

Mieczysław STRUŚ¹

EFEKTYWNOŚĆ SILNIKÓW SPALINOWYCH O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANYCH PALIWEM BIOXDIESEL Z KOMPONENTAMI CAŁKOWICIE ODNAWIALNYMI

W artykule przedstawiono właściwości fizyko-chemiczne i analizę składu biokomponentów (estrów etylowych i etanolu) oraz właściwości trójkomponentowego paliwa o nazwie Bioxdiesel. Oceniono wpływ tego paliwa na własności użytkowe silników o ZS. Wykazano, że w aspekcie efektywności paliwa pochodzenia roślinnego i z odpadowych tłuszczów zwierzęcych mogą stanowić alternatywne paliwo do silników o ZS.

1. WPROWADZENIE

Bardzo intensywny rozwój przemysłu motoryzacyjnego jako element rozwoju cywilizacji ma znaczącą rolę w tworzeniu negatywnych zmian środowiska naturalnego. Szacuje się, że zanieczyszczenia komunikacyjne stanowią 21% ogólnych zanieczyszczeń, a w dużych aglomeracjach miejskich 75...80% skażeń całkowitych. Istotnym składnikiem emisji związków toksycznych oraz gazów cieplarnianych do atmosfery są tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym (ZS) -silniki Diesela, stanowiące podstawowy rodzaj napędu w transporcie. Ponadto podaż paliw pochodzenia mineralnego stanowi coraz częściej istotny element szantażu gospodarczego i politycznego ze strony państwa eksportera.

Dlatego prowadzone są intensywne prace w zakresie zastąpienia paliw mineralnych wydobywanych z wnętrza ziemi i spalanych na powierzchni na rzecz paliw roślinnych pozyskiwanych na powierzchni ziemi, które wzrastając pochłaniają m. in. CO₂ - jeden z podstawowych gazów cieplarnianych [1],[2].

Dotychczasowe prace w zakresie biopaliw skoncentrowane są głównie na analizach możliwości zasilania silników o ZS surowymi olejami roślinnymi [3], ich estrami lub mieszaninami ON z estrami lub alkoholem [4],[5]. Rezultaty prac [6],[7],[8] prowadzonych także m.in. przez. autora [9],[10],[11],[12],[13],[14],[15] wskazują, że obok FAME (Fatty

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wrocław

* E-mail: mieczyslaw.strus@pwr.edu.pl

Acid Methyl Esters) zastosowanie mogą mieć komponenty etylowe FAEE (Fatty Acid Ethyl Esters).

Bardzo korzystne własności proekologiczne i energetyczne estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych, a zwłaszcza ogromne potencjalne możliwości ich wytwarzania wyłącznie z surowców roślinnych i/lub odpadów produkcji zwierzęcej, a także ogromne możliwości pozyskiwania bioetanolu, zdecydowały o próbie wytworzenia biopaliwa do silników o zapłonie samoczynnym ze znaczącym udziałem biokomponentów etylowych tzn. estrów etylowych i etanolu, które nazwano Biodiesel.

2. METODYKA I WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI FIZYKO-CHEMICZNYCH

2.1. OKREŚLENIE PARAMETRÓW FIZYKO – CHEMICZNYCH SUROWCÓW, BIOKOMPONENTÓW I BIOPALIWA

Przedstawienie przykładowych wartości liczby kwasowej w_{AV} , kwasowości w_{FFA} , liczby nadtlenkowej PV i współczynnika załamania światła n_D odpadowych tłuszczów roślinnych i zwierzęcych podano w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie przykładowych cech fizykochemicznych odpadowych tłuszczów roślinnych i zwierzęcych
Table 1. Comparison of chemical and physical properties of waste vegetable and animal fats

nr próbki	w_{AV}	w_{FFA}	PV	n_D
1	1,07	0,54	0,00060	1,4655
2	2,86	1,44	0,00132	1,4660
3	0,83	0,42	0,00029	1,4665
4	1,56	0,71	0,00169	1,4680
5	2,37	1,08	0,00045	1,4658
6	1,59	0,80	0,00040	1,4723
7	2,79	1,23	0,00067	1,4705

1. Tłuszcz wołowy
2. Tłuszcz wieprzowy
3. Tłuszcz drobiowy
4. Olej palmowy
5. Olej palmowy posmażalniczy
6. Olej rzepakowy
7. Olej rzepakowy posmażalniczy

Podstawowe właściwości fizyko-chemiczne estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych (FAEE), które otrzymano na drodze transestryfikacji etanolem oleju rzepakowego i/lub tłuszczów zwierzęcych z udziałem katalizatora zasadowego, przedstawiono w tabeli 2 wraz z podaniem odpowiednich metod badawczych.

