

BIO-BUTANOL – ALTERNATIVE FUEL FOR DIESEL ENGINE

/

BIO-BUTANOLUL – COMBUSTIBIL ALTERNATIV PENTRU MOTORUL DIESEL

Ph.D. Stud. Eng. Dobre Al., Prof. Ph.D. Eng. Pană C., Ph.D. Stud. Eng. Nuțu N. C., Prof. Ph.D. Eng. Negurescu N,
Lect. Ph.D. Eng. Cernat Al., Ph.D. Stud. Eng. Bondoc I.D.

„Politehnica” University of Bucharest / Romania
Tel: 0761 910 596; E-mail: alexandru.c.dobre@gmail.com

Abstract: The main goals of bio-alcohols use in Diesel engine are the reduction of pollution, greenhouse gas emissions and the replacement of the fossil fuels. The production of the bio-alcohols from plants based on sugar (cane and beet) and starch (cereals, sorghum and maize) will increase their prices, which will affect the living standard of the population, because these are the most commonly used. If bio-alcohol were obtained from waste cellulosic or synthetic waste, its use would represent an alternative solution of fuel for Diesel engine. From the primary alcohols used (bio-methanol, bio-butanol, bio-ethanol) the bio-butanol has the main advantage that it is most appropriate from the point of view of the properties of the Diesel fuel. This paper presents the results of experimental research carried on a Diesel engine with direct injection fuelled with Diesel-bio-butanol mixtures.

Keywords: alternative fuel, bio-alcohols, bio-butanol, Diesel engine, emissions.

INTRODUCTION

Given that the standard of living of the population increases continuously more and more rapidly due to advancement of technology an increase in global energy consumption has been produced. Basically, if the standard of living of the population increases also the consumption of natural resources such as fossil fuels will increase. To meet the growing needs of the population, oil and gas resources will be exhausted.

More rational use of such fossil fuels and alternative fuels are viable solutions for reducing the oil consumption. From alternative fuels, bio-alcohols represent viable solutions, because those can be obtained from biomass. Unlike Diesel fuel, bio-alcohol has a greater support, being a form of renewable energy, that can be produced from biomass; the energy being generated by a natural resource (sunlight), which is unlimited.

Research centres from universities and big companies are involved in serious theoretical and experimental research on bio-alcohol use as fuel for compression ignition engine, being investigated different methods of fuelling. From primary alcohols, bio-butanol has the advantage that shows properties close to those of Diesel fuel compared to others alcohols.

Bio-butanol properties comparative to Diesel fuel

Bio-butanol (tert-butyl alcohol) is made up of three methyl groups and one group of oxidril (C_4H_9OH).

Because of its higher self-ignition resistance, the biobutanol (low cetane number, table 1) can't be used in Diesel engine as single fuel without supplementary measures (the additive use or engine design changes). In order to use bio-butanol in compression ignition engine, this must be enriched with accelerators of organic nitrates type for reducing of the auto-ignition delay, or it can be use in addition with Diesel fuel,

Rezumat: Utilizarea bio-alcoolilor drept combustibil pentru motoarele Diesel are ca scop reducerea poluării, reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și înlocuirea combustibililor fosili. Producerea bio-alcoolilor din plante pe bază de zahăr (trestia și sfecla) și pe bază de amidon (cerealele, sorgul și porumbul) va conduce la creșterea prețului acestora, care va afecta nivelul de trai al populației, deoarece acestea sunt cele mai des utilizate. Dacă bio-alcoolul s-ar obține din deșuri celulozice sau sintetic, utilizarea lui ar reprezenta o soluție alternativă de combustibil pentru motorul Diesel. Dintre alcoolii utilizați (bio-metanolul, bio-butanolul, bio-etanolul) bio-butanolul are principalul avantaj că se apropie cel mai bine din punct de vedere al proprietăților de motorină. ucrarea prezintă rezultate ale cercetării experimentale efectuate pe un motor Diesel cu injecție directă de alimentat cu amestecuri motorină-bio-butanol.

Cuvinte cheie: combustibil alternativ, bio-alcoolii, bio-butanol, motor Diesel, emisii.

INTRODUCERE

Dat fiind faptul că standardul de viață al populației crește în mod continuu din cauza avansării tot mai rapide a tehnicii s-a produs o intensificare a consumului energetic la nivel global. Practic, dacă standardul de viață al populației crește și consumul resurselor naturale va crește alături de combustibilii de natură fosilă. Pentru a satisface nevoile tot mai accentuate ale populației, resursele de petrol și gaze naturale se vor epuiza.

Utilizarea mai rațională a combustibililor fosili și utilizarea combustibililor alternativi reprezintă soluții viabile pentru a reduce consumul de petrol. Dintre combustibilii alternativi, bio-alcoolii sunt o soluție viabilă, deoarece aceștia se pot obține din biomasă. Spre deosebire de motorină, bio-alcoolul are o susținere mai mare, el fiind o formă de energie regenerabilă, care poate fi produsă din biomasă; energia fiind generată de o resursă naturală (lumina soarelui), care este inepuizabilă.

Centre de cercetare din universități și mari companii, sunt implicate în serioase cercetări teoretice și experimentale privind utilizarea bio-alcoolului drept combustibil pentru motorul Diesel, fiind investigate diferite metode de alimentare. Dintre alcoolii primari, bio-butanolul are avantajul că prezintă proprietăți mai apropiate de cele ale motorinei comparativ cu ceilalți alcoolii.

Proprietățile bio-butanolului comparativ cu motorina

Bio-butanolul (terț-butil alcoolul) este format din trei grupări de metil și o grupare oxidril (C_4H_9OH).

Bio-butanolul având întârziere mare la autoaprindere (cifră cetanică mică, tabelul1) face ca acesta să nu poată fi utilizat drept combustibil unic pentru motorul Diesel fără a se lua măsuri suplimentare, aditivare sau modificări constructive ale motorului. Pentru ca bio-butanolul să poată fi utilizat la motorul cu aprindere prin comprimare trebuie fie aditivat cu acceleratori de tipul nitraților organici pentru a reduce întârzierea la autoaprindere, fie

solutions that do not involve significant design changes to the engine.

The main properties of bio-butanol as compared to the Diesel fuel are shown in table 1.

utilizat în amestec cu motorina, soluții ce nu implică modificări constructive semnificative ale motorului.

Principalele proprietăți ale bio-butanolului comparativ cu motorina sunt redată în tabelul 1.

