

## ANALIZA ZMIAN PARAMETRÓW PRACY SILNIKA O ZS ZASILANEGO MIESZANINĄ OLEJU NAPĘDOWEGO I ESTRÓW ETYLOWYCH OLEJU RZEPAKOWEGO

### ANALYSIS OF WORK PARAMETERS CHANGES OF DIESEL ENGINE POWERED WITH DIESEL FUEL AND FAE E BLENDS

*W pracy przedstawiono analizę wpływu mieszanin paliwowych zawierających estry etylowe oleju rzepakowego (FAEE) na parametry pracy silnika o ZS. Badania przeprowadzono na silniku typu 2CA90 zainstalowanym na stanowisku dynamometrycznym. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie do zasilania mieszanek paliwowych zawierających 1-5% estrów etylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego powoduje zmianę parametrów energetycznych pracy silnika wysokoprężnego.*

**Słowa kluczowe:** paliwa silnikowe, biopaliwa, olej rzepakowy, estry etylowe.

*Analysis of influence of fuel blends containing rape oil esters (FAEE) on diesel engine work parameters were presented in this paper. Research was conducted on engine type 2CA90 installed on dynamometric stand. Relying on undertaken research it was noted that utilization of fuel blends containing 1-5% of fatty acids ethyl esters causes changes of energetic work parameters of diesel engine.*

**Keywords:** engine fuel, biofuel, rape oil, ethyl esters.

#### 1. Wprowadzenie

Konieczność spełnienia coraz ostrzejszych wymagań dotyczących ekologii zmusza z jednej strony do doskonalenia rozwiązań konstrukcyjnych silników spalinowych, a z drugiej do poszukiwań takich paliw, które ograniczają emisję szkodliwych substancji. Jednym ze sposobów jest wykorzystanie do zasilania silników biopaliw w postaci czystej, bądź jako bio-komponentów paliw konwencjonalnych. Pozwala to zmniejszyć zagrożenie dla środowiska przyrodniczego, tak w ujęciu globalnym jak i w miejscu eksploatacji pojazdu. Zastosowanie biopaliw oprócz korzyści ekologicznych daje wymierne efekty gospodarcze w postaci szerszego rynku zbytu dla produktów rolniczych [5].

Powszechnie jako biokomponent olejów napędowych wykorzystuje się estry wyższych kwasów tłuszczowych olejów roślinnych otrzymywane z oleju rzepakowego, sojowego czy też palmowego w procesie transestryfikacji. Proces transestryfikacji (przestryfikowania) polega na zastąpieniu grupy glicerynowej grupą alkoholową. Alkohole, które mogą zostać użyte w procesie transestryfikacji to: metanol, etanol, propanol, butanol i alkohol amylov. Spośród wymienionych alkoholi najczęściej wykorzystywany jest alkohol metylowy, a rzadziej etylowy. Za stosowaniem alkoholu metylowego przemawia jego niski koszt i korzystne właściwości fizyczne oraz chemiczne [4]. Wprowadzenie do przemysłowej produkcji estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (FAME), wymagało ujednoczenia jakości tego paliwa. W związku z tym opracowano dla nich normę europejską EN 14214:2004 [2].

Alternatywę dla estrów metylowych mogą stanowić estry etylowe (FAEE) wytwarzane w oparciu o alkohol etylowy. Jego wykorzystanie jest jednak do tej pory ograniczone, co wynika głównie z ceny etanolu, jak również z konieczności jego głębokiego odwodnienia ( $\leq 0,2\% \text{H}_2\text{O}$ ) wymaganego w procesie transestryfikacji [3].

#### 1. Introduction

Necessity of fulfilling more and more strict regulations concerning ecology forces improvement of internal combustion engines construction on one hand, and on the other search for fuels which limit emission of harmful substances. Combustion of biofuel in engines both in its pure form or as bio-components added to conventional fuels is one of the methods of obtaining this goal. It enables decrease of threat to environment, both globally and on site where machinery is operated. Utilization of biofuel creates not only significant ecological benefits but also economical effect – market for agricultural products [5].

The most commonly used bio-components in diesel fuel (DF) are higher fatty acids esters obtained from rape, soy or palm oil in process of transesterification, which is the process of exchanging the glycerine group of an ester compound by another alcohol group. Alcohols which can be used in this process are: methanol, ethanol, propanol, butanol and amyl alcohol. Among all these, methanol is the most commonly used one, while ethanol is used less frequently. Reasons for methanol utilization are its favourable physical and chemical properties and low cost [4]. Introduction of rape oil fatty acid methyl esters (FAME) into industrial production required standardization of this fuel, therefore, European norm EN 14214:2004 was elaborated [2].