Skład związków tworzących estry etylowe zawarto w tabeli 3, a w tabeli 4 zamieszczono zakresy zawartości składników odwodnionego etanolu.

Tabela 2. Przykładowe właściwości fizykochemiczne estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych
Table 2. Example of chemical and physical properties of ethyl esters of fat acids

Rodzaj oznaczenia	Wynik	Norma
Gęstość w 288 K [kg/dm ³]	0,876	EN ISO 3678
Gęstość w 293 K [kg/dm ³]	0,873	EN ISO 3678
Indeks cetanowy	50	EN ISO 4264
Lepkość kinematyczna w 313 K [mm ² /s]	4,53	EN ISO 3104
Temperatura zapłonu [K]	398	EN 22719
Temperatura mętnienia [K]	261	EN 116
Temperatura krystalizacji [K]	249	EN 116
Temp. zablokowania zimnego filtra [K]	259	EN 116
Zawartość wody [mg/kg]	50	EN ISO 12937
Odporność oksydacyjna [K]	383	EN 14112
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0,3	EN 14104
Liczba jodowa	105	EN 14111
Zaw. kw. linolenowego [%]	9	Metody analityczne
Zaw. estrów wielonienasyconych [m/m %]	0,5	Metody analityczne
Zaw. etanolu [m/m %]	0,17	Metody analityczne
Zaw. całkowita gliceryny	0,22	Metody analityczne
Zaw. potasu [mg/kg]	4	Metody analityczne
Zaw. fosforu [mg/kg]	10	Metody analityczne
Badanie korozyjności [3h at 323 K]	1 a	EN ISO 2160
Zaw. siarki	nie zawiera	Metody analityczne
Zaw. estrów etylowych wkt [%]	99,5	EN 14103

Tabela 3. Przeciętny skład REE
Table 3. Average content of REE

Zawartość	Zawartość masowa [%]
Oleinian etylu	87,30
Ester etylowy kwasu heksadekanoinowego	7,90
Ester cyklopentanon -2- hydrodeconinowego kwasu	2,25
Ester etylowy kwasu hyptadekainowego	1,00
Ester etylowy kwasu aceta decanoinowego	0,50
Ester etylowy kwasu palimitynowego	0,35
Ester etylowy kwasu stearynowego	0,48
Zawartość sumaryczna wolnych kwasów wkt	0,22

Tabela 4. Zawartości składników etanolu
Table 4. Content of ethanol

Moc alkoholu w 20°C, % obj.	99,8 ÷ 99,9
Zawartość związków karbonylowych w przeliczeniu na aldehyd octowy, w g/dm ³ spirytusu 100%	0,09 ÷ 0,2
Zawartość fuzli w przeliczeniu na mieszaninę alkoholu amyłowego, propanolowego, butanolowego w g/dm ³ spirytusu 100%	2,0 ÷ 3,2
Zawartość alkoholu metylowego w g/100ml spirytusu 100%	0,01 ÷ 0,03
Zawartość kwasu w przeliczeniu na kwas octowy w g/dm ³ spirytusu 100% po gazyfikacji	0,006 ÷ 0,01
Zawartość kwasu w przeliczeniu na kwas octowy w g/dm ³ spirytusu 100% przed gazyfikacją	0,2 ÷ 0,3
Zawartość wody, m/m %	0,057 ÷ 0,18
Pozostałość po odparowaniu, g/dm ³ spirytusu 100%	0,003 ÷ 0,005

3. EFEKTYWNOŚĆ SILNIKÓW ZASILANYCH PALIWEM BIOXDIESEL

Badania silników o zapłonie samoczynnym obejmowały pełną diagnostyczną ocenę momentu obrotowego silnika, pomiary zadymienia spalin, a także badania eksploatacyjne pojazdów oraz pomiary w komorze termoklimatycznej.