Table 1 / Tabelul 1

The properties of bio-butanol comparing to Diesel fuel, [3], [12] /
Proprietățile bio-butanolului în comparație cu cele ale motorinei, [3], [12]

Nr. crt.	Parameter / Parametrul	Unit of measure / Unitatea de măsură	Bio-butanol / Bio-butanol	Diesel fuel / Motorină
1	Chemical formula / Formula chimică	[-]	C ₄ H ₉ OH	≈ C ₁₆ H ₃₄
2	Boiling temperature (1.013 bar) / Temperatura de fierbere (1,013 bar)	[°C]	82.8	180 ... 360
3	Auto-ignition temperature / Temperatura de autoaprindere	[°C]	340	≈ 250
4	Flame temperature / Temperatura flăcării	[°C]	2220	2054
5	Evaporation heat / Căldura de vaporizare	[kJ/kg]	595	251 ... 314
6	Low calorific power / Puterea calorifică inferioară	[kJ/kg]	32560	41855
7	Cetane number / Cifra cetanică	[-]	<18	45 ... 55
8	Dynamic viscosity at 20 °C (1,013 bar) / Vâscozitatea dinamică la 20 °C (1,013 bar)	[mPa·s]	2.95	1.6 ... 6.8
9	Gravimetric composition / Compoziția gravimetrică	C	64.86	≈ 86
		H	13.5	≈ 12
		O	21.64	2
10	Fuel air ratio / Raportul aer combustibil	[kg air/kg comb.]	11.1	14.5
11	Flash temperature / Temperatura de inflamabilitate	[°C]	34	50 ... 140
12	Density at 20 °C / Densitatea la 20 °C	[kg/m ³]	810	820 ... 860
13	Specific heat at 20 °C (1.013 bar) / Căldura specifică la 20 °C (1,013 bar)	[kJ/kg·K]	2.3	1.9

An addition of 25% accelerator in alcohol leads to an auto-ignition delay similar to that of Diesel fuel, [3]. Difficult auto-ignition to use bio-butanol is accentuated by decreasing temperature trend due to the heat of higher vaporization higher of alcohols than Diesel fuel (heat of vaporization of bio-butanol being about 2 times higher than the vaporization of Diesel fuel produces an intense cooling effect).

Higher bio-butanol auto-ignition temperature involves measures to raise the temperature in the cylinder such as increasing the compression ratio.

From primary alcohols, the bio-butanol has the most similar viscosity to that of the Diesel fuel and the higher miscibility, which recommends it as a good alternative fuel. However, the bio-butanol's viscosity is lower than Diesel fuel (this can dilute the oil) producing some of its adverse effects in the lubrication.

Adding bio-butanol in Diesel fuel decreases the mixture viscosity, which influences on angle of jet dispersion in terms of increasing, reduction of droplet diameter and decreasing of jet penetration. Another aspect is the influence of fluidity to low temperature, which can be improved by the addition of bio-butanol.

Also the use of bio-butanol as a fuel must be taken into account that for the same amount of energy stored in the fuel tank for bio-butanol will have a larger volume and weight compared to Diesel fuel due to lower calorific value of bio-butanol comparative to Diesel fuel.

From the special technical literature some results on the use of bio-butanol in Diesel engine using different methods are known.

In the paper [9] are presented some results of the experimental research on an engine with a single four-stroke cylinder of type Lister 1-9, at different loads using

Un adaos de 25% accelerator în alcool conduce la o întârziere la autoaprindere asemănătoare cu cea a motorinei, [3]. Autoaprinderea dificilă la utilizarea bio-butanolului este accentuată și de tendința micșorării temperaturii, datorită căldurii de vaporizare mai mari la alcoolii decât la motorină (căldura de vaporizare a bio-butanolului fiind de circa 2 ori mai mare decât a motorinei, produce la vaporizare un efect intens de răcire).

Temperatura de autoaprindere mai ridicată a bio-butanolului implică măsuri care să ridice nivelul temperaturii în cilindru cum ar fi creșterea raportului de comprimare.

Dintre alcoolii primari, bio-butanolul are vâscozitatea cea mai apropiată de cea a motorinei precum și miscibilitatea cea mai ridicată, recomandându-l drept combustibil alternativ. Vâscozitatea bio-butanolului este mai mică decât a motorinei (ea poate dilua uleiul) producând unele efecte defavorabile lubrifierii.

Adăugarea bio-butanolului în motorină are ca efect reducerea vâscozității influențând, în sensul creșterii, unghiul de dispersie al jetului, reducerea diametrului picăturii și scăderea penetrației. Fluiditatea la temperaturi scăzute se va îmbunătăți prin adăugarea bio-butanolului.

La utilizarea bio-butanolului drept combustibil trebuie luat în calcul că pentru aceeași cantitate de energie stocată, rezervorul de combustibil pentru bio-butanol va avea un volum și o masă mai mare comparativ cu cel de motorină datorită puterii calorifice inferioare mai scăzute a bio-butanolului în raport cu motorina.

Din literatura de specialitate sunt cunoscute unele rezultate privind utilizarea bio-butanolului la motorul Diesel prin diferite metode.

În lucrarea [9] sunt prezentate unele rezultate ale cercetărilor experimentale efectuate pe un motor cu un singur cilindru în patru timpi, tip Lister 1-9 la diferite

the blends method (10% iso-butanol, 20% iso-butanol, 30% iso-butanol, 40% iso-butanol). The experimental results showed: reducing of the exhaust gas temperature, of the effective power and of the thermal efficiency in the use of biobutanol-oil blends in various proportions comparative to only Diesel fuel engine operation. Also the air-fuel ratio has declined and the specific fuel consumption actually increased to the use of iso-butanol. Due to the influence on the engine energetic parameter, the author limits the rate of biobutanol in the blends to 30%, finding a deterioration of analysed parameters at higher percentages, for example 40%.

Experimental researches on combustion behaviour of biobutanol are presented in paper [15] using as fuelling method the blends method (8% biobutanol and 16% percentage by volume). Experimental tests were performed on a six-cylinder turbocharged engine with direct injection. The engine was subjected to the tests at three different loads while maintaining constant speed (1200 rev/min to 1500 rev/min). The results showed that to the use of bio-butanol in blends with Diesel fuel, the fuel injection pressure diagrams are slightly delayed, and the auto-ignition delay increased. Also, a decrease of the maximum cycle pressure and of the in-cylinder gases temperature during the rapid combustion phase was obtained.

