporary engine capability, economy and purity of exhaust gases, the aim of the present study has been set to test and compare the aforementioned engine qualities with different ethanol content fuels and gasoline.

The fuels tested were gasoline 95, bioethanol (96.3% vol) and bioethanol fuels E15, E30, E50 and E85 (Figure 1). The test engine was *Audi A4 ADR*, 1998, 4-cylinder multipoint injection fuel supply spark-ignition engine (Table 2). The company *Schenck GmbH* test stand *Dynas3 LI250* was used (Figures 2, 3). The rated power for the stand is 250 kW, rated current 390 A, rated angular speed 4980 min⁻¹, torque at rated angular speed 480 Nm. The test was carried out with controller of the bench (Figure 4). Carbon dioxide, carbon oxide, unburnt hydrocarbons, nitrogen oxides and oxygen in the exhaust gases were measured with emission tester *Bosch BEA 350*.

In practice a car engine mainly works on medium load, medium engine shaft angular speed, and comparatively little time on maximum load engine shaft angular speed. To study the dependence of engine power and

economy characteristics and purity of exhaust gases on various fuels, the engine performance curves were recorded.

The main results of the tests are as follows. With fuels of lower ethanol content (E15, E30) the engine output fell compared to gasoline usage (Figure 5). Fuels E50 and E85 guaranteed better output qualities. With E50 the engine output was 8.5% higher on average than with gasoline. With E85 on maximum load the engine output was 5.6% higher on average than with gasoline. Based on output, the most reasonable fuels for the test engine would be E50 and E85. The most ineffective one would be E30.

Fuel consumption per hour increased according to the speed characteristic more or less according to the content of bioethanol in fuel. An exception was E30, which had the fuel consumption per hour closest to gasoline (Figure 6). According to load characteristic the consumption per hour for E15, E30 and E50 was more or less the same and about 14–30% higher than gasoline consumption per hour. E85 and bioethanol consumption per hour was 43% and 63% higher than gasoline consumption per hour accordingly (Figure 7). With higher bioethanol content in fuel also the specific fuel consumption increased. Although the differences in special consumption of E15, E30 and E50 were not relevant. The highest special consumption figures were recorded for E85 and bioethanol (31–45% and 50–61% higher than gasoline accordingly depending on the engine shaft angular speed and engine load) (Figures 6, 7).

With low ethanol content fuel E15 the engine efficiency was 10% lower on average than with gasoline.

With E50 and E85 and bioethanol the engine efficiency was higher than with gasoline as fuel. The highest efficiency was recorded for the fuel E85 (Figure 9). According to engine efficiency it is economical to use high ethanol content fuels (E85 and bioethanol of the ones tested). Although their fuel consumption and specific fuel consumption are high, still E85 in particular guarantees high engine power and torque, also efficiency. The lowest efficiency was recorded for E15.

The lowest carbon oxide (CO) and hydrocarbon (HC) content in exhaust gases for the test engine were recorded for gasoline, E85 and bioethanol. The best level of purity was for E85. The highest carbon oxide and hydrocarbons content was measured for E15 mostly (Figure 10).

It has to be taken into account that the test engine bioethanol facility *Flexi Tune Sequential* has been designed and optimized for flexible fuel vehicles with biofuel E85 as the main fuel. Also, the test engine had injectors and devices of fuel supply meant for gasoline. The best results with different biofuels are achieved with specific electronic control system installation and tuning for each bioethanol fuel separately. Many different possibilities to maximize the utilization of positive characteristics of biofuels of different composition need to be studied more thoroughly still.

A general conclusion can be made – due to higher detonation suppression, more complete combustion, higher efficiency and cleaner exhaust gases biofuels with higher bioethanol content should be preferred.