3.1. BADANIA EFEKTYWNOŚCI PRACY SILNIKÓW

Do badań porównawczych użyto paliwa Biodiesel z proporcjami ON+(REE/EtOH=5), a także standardowego paliwa ON zgodnego z normą PN EN 590. Porównanie właściwości biopaliwa trójskładnikowego Biodiesel zawierającego ON, estry etylowe o cechach przedstawionych w tabeli 2 i 3 i odwodnionego etanolu (tabela 4.) z właściwościami fizykochemicznymi dla czystego ON zgodnie z normą PN EN 590 zawarto w tabeli 5.

Tabela 5. Podstawowe właściwości paliwa Biodiesel
Table 5. Basic properties of Biodiesel fuel

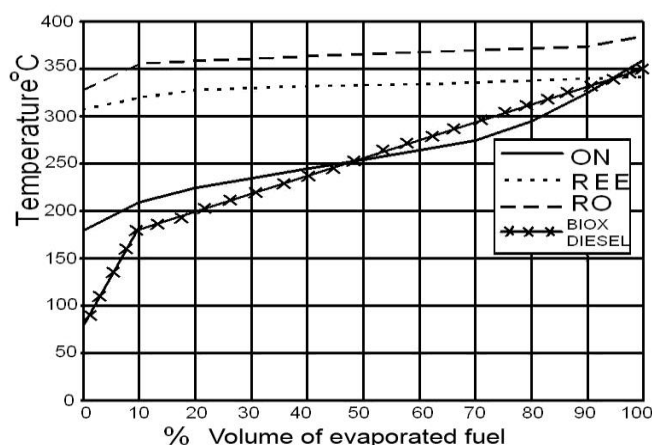
Parametr	Biodiesel	Wymagania dla ON wg PN EN 590
Gęstość w 15°C	0,844kg/dm ³	0,820...0,845kg/dm ³
Liczba cetanowa	50	min. 46
Lepkość kinematyczna	2,39mm ² /s	2...4,50mm ² /s
Temperatura zapłonu	26 °C	>55 °C
Temperatura mętnienia	-23 °C	< -10 °C
Temperatura krystalizacji	-37 °C	< -24 °C
Temperatura blokady zimnego filtra	-33 °C	< -20 °C
Smarność [HFRR]	200µm	max 460µm
Zawartość wody	97mg/kg	max 200mg/kg
Analiza frakcyjna		
to 250°C	42%	max 65%
to 350°C	98%	min 85%
to 370°C	---	
Zawartość siarki	< 0,01%	< 0,01%
Badania korodujące	1a	1a

Analiza właściwości Biodiesel przedstawionych w tabeli 4 wykazuje, że paliwo to spełnia wymogi jak dla ON z wyjątkiem temperatury zapłonu – co ma jedynie znaczenie logistyczne;

Paliwo to cechuje się lepszymi właściwościami smarnymi niż ON, mierzonymi zarówno metodą HFRR i SL BOCLE spełniając normy smarnościowe określone w zaleceniach amerykańskich oraz europejskich, co wpływa korzystnie na trwałość i niezawodność pracy silników;

Paliwo to ma także znacznie lepsze własności niskotemperaturowe, co ma znaczenie w okresie eksploatacji zimowej.

Podstawowe różnice własności paliwa Biodiesel i oleju napędowego przedstawiają krzywe wrzenia rys. 1, na którym dodatkowo umieszczono krzywe wrzenia dla estru etylowego oleju napędowego i surowego oleju rzepakowego.



Rys. 1. Krzywe wrzenia

Fig. 1. Boiling graphs

Efektywność pracy silnika określono na podstawie pomiarów jego charakterystyk dynamicznych, które przedstawiają przebieg momentu obrotowego wytwarzanego przez silnik przy zmianie prędkości obrotowej wału korbowego, spowodowanej szybkim dostarczeniem do wnętrza cylindrów paliwa prawie w całości przeznaczonego na pokonanie oporów bezwładności silnika (odbiornik energii odłączony).