The research presented in the paper [14] investigates the mechanisms of formation of nitrogen monoxide, smoke and combustion noise produced during the warm start method using blends method. The results obtained at the use of blends: 30% bio-Diesel and Diesel fuel with 25% n-butanol are comparatively presented. The use of Diesel fuel in blends with n-butanol leads to a significantly reduction of exhaust gases opacity, but to a notably increase of NO emission.

In paper [17] the influence of bio-butanol mixed with Diesel fuel and bio-Diesel is analysed. The results showed that the addition of 20% n-butanol in a mixture of Diesel fuel and 20% bio-Diesel resulted in a slight increase in specific fuel consumption and thermal efficiency compared to Diesel fuel. The CO and HC emissions decreased, while NO_x emissions remained almost unchanged at low engine loads and for high engine loads the NO_x emission decreased. Also, the smoke opacity was reduced.

MATERIAL AND METHODS

The experimental researches were performed on a Diesel engine K9K type - 1.5 dCi (maximum power 52 kW and maximum power engine speed 3900 rot/min) mounted on a test bed.

The stand for testing is equipped with Schenck E90 dyno for torque measurement, flowmeters for measurement of the air and fuel consumption, thermometers, for measurement of the supply air temperature, cooling liquid, exhaust gas, cooling system oil, manometer for pressure boost measurement, oil pressure lubrication system. For analyzing the exhaust gas was used an analyzer type AVL Dicom and an opacimeter type AVL Dicom 4000. In the engine's cylinder was mounted a piezoelectric pressure transducer type AVL for monitoring the pressure. Also the stand includes a data acquisition system type AVL.

Experimental investigations have been carried out using a blend of 10% Diesel and 20% bio-butanol. Experimental investigations have been carried out in the load modes of 100% and 85% at the speed of 2000 rev/min. At the use of bio-butanol, the fuel cycle dose increased (bio-butanol-Diesel blend) in order to restore standard engine power. The injection timing was optimized in terms of NO_x emissions and to limit the maximum in-cylinder pressure maintaining the standard

sarcini utilizând metoda amestecurilor (10%, 20%, 30% și 40% izo-butanol). Rezultatele experimentale au arătat: reducerea temperaturii de evacuare a gazelor, scăderea puterii efective și reducerea randamentului termic la utilizarea amestecurilor bio-butanol-motorină în diferite proporții față de funcționarea motorului doar cu motorina. De asemenea și coeficientul de exces de aer s-a diminuat [9], iar consumul specific de combustibil efectiv a crescut la utilizarea izo-butanolului. Autorul limitează procentul de bio-butanol la 30%, constatând înrăutățirea parametrilor energetici ai motorului analizați la procente mai mari, ca de exemplu 40%.

Cercetări experimentale privind arderea bio-butanolului sunt redată în lucrarea [15] utilizând metoda amestecurilor (butanol 8% și 16% volumetric). Încercările experimentale au fost efectuate pe un motor supraalimentat cu șase cilindri și injecție directă. Motorul a fost supus testelor la trei sarcini diferite menținând turația constantă (1200 și 1500 rot/min). Diagramele de presiune de injecție de combustibil sunt ușor întârziate, iar întârzierea la autoaprindere a crescut la utilizarea bio-butanolului în amestec cu motorina. De asemenea s-a constatat reducerea presiunii maxime pe ciclu și a temperaturii gazelor din cilindru în faza arderii rapide.

Cercetările prezentate și în lucrarea [14] investighează mecanismele de formare a monoxidului de azot, fumului și zgomotului de ardere produs în timpul pornirii la cald utilizând metoda amestecurilor (motorină cu 30% bio-Diesel și motorină cu 25% n-butanol). La utilizarea n-butanolului în amestec cu motorina s-a redus semnificativ opacitatea gazelor de evacuare, dar a crescut în mod notabil, emisia de NO.

În lucrarea [17] este analizată influența bio-butanolului în amestec cu motorină și bio-Diesel. Adăugarea de 20% n-butanol în amestecul de motorină și 20% bio-Diesel a determinat o ușoară creștere a consumului specific de combustibil și a randamentului termic comparativ cu motorina. Emisiile de CO și HC a scăzut, iar emisia de NO_x a rămas aproape neschimbată la sarcini mici ale motorului, iar la sarcini mari emisia de NO_x a scăzut. De asemenea reducându-se și opacitatea fumului.

MATERIAL ȘI METODE

Cercetările experimentale s-au efectuat pe motorul Diesel tip K9K – 1.5 dci (puterea maximă 52 kW la turația de 3900 rot/min) montat pe un stand de încercări.

Standul de încercări este dotat cu frână Schenck E90 pentru măsurarea momentului motor, debitmetre pentru măsurarea consumurilor de aer și combustibil, termometre, pentru măsurarea temperaturilor aerului de alimentare, lichidului de răcire, gazelor de evacuare, uleiurilor din sistemul de răcire, manometre pentru măsurarea presiunii de supraalimentare, presiunea uleiului din sistemul de ungere. Pentru analiza gazelor de evacuare s-a utilizat analizorul de gaze și opacimetrul AVL Dicom 4000. În cilindrul motorului a fost montat un traductor piezoelectric de presiune AVL pentru monitorizarea presiunii. De asemenea standul conține și un sistem de achiziție de date AVL.

S-au efectuat măsurători, utilizând un amestec de motorină cu 10% respectiv 20% bio-butanol. Investigațiile experimentale s-au efectuat la regimurile de sarcină 100% și 85% la turația de 2000 rot/min. La utilizarea bio-butanolului, s-a mărit doza de combustibil (amestec bio-butanol-motorină) pentru refacerea puterii motorului standard. Avansul la injecție a fost optimizat din punct de vedere al emisiilor de NO_x și al limitării presiunii maxime

engine power.

RESULTS

The figures 3..12 present the results of the experimental investigations carried out.

Energy aspects

Figure 3 shows the pressure variation versus the crankshaft angle at the standard injection timing for engine operation at Diesel fuelling and optimized for Diesel fuel, 10% and 20% bio-butanol fuelling at full load, and in the figure 4 the variation of cycle maximum pressure versus the volume percentage of Diesel fuel replacement (x_c) at 100% ($\chi = 1$) load and 85% ($\chi = 0.85$) are shown. We find that the maximum pressure from the cycle decreased about 10% when is using 20% bio-butanol than Diesel fuel at full load with the optimized injection timing. This is due to bio-butanol, which has a cooling effect more intensely than Diesel fuel. Maximum pressure for 10% bio-butanol doesn't change compared to Diesel fuel, because the cooling effect of the bio-butanol is compensated from the better burning speed of the bio-butanol than Diesel fuel (fig. 3).

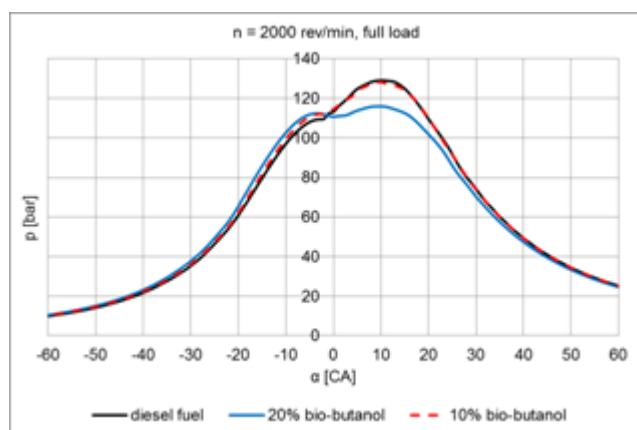


Fig. 3 – The indicate diagram / *Diagrama indicate*

For the standard injection timing, the maximum pressure has small variations with the percentage of bio-butanol at 100% load because of the combustion improvement (fig. 4). By optimizing of the injection timing for the limitation of the emission of NO_x level, the maximum pressure is reduced at the increase of the bio-butanol percentage at 100% load and for 85% load the maximum pressure is maintained constant.

Figure 5 shows the maximum rate pressure rise versus bio-butanol percentage in blends with Diesel at different loads and speed of 2000 rev/min. The maximum rate pressure rise increases at the use of bio-butanol mixed with Diesel fuel than Diesel fuel, because the auto-ignition delay increases both for the full load and for the 85% load (fig. 5).

At the increase of the proportion of bio-butanol, increases the duration of injection because of a much lower calorific power value and lower density of bio-butanol comparative to Diesel fuel and decreases the combustion time duration due to the better bio-butanol's combustion properties (fig. 6). We notice that 20% bio-butanol mixed with Diesel fuel significantly influences the auto-ignition delay (increases compared with Diesel fuel), due to biobutanol's lower cetane number, which moves the combustion toward the detente being necessary the modification of the injection timing for optimizing the

din cilindru menținând puterea motorului standard.

REZULTATE

În figurile 3..12 sunt prezentate rezultate ale investigațiilor experimentale efectuate.

Aspecte energetice

În figura 3 se prezintă variația presiunii în funcție de unghiul arborelui cotit pentru avansul la injecție standard la funcționarea motorului alimentat cu motorină și optimizat la funcționarea motorului alimentat cu motorină, 10% și 20% bio-butanol la sarcină totală, iar în figura 4 se prezintă variația presiunii maxime pe ciclu în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei (x_c) la sarcinile 100% ($\chi = 1$) și 85% ($\chi = 0,85$). Găsim că presiunea maximă pe ciclu scade cu circa 10% față de motorină, când este utilizat 20% bio-butanol la sarcină totală cu avans la injecție optimizat. Acest lucru se datorează bio-butanolului, care are un efect de răcire mai intens decât motorina. Presiunea maximă pentru 10% bio-butanol nu se modifică comparativ cu motorina, deoarece efectul de răcire al bio-butanolului este compensat de viteza de ardere mai bună a acestuia comparativ cu motorina (fig. 3).

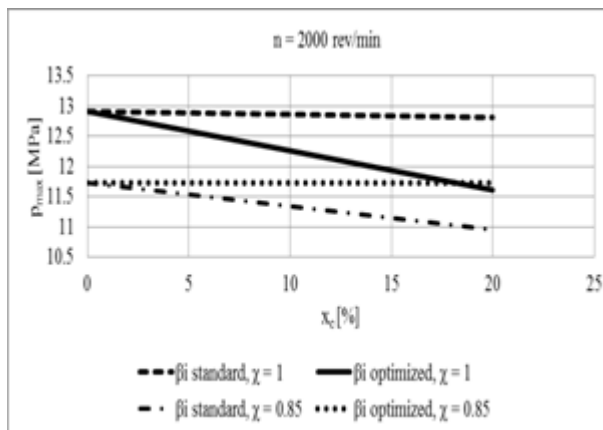


Fig. 4 – Maximum pressure variation versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads / *Variația presiunii maxime în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei pentru diferite sarcini*

Pentru avansul la injecție standard, presiunea maximă are variații reduse cu procentul de bio-butanol la sarcina de 100% datorită îmbunătățirii arderii (fig. 4). Prin optimizarea avansului la injecție pentru limitarea nivelului emisiei de NO_x , presiunea maximă se reduce cu creșterea procentului de bio-butanol la sarcină totală, iar la sarcina de 85% presiunea maximă se menține constantă.

În figura 5 este prezentată viteza maximă de creștere a presiunii cu procentul de bio-butanol din amestec la diferite sarcini și turația de 2000 de rot/min. Viteza maximă de creștere a presiunii la utilizarea bio-butanolului în amestec cu motorina crește față de motorină, deoarece se mărește întârzierea la autoaprindere atât pentru sarcina totală cât și pentru sarcina de 85% (fig. 5).

Totodată, la creșterea procentului de bio-butanol crește durata injecției datorită puterii calorifice inferioare și a densității mai mici a bio-butanolului comparativ cu motorina și scade durata în timp a arderii datorită proprietăților de ardere mai bune ale acestuia (fig. 6). Observăm că 20% biobutanol în amestec cu motorina influențează semnificativ întârzierea la autoaprindere (crește comparativ cu motorina), datorită cifrei cetanice mai scăzute a biobutanolului, ceea ce deplasează arderea în destindere fiind necesară modificarea avansului la injecție pentru optimizarea performanțelor.

performance. The variation of the apparent heat release rate is kept approximately at the same level (fig. 6), but when using bio-butanol, the combustion time being more reduced explains the increase of the maximum pressure and the rate of increment of pressure .

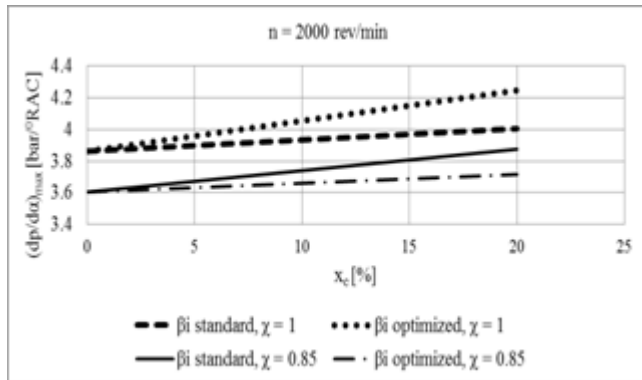


Fig. 5 - The Maximum pressure rate versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads / *Viteza maximă de creștere a presiunii în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei pentru diferite sarcini*

Viteza maximă de degajare a căldurii se menține aproximativ la aceeași valoare, (fig. 6), dar la utilizarea bio-butanolului, durata arderii fiind mai redusă explică creșterea presiunii maxime și viteza de creștere a presiunii.