Zmianę momentu obrotowego wytwarzanego opisuje równanie (1):

$$M_o = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \varepsilon \quad (1)$$

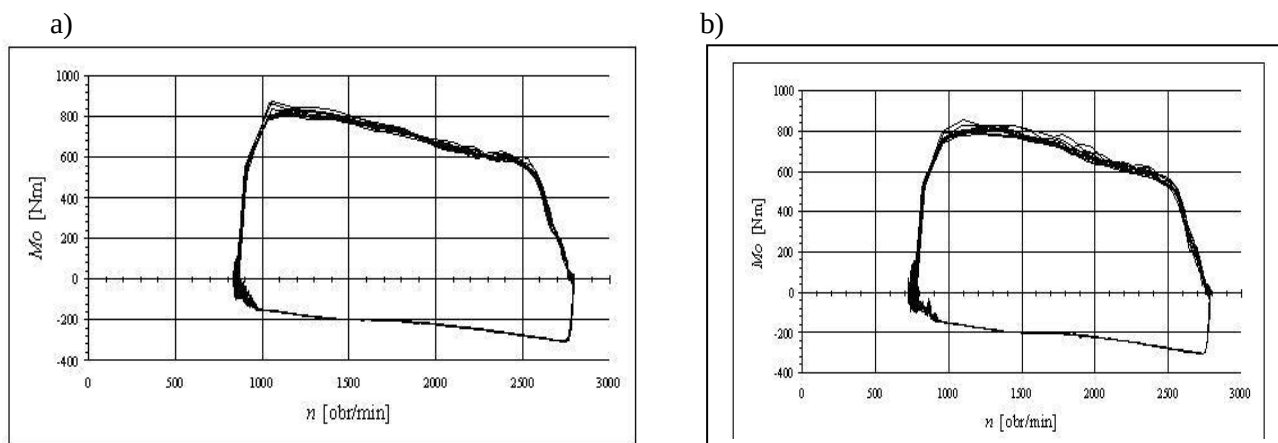
gdzie: ε – chwilowe przyspieszenie wału korbowego silnika;

J – biegunowy moment bezwładności obrotowych mas silnika sprowadzony do osi wału korbowego.

Badaniom poddano silnik napędowy UTD-20 o następujących parametrach: układ cylindrów V120/6; pojemność silnika – 15,9dm³; rodzaj wtrysku paliwa - bezpośredni, ilość zaworów na cylinder – 4; maksymalna moc – 220kW przy 2600obr/min., układ chłodzenia – cieczowy. Silnik ten zasilany był kolejno ON i paliwem Biodiesel. Portrety fazowe (dynamiczne charakterystyki prędkościowe) ilustrujące pola podaży energii z 24 prób akceleracji od $n_{\min}$ do $n_{\max}$ przedstawiono na rys. 2.

Analiza kształtu i pól powierzchni otrzymanych w wyniku kilkudziesięciu badań dowodzi, że w stanach nieustalonych pracy silnika, podczas dynamicznego rozpędzania wału korbowego silnika, wartość generowanej energii jest quasi identyczna przy stosowaniu paliwa Diesel i Biodiesel.

Badania dotyczyły również badań silników autobusów komunikacji miejskiej pracujących w rzeczywistych warunkach, a zasilanych paliwami ON i Biodiesel.



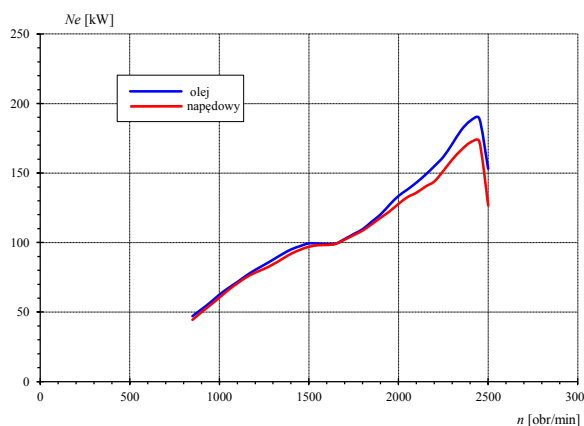
Rys. 2. Pola podaży energii silnika UTD-20 zasilanego ON (a) i Bioxdiesel(b)
 Fig. 2. Field energy generation of the UTD-20 engine fueled with standard diesel fuel (a) and Bioxdiesel (b)

Podstawowe parametry silników autobusów poddanych badaniom podano w tabeli 6, a przykładowe porównanie parametrów efektywnych przedstawiono na rys. 3.