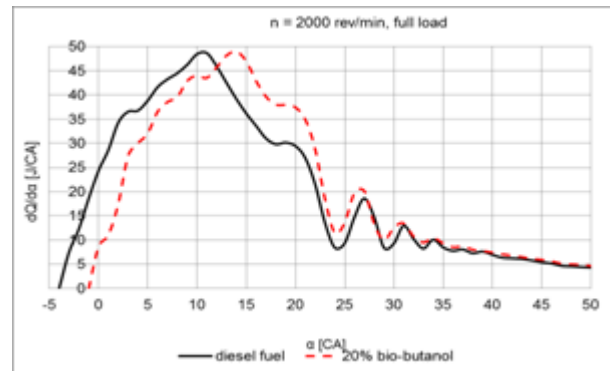


Fig. 6 - The variation of the apparent heat release rate versus the crankshaft angle / *Variația vitezei aparente de degajare a căldurii în funcție de poziția arborelui cotit*

Regarding the cyclic variability (formula 1), coefficient of variation in maximum pressure at full load is 0.92% for the Diesel fuel (standard injection timing) and 0.69%, for 20% bio-butanol (optimized injection timing), while for the 85% load is 0.56 for Diesel fuel (standard injection timing) and 0.61% for 20% of bio-butanol (optimized injection timing), indicating a high stability of the combustion process.

În ceea ce privește variabilitatea ciclică (formula 1), coeficientul de variație a presiunii maxime la sarcină totală este 0,92% pentru motorină (avans la injecție standard) și 0,69%, pentru 20% bio-butanol (avans la injecție optimizat), în timp ce pentru 85% sarcină este 0,56 pentru motorină (avans la injecție standard) și 0,61% pentru 20% bio-butanol (avans la injecție optimizat), indicând o stabilitate mare a procesului arderii.

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \tag{1}$$

where: *COV* represents the cyclic variability coefficient of the maximum pressure; σ – mean square deviation for max. pressure; \bar{x} – average for maximum pressure.

unde: *COV* reprezintă coeficientul de variabilitate ciclică a presiunii maxime; σ – abaterea medie pătratică a presiunii maxime; \bar{x} – media aritmetică a presiunii maxime.

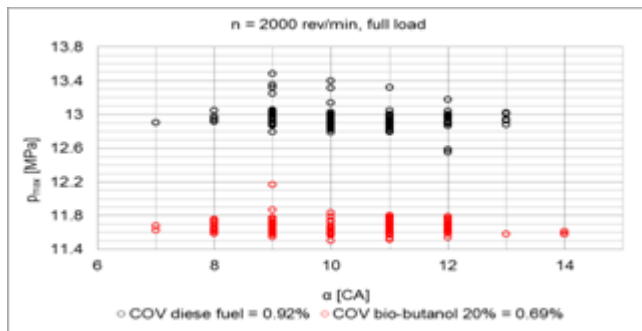


Fig. 7 - Maximum pressure in cylinder versus angle crankshaft / *Presiunea maximă din cilindru în funcție de unghiul de rotație al arborelui cotit al motorului*

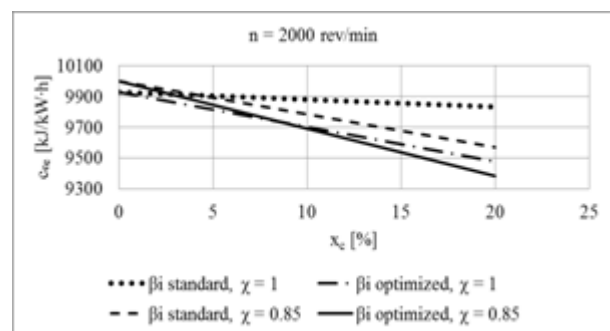


Fig. 8 - Specific energetic consumption versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads / *Consumul specific energetic efectiv în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei pentru diferite sarcini*

In figure 7 is presented maximum pressure in cylinder versus angle crankshaft for 150 cycles at the fuelling only with Diesel fuel or with 20% bio-butanol in mixture.

În figura 7 este prezentată presiunea maximă din cilindru în funcție de unghiul de rotație al arborelui cotit pentru 150 de cicluri la alimentarea doar cu motorină sau 20% bio-butanol în amestec.

For 20% bio-butanol in mixture, the cyclic dispersion is lower than the functioning with Diesel fuel. The angle of maximum pressure for 20% bio-butanol has a value between 9÷12 CA after TDC (Fig. 7).

La amestecul cu 20% bio-butanol, dispersia ciclică este mai redusă decât la funcționarea cu motorină. Unghiul de presiune maximă pentru 20% bio-butanol are valoarea între 9÷12 °RAC după PMI (fig. 7).

Figure 8 presents the variation of the specific energetic consumption compared with the volumetric percentage of bio-butanol in the blend with Diesel fuel. Generally, the brake specific energetic consumption is

În figura 8 este prezentată variația consumului specific energetic efectiv în raport cu procentul volumetric de bio-butanol din amestec. Se constată, în general, reducerea

reduced by the increasing of the bio-butanol percentage, due to improvement of the combustion (bio-butanol higher burning rate and a higher content of oxygen in bio-butanol molecule). For the optimized injection timing, reducing the specific energetic consumption is more pronounced: at 20% bio-butanol, the reduction is about 5% at full load and about 6% at 85% load.

Pollution aspects

At 85% load to the optimized timing injection NO_x emission level doesn't change compared to the standard one. Also, at the same load, the emission of NO_x level decreases against the full load regime, because of the decrease of the temperature from cylinder (fig. 9).

Figure 9 shows the variation of NO_x emissions level by the percentage of bio-butanol for the investigated regimes. It was found a reduction of NO_x emissions level assured by optimization of the injection timing, which was reduced comparatively to the standard injection timing.

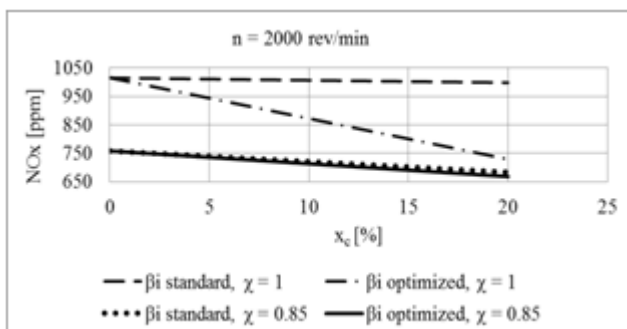


Fig. 9 - The NO_x emission versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads / Emisia de NO_x în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei la diferite sarcini ale motorului

Regarding the emission of HC, it increases with the percentage of biobutanol possible because of the flame extinction at wall and in air-bio-butanol homogeneous mixture, which becomes relatively leaner (fig. 10).

The exhaust gas opacity variation with the bio-butanol's percentage at the investigated regimes is represented in fig. 11. Generally the exhaust gas opacity decreases with the bio-butanol percentage increasing. At 85% load, the influence is reduced both for the standard injection timing and for the optimized injection timing, while for the 100% load at optimized injection timing there is a slightly increase than the standard injection timing at the bio-butanol's percentage increase, which can be due to a reduction of air excess coefficient.

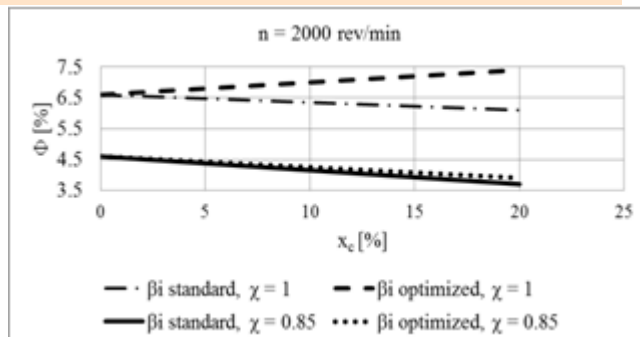


Fig. 11 - The fume emission represented by opacity versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads / Opacitatea în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei la diferite sarcini ale motorului

It is found that CO_2 emission level decreased at the biobutanol use comparing to Diesel fuel for an injection timing optimized at full load, possibly due to higher oxygen content of bio-butanol molecule (the combustion

consumului specific energetic cu creșterea procentului de bio-butanol datorită îmbunătățirii arderii (viteză de ardere mai bună și un conținut mai mare de oxigen în molecula de bio-butanol). Pentru avansul la injecție optimizat, reducerea consumului specific energetic este mai pronunțată: 20% bio-butanol, reducerea este de circa 5% la sarcină totală și de circa 6% la sarcina de 85%.

Aspecte de poluare

La sarcina de 85% la avansul optimizat emisia de NO_x nu se modifică față de cel standard. De asemenea, la sarcina de 85% emisia de NO_x scade față de regimul de sarcină totală, deoarece scade temperatura din cilindru (fig. 9).

În figura 9 este prezentată variația emisie de NO_x cu procentul de bio-butanol la regimurile investigate. Se constată o reducere a emisie de NO_x prin optimizarea avansului la injecție care a fost redus față de avansul la injecție standard.

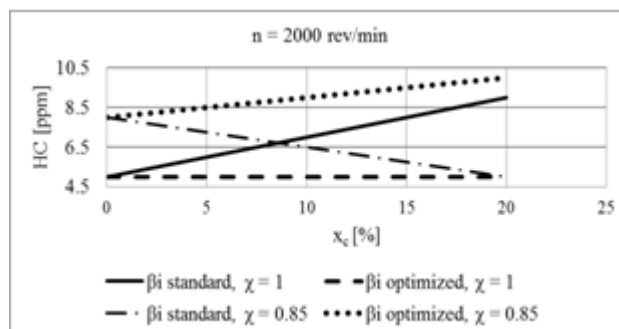


Fig. 10 - The HC emission versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads / Emisia de HC în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei la diferite sarcini ale motorului

În ceea ce privește emisia de HC, aceasta crește cu procentul de bio-butanol, posibil din cauza stingerii flăcării la perete și în amestecul omogen aer-bio-butanol, care devine relativ sărac (fig. 10).

În figura 11 este reprezentată variația opacității fumului din gazele de evacuare cu procentul de bio-butanol la regimurile investigate. În general opacitatea gazelor de evacuare scade cu creșterea procentului de bio-butanol. La sarcina de 85% influența este redusă atât pentru avansul standard cât și pentru cel optimizat, iar pentru sarcina de 100% la avansul optimizat se constată o ușoară creștere față de avansul standard la creșterea procentului de bio-butanol, fapt ce se poate datora scăderii coeficientului de exces de aer.

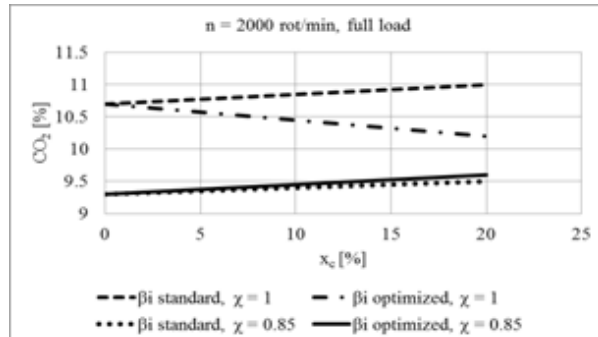


Fig. 12 - The CO_2 emission versus volumetric diesel fuel substitute ratio for different loads sarcini ale motorului / Emisia de CO_2 în funcție de procentul de substituție volumetric a motorinei la diferite sarcini ale motorului

Se constată că emisia de CO_2 a scăzut la utilizarea bio-butanolului comparativ cu motorina pentru un avans la injecție optimizat la sarcină totală, posibil datorită conținutului mai ridicat de oxigen din molecula de bio-

has improved due to the higher burning rate of the bio-butanol). At a load of 85% at an optimized timing injection, CO₂ emission level doesn't change from standard injection timing (fig. 12).

CONCLUSIONS

Bio-butanol represents a viable alternative solution for its use as fuel for Diesel engine in order to reduce pollution and increase engine's economicity.