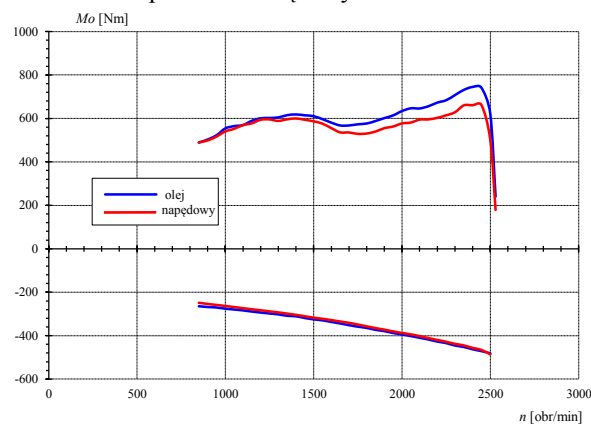
Tabela 6. Podstawowe parametry silników
 Table 6. Basic parameters of engines

Właściwości	Silnik	
	Volvo D7C275(290)	Man D0826LUH05
Układ cylindrów	rzędowy, stojący, 6	rzędowy, leżący, 6
Pojemność skokowa [dm ³]	7,284	6,871
Max moment obrotowy [Nm]	1200/1200	850/1300-1500
Max moc [kW]	213/2200	169/2400
System wtrysku	wtrysk bezpośredni	wtrysk bezpośredni
Typ komory spalania	toroidalna w tłoku	toroidalna w tłoku
Stopień sprężania	19,5:1	17:1
System chłodzenia	cieczowy	cieczowy

a) porównanie wartości mocy



b) porównanie wartości momentu obrotowego i oporów wewnętrznych



Rys. 3. Efektywność silnika Volvo
 Fig. 3. Efficiency of Volvo engine

Tę samą metodę (swobodnego przyspieszania) zastosowano przy pomiarach zadymienia spalin, czyli rozmiaru zjawiska polegającego na zmniejszeniu przeźroczystości mieszaniny gazowych składników spalin wskutek zawartości w nich pewnej ilości substancji ciekłych i stałych. Zadymienie spalin jest wskaźnikiem zawartości sadzy w spalinach, a jej ilość zależy od jakości procesu spalania paliwa.

Uzyskane wartości są mniejsze niż dopuszczalna wartość maksymalna tego współczynnika, obowiązująca podczas badań technicznych pojazdów (dla silnika turbodoładowanego 3m^{-1}).

Tabela 7. Średnia wartość zadymienia spalin (współczynnika k_{bd}) przy zasilaniu silnika paliwem Bioxdiesel w porównaniu do wartości średniej zadymienia (współczynnika k_D) przy zasilaniu ON [%].

Table 7. Average smoke parameters in exhausts (coefficient k_b) fueled with Bioxdiesel fuel compared with average value of smokes in exhaust gases (coefficient k_D) for engines fueled with standard diesel fuel

Nr autobusu	8057	9023	8059
Silnik	VOLVO D7C275(290)	Man D0826LUH05	Volvo D7C275(290)
k_{bd}/k_D [%]	48,4	43,1	43,6

Wykonane badania (Tabela 7) wykazały, że przy zasilaniu badanych silników paliwem eksperymentalnym zadymienie spalin jest znacznie mniejsze niż przy zasilaniu tego samego silnika olejem napędowym. Uzyskana średnia wartość zadymienia spalin (współczynnika ekstynkcji) jest dla wszystkich silników zasilanych paliwem badawczym o ponad 50% mniejsza niż wartość średnia zadymienia spalin (współczynnika ekstynkcji) uzyskana dla oleju napędowego.