Experimental tests performed on a Diesel engine with direct injection revealed the influence of bio-butanol's percentage from the mixture with Diesel fuel on the combustion, fuel consumption and pollution emissions. Compared with the results of standard engine at the operation of the engine with Diesel fuel mixture and 20% bio-butanol, the following conclusions can be presented:

- specific energetic consumption of the engine was reduced by about 5%;
- maximum pressure from the cylinder decreases with the increase of the bio-butanol's percentage from the mixture, while the maximum rate pressure rise registers a slightly increase;
- gas opacity easy increases with biobutanol content in mixture with the Diesel fuel at the full load but slightly decreases at 85% load;
- NO_x emission was significantly reduced by about 25% for example at full load at the operation with optimized injection timing;
- CO₂ emission was reduced by about 10% for full load;
- CO emission was below measurable limit for both Diesel and bio-butanol using.

The fuelling of the Diesel engine with Diesel fuel-bio-butanol blends represents a relatively easy method to apply without requiring major changes in the construction of the engine. Researches are required to establish the adjusting optimum parameters in order to obtain the best energetic performance and reduced pollution with maintaining or increasing power performance.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank to AVL List GmbH company Graz, Austria, for possibility to use the research equipment.

REFERENCES

- [1]. Ananda Srinivasan, Saravanan C.G. (2010) - *Study of combustion characteristics of an SI engine fuelled with ethanol and oxygenated fuel additives*, Journal of Sustainable Energy & Environment, 85- 91;
- [2]. Anuj Pal, Sahil Gupta (2013) - *Performance and emission characteristics of iso-butanol-Diesel blend in water cooled CI engine employing EGR with EGR Intercooler*, SAE Technical Paper 2013-24-0151, : 10.4271/2013-24-0151;
- [3]. Apostolescu N., Sfințeanu D. (1989) - *The automotive with unconventional fuels*, Technical Publishing House, ISBN 973-31-0049-8, Bucharest;
- [4]. Aramă C., Grünwald B. (1966) - *Internal combustion engines - processes and characteristics*, Technical Publishing House, Bucharest;
- [5]. Grünwald B. (1980) - *Theory, calculation and construction of engines for motors vehicles*, Didactic and Pedagogic Publishing House, Bucharest.
- [6]. Haifeng Liu, Shanju Li et all (2013) - *Effects of n-butanol, 2-butanol, and methyl octynoate addition to Diesel fuel on combustion and emissions over a wide range of exhaust gas recirculation (EGR) rates*, Applied Energy Volume 112, December 2013, Pages 246–256;
- [7]. Heywood J.B. (1988) - *Internal combustion engine-*

butanol (arderea s-a îmbunătățit datorită vitezei de ardere mai mare a bio-butanolului). La sarcina de 85% la un avans optimizat emisia de CO₂ nu se modifică față de avansul standard (fig. 12).

CONCLUZII

Bio-butanolul reprezintă o soluție alternativă viabilă pentru utilizarea sa drept combustibil la motorul Diesel cu scopul reducerii poluării și creșterii economicității motorului.

Încercările experimentale efectuate pe un motor Diesel cu injecție directă au pus în evidență influența procentului de bio-butanol din amestec cu motorina asupra economicității și emisiilor poluante. Comparativ cu rezultatele motorului standard la funcționarea motorului cu amestec motorină și 20% bio-butanol s-au obținut următoarele:

- consumul specific energetic al motorului s-a redus cu circa 5%;
- presiunea maximă din cilindru scade cu creșterea procentului de bio-butanol din amestec, iar viteza maximă de creștere a presiunii înregistrează o ușoară creștere;
- opacitatea gazelor crește cu conținutul de bio-butanol în amestec cu motorina la sarcină totală, dar scade ușor la sarcina de 85%;
- emisia de NO_x s-a redus semnificativ, de exemplu cu circa 25% la sarcina totală la funcționarea cu avansul la injecție optimizat din acest punct de vedere;
- emisia de CO₂ a scăzut cu circa 10% la $\chi = 1$;
- emisia de CO s-a situat sub limita măsurabilă atât pentru motorină cât și pentru bio-butanolul.

Alimentarea motorului Diesel cu amestec de motorină-bio-butanol reprezintă o metodă relativ ușor de aplicat fără să necesite modificări majore ale construcției motorului. Se impun cercetări pentru a stabili parametrii optimi de reglare pentru a se obține cele mai bune performanțe de economicitate și poluare cu menținerea sau creșterea performanțelor energetice.

MULȚUMIRI

Autorii doresc sa mulțumească companiei AVL List GmbH Graz, Austria, pentru posibilitatea utilizării echipamentului de cercetare.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Ananda Srinivasan, Saravanan C.G. (2010) - *Studiul arderii unui m.a.s. alimentat cu etanol și combustibili oxigenați aditivati*, Jurnalul de Energie Durabilă & Mediu, 85- 91;
- [2]. Anuj Pal, Sahil Gupta (2013) - *Caracteristicile de performanță și emisii ale amestecului izo-butanol-motorină ale unui m.a.c. răcit cu apă lucrând cu EGR și cu răcitor intermediar*, Lucrare Tehnică SAE 2013-24-0151, doi: 10.4271/2013-24-0151;
- [3]. Apostolescu N., Sfințeanu D. (1989) - *Automobilul cu combustibili neconvenționali*, Editura Tehnică, ISBN 973-31-0049-8, București;
- [4]. Aramă C., Grünwald B. (1966) - *Motoare cu ardere internă – procese și caracteristici*, Editura Tehnică, București;
- [5]. Grünwald B. (1980) - *Teoria, calculul și construcția motoarelor pentru autovehicule rutiere*, Editura Didactică și Pedagogică, București;
- [6]. Haifeng Liu, Shanju Li și alții (2013) - *Efecte ale adaosului de n-butanol, 2-butanol și methyl octynoate la motorină asupra arderii și emisiilor pentru diferite procente EGR*, Energie Aplicată, Volumul 112, Decembrie 2013, Pag. 246–256;
- [7]. Heywood J.B. (1988) - *Motor cu ardere internă*

[8]. Miers S.A., Carlson R.W., McConnell S.S., Ng H.K., Wallner T., Esper J.L. (2008) - *Drive cycle analysis of butanol/Diesel blends in a light-duty vehicle*, SAE Paper no. 2008-01-2381;

[9]. Mohammad Ibrahim Al-Hasan, Muntaser Al-Momany (2008) - *The effect of iso-butanol-Diesel blends on engine performance*, Transport, Volume 23, Issue 4, pg. 306-310;

[10]. Mustafa Canakci, Cenk Sayin et al (2009) - *Effect of injection pressure on the combustion, performance, and emission characteristics of a Diesel engine fuelled with methanol-blended Diesel fuel*, Energy Fuels, 23 (6), pg 2908–2920;

[11]. Paolo Sementa, Bianca Maria Vaglieco and Francesco Catapano, "Influence of the injection pressure on the combustion performance and emissions of small GDI engine fuelled with bio-ethanol", SAE Paper Number: 2011-37-0007;

[12]. Popa M.G., Negurescu N., Pană C., "Diesel Engines - Processes", vol. II, Publishing House MatrixRom, ISBN 973-685-621-6, Bucharest, 2003;

[13]. Rakhi N. Mehta, Mousumi Chakraborty et al (2010) - *Evaluation of fuel properties of butanol-bio-Diesel-Diesel blends and their impact on engine performance and emissions*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 49(16), pg 7660–7665;

[14]. Rakopoulos C.D., Dimaratos A.M et al (2010) - *Study of turbocharged Diesel engine operation, pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-Diesel or n-bio-butanol Diesel fuel blends*, Applied Energy, Volume 88, Issue 11, November, Pages 3905–3916;

[15]. Rakopoulos D.C., Papagiannakis R.G. et al (2011) - *Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol Diesel fuel blends in heavy-duty DI Diesel engine*, Fuel Vol. 90, Issue 5, May, Pg. 1855–1867;

[16]. Sathiyagnanam T., Sivaprakasam A.P. et al (2005) - *Investigation on emission characteristics of a Diesel engine using oxygenated fuel additive*, IE(I) Journal MC, Vol. 86;

[17]. Şehmus Altun, Cengiz Öner et al (2011) - *Effect of n-butanol blending with a blend of Diesel and bio-Diesel on performance and exhaust emissions of a Diesel engine*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(15), pg. 9425–9430;

[18]. Zheng Chen, Jingping Liu, Zhenkuo Wu, Chiafon Lee (2013) - *Effects of port fuel injection (PFI) of n-bio-butanol and EGR on combustion and emissions of a direct injection Diesel engine*, Energy Conversion and Management, Volume 76, December, Pg. 725–731;

[19]. Valentino G., Corcione F.E. et al (2012) - *Experimental study on performance and emissions of a high speed Diesel engine fuelled with n-butanol Diesel blends under premixed low temperature combustion*, Fuel 92(1), February, pg. 295-307;

[20]. Venkateswarlu K., Murthy B.S.R et al (2012) - *An experimental investigation on performance, combustion and emission characteristics of Diesel-bio-Diesel blends with iso-butanol as an additive*, SAE Technical Paper number: 2012-28-0011, DOI: 10.4271/2012-28-0011;

[21]. ***<http://www.sciencephoto.com/media.fundamentals>, ISBN 0-07-028637-X, New York;

[8]. Miers S.A., Carlson R.W., McConnell S.S., Ng H.K., Wallner T., Esper J.L. (2008) - *Analiza ciclurilor motoarelor pentru vehicule ușoare alimentate cu amestecuri butanol-motorină*, lucrare Tehnică SAE nr. 2008-01-2381;

[9]. Mohammad Ibrahim Al-Hasan, Muntaser Al-Momany, (2008) - *Efectul amestecului izo-butanol-motorină asupra performanțelor motorului*, Transport, vol. 23, Apariția 4, pag. 306-310;

[10]. Mustafa Canakci, Cenk Sayin și alții (2009) - *Efectul presiunii de injecție asupra arderii, performanțelor și emisiilor unui m.a.c. alimentat cu amestec metanol-motorină*, Combustibili Energie, 23 (6), pag. 2908–2920;

[11]. Paolo Sementa, Bianca Maria Vaglieco și Francesco Catapano (2011) - *Influența presiunii de injecție asupra performanțelor arderii și emisiilor unui m.a.s. cu ID alimentat cu bio-etanol*, Lucrarea SAE Număr: 2011-37-0007;

[12]. Popa M.G., Negurescu N., Pană C. (2003) - *Motoare Diesel - Procese*, vol. II, Editura MatrixRom, ISBN 973-685-621-6, București;

[13]. Rakhi N. Mehta, Mousumi Chakraborty și alții (2010) - *Evaluarea proprietăților amestecurilor de butanol-bioDiesel-motorină și impactul lor asupra performanțelor și emisiilor unui m.a.c.*, Cercetarea în Ingineria Chimică și Industrială, 49(16), pag. 7660–7665;

[14]. Rakopoulos C.D., Dimaratos A.M și alții (2011) - *Studiul funcționării unui motor turbosupraalimentat asupra emisiilor poluante, radiației zgomotului de ardere în timpul pornirii unui m.a.c. la utilizarea amestecurilor n-butanol-motorină*, Energie Aplicată, Volum 88, Apariția 11, Noiembrie, Pag. 3905–3916;

[15]. Rakopoulos D.C., Papagiannakis R.G. și alții (2011) - *Analiza căldurii de degajare a etanolului sau n-butanolului amestecat cu motorina pentru un m.a.c. cu ID pentru vehicule grele*, Combustibil, Vol. 90, Apariția 5, Mai, Pag. 1855–1867;

[16]. Sathiyagnanam T., Sivaprakasam A.P. și alții (2005) - *Investigarea emisiei unui motor Diesel utilizând combustibili oxigenați aditivati*, IE(I) Jurnalul MC, Vol. 86;

[17]. Şehmus Altun, Cengiz Öner și alții (2011) - *Efectul n-butanolului amestecat cu bioDiesel-motorină asupra performanțelor și emisiilor unui m.a.c.*, Cercetarea în Ingineria Chimică și Industrială, 50(15), pag. 9425–9430;

[18]. Zheng Chen, Jingping Liu, Zhenkuo Wu, Chiafon Lee (2013) - *Efectele injecției în poarta supapei a n-butanolului și ale EGR asupra arderii și emisiilor unui motor Diesel cu ID*, Managementul și Conversia Energiei, Vol. 76, Decembrie, pag. 725–731;

[19]. Valentino G., Corcione F.E. și alții (2012) - *Studiul performanțelor și emisiilor unui m.a.c. rapid alimentat cu amestecuri de motorină și n-butanol în condițiile arderii la temperaturi joase a amestecurilor preformate*, Combustibil, 92(1), Februarie, pag. 295-307;

[20]. Venkateswarlu K., Murthy B.S.R și alții (2012) - *Studiul caracteristicilor de performanță, emisiilor unui amestec de motorină-bio-Diesel aditivat cu izo-butanol*, Lucrarea tehnică SAE nr. 2012-28-0011, DOI: 10.4271/2012-28-0011;

[21]. ***<http://www.sciencephoto.com/media.fundamente>, ISBN 0-07-028637-X, New York;