Uzyskane rezultaty badań trakcyjnych potwierdziły tezę o porównywalnych parametrach eksploatacyjnych silników pojazdów zasilanych paliwem eksperymentalnym i paliwem standardowym w zakresie przyspieszeń pojazdów, zużycia paliwa i niezawodności funkcjonowania.

4. WNIOSKI

Porównanie kształtów i wymiarów cyklodyn wykazało quasi identyczną wartość generowanej energii w stanach nieustalonych pracy silnika (podczas dynamicznego rozpędzania wału korbowego silnika) jak przy zasilaniu olejem napędowym.

LITERATURA

- [1] DEMIRBAS A., 2001, *Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals*, Energy Convers Manage, 42, 1357–78.
- [2] REIJNDERS L., 2006, *Conditions for the sustainability of biomass based fuel use*, Energy Policy, 34, 863–76.
- [3] SZLACHTA Z., 1998, *Cold startability of the diesel engine fuelled with rape fuels*, Polish academy of Sciences – Cracow Branch. Edit. Commission of Motorization, Cracow, 13/1, 1–67.

- [4] MURUYAMA T., OH Y., MIYAMOTO N., CHIKAHISA T., TAKAGI N., ITOW K., 1984, *Low carbon flower buildup, low smoke, and efficient diesel operation with vegetable oils by conversion to mono-esters and blending with diesel oil or alcohols*, SAE Transactions, 84, 1161.
- [5] ALAMU O.J., WAHEED M.A., JEKAYINFA S.O., 2008; *Effect of ethanol- palm kernel oil ratio on alkali – catalized biodiesel yield*, Fuel, 87, 1529–1533.
- [6] BALA B.K., 2005, *Studies on biodiesels from transformation of vegetable oils for diesel engines*, Energy Edu Sci Technol., 15, 1–43.
- [7] ZHANG Y., DUB M.A., MCLEAN D.D., KATES M., 2003, *Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis*, Bioresource Technol, 90, 229–40.
- [8] LIMA J.R.O., SILVA R.B., MOURA E.M., MOURA C.V.R., 2008, *Biodiesel of tucum oil, synthesized by methanolic and ethanolic routes*, Fuel, 87, 1718–1723.
- [9] STRUŚ M., KOWALSKI K., 1995, *Fuel from rapeseed using in combat vehicles, Proecological combustion engines*, Szczecin University of Technology, Szczecin.
- [10] STRUŚ M., 2001, *Feeding of multicapacity diesel engines by plant origin fuels*, II International Scientifically Technical Conference, Explo-Diesel and Gas Turbine, Gdańsk – Kopenhaga.
- [11] STRUŚ M., 2001, *Diesel motors of combat vehicles in the aspect of their alternative feeding by vegetable fuels*, 8-The European Automotive Congress, Europe And The Second Century of Auto-Mobility, Bratislava.
- [12] STRUŚ M., 2002, *Alternative feeding of Diesel engines, Problems of maintenance of power units*, KONSSPAL 2002, TKMA, Wrocław.
- [13] STRUŚ M., 2005, *The efficiency of use of biodiesel and biocomponents for internal combustion engines*, Journal of KONES, Internal combustion engines, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw, 12/3–4.
- [14] KOŁODZIEJ H., PIĘTAK A., STRUŚ M., VOGT A., 2006, *Properties of biofuels with ethyl components to diesel engines*, Journal of KONES, Powertrain and Transport Publication, Warsaw, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, 13/3.
- [15] STRUŚ M., 2012, *Ocena wpływu biopaliw na wybrane właściwości eksploatacyjne silników o zapłonie samoczynnym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

EFFICIENCY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH COMPRESSION IGNITION FUELLED WITH BIOXDIESEL FUEL WITH FULLY RENEWABLE COMPONENTS

The article presents the physico-chemical properties and analysis of biocomponents' composition (ethyl esters and ethanol) and properties of three-component fuel named Biodiesel. The influence of this fuel on utility properties of Diesel engines was evaluated. It has been shown that the fuels produced from plant and animal's waste fats, in terms of the efficiency of the engines may provide an alternative fuel for Diesel engines.

Keywords: *biofuels, biocomponents, renewable sources of energy, energy self-sufficiency*