Fatty acid ethyl esters (FAEE) can be considered an alternative for FAME, however, their utilization is limited by the price of, used during their production, ethyl alcohol and by necessity of, required during transesterification, its deep dehydration ( $\leq 0,2\% \text{H}_2\text{O}$ ) [3].

Ethyl esters fulfil all requirements set for FAME as fuel for diesel engines. Moreover, they have slightly greater than FAME heat value, which results from presence of one more carbon atom in their particle. Products of incomplete combustion of FAEE do not contain formaldehydes formed during FAME in-

Estry etylowe w pełni spełniają wszystkie wymagania jakie stawiane są estrom metylowym jako paliwom do silników o ZS. Ponadto posiadają nieco wyższą od estrów metylowych wartość opałową ze względu na obecność w jego cząsteczce jednego więcej atomu węgla. Produkty niepełnego spalania estrów etylowych nie zawierają formaldehydu tworzących się podczas procesów spalania estrów metylowych. Ponadto estry etylowe charakteryzują się niższą od estrów metylowych temperaturą krzepnięcia, co ma wpływ na właściwości niskotemperaturowe paliwa.

Paliwa estrowe różnią się od oleju mineralnego właściwościami fizykochemicznymi, dlatego w przypadku ich mieszania będą zmieniały się parametry tych paliw. Zmiana właściwości fizykochemicznych paliwa wiąże się również ze zmianą parametrów pracy silnika [1]. Prezentowane w różnych publikacjach wyniki stosowania estrów metylowych oleju rzepakowego w postaci czystej lub w mieszaninie z olejem napędowym do zasilania silników o ZS są na ogół zbliżone. Badania przeprowadzone na silnikach różniących się systemami spalania, mocą prędkością i obrotową wykazały, że dodatek biokomponentu do oleju napędowego wywiera wpływ na moc efektywną silnika, powodując redukcję wskaźników pracy w całym zakresie prędkości o ok. 5-15% i znaczący wzrost zużycia paliwa ok. 15% [3,6,7]. Brak natomiast danych dotyczących skutków stosowania mieszanin o udziale biokomponentu poniżej 5%.

Celem prezentowanych badań jest ocena wpływu zastosowania mieszanin paliwowych zawierających 1-5% objętościowo estrów etylowych oleju rzepakowego (FAEE) na parametry pracy silnika zasilanego takim paliwem.

## 2. Metodyka badań

Obiektem badań eksperymentalnych były mieszaniny mineralnego oleju napędowego z estrami etylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. Estry mieszano z olejem napędowym ustalając odpowiednie udziały objętościowe w mieszaninie paliw, dzięki czemu otrzymano paliwa o następującym składzie i oznaczeniu:

- D1 – mieszanina 1% FAEE, 99% ON;
- D2 – mieszanina 2% FAEE, 98% ON;
- D3 – mieszanina 3% FAEE, 97% ON;
- D4 – mieszanina 4% FAEE, 96% ON;
- D5 – mieszanina 5% FAEE, 95% ON.

Mieszaniny, po analizie fizykochemicznej potwierdzającej zgodność z normą PN EN 590, zostały wykorzystane na stanowisku dynamometrycznym do zasilania silnika 2CA90 celem wyznaczenia jego parametrów energetycznych.

Do przygotowania mieszanin wybrano olej napędowy handlowy Ekodiesel Ultra F oraz ester etylowy kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (FAEE) pochodzący z instalacji doświadczalnej.

Olej napędowy Ekodiesel Ultra F jest paliwo o niskiej zawartości siarki, charakteryzujące się wysokim wskaźnikiem jakości spalania i wysoką liczbą cetanową. Paliwo to należy do gatunku F paliw zimowych. Paliwo to odpowiada wymaganiom ZN/ITN-ORLEN/NF-229/2004 oraz wymaganiom normy PN-EN 590 („Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań.”). Ze względu na brak normy dotyczącej wymagań jakościowych estrów etylowych, określono tylko najważniejsze parametry i odniesiono je do normy PN-EN 590. Wymagania oraz wyniki badań próbek oleju napędowego i estrów zostały przedstawione w tabeli 1.

Moreover, ethyl esters characterise with lower than methyl esters solidification temperature, what affects fuel's low temperature properties.

Ester fuels has different than mineral oil physicochemical properties, therefore, mixing these two changes parameters of fuel, which results in changes of engine work conditions [1]. Presented in various publications results of utilization of FAME or their mixtures with diesel fuel and combusted in diesel engines are usually similar. Research conducted on engines using various combustion systems, characterizing with various power and working with various RPM showed that addition of biocomponent into diesel fuel influences engine's effective power, causing reduction of work parameters in whole range of speeds from 5 to 15% and significant, about 15%, increase of fuel consumption [3,6,7]. However, there is no data concerning results of utilization of fuel mixtures containing less than 5% of biocomponent.

Assessment of influence of fuel blends, containing from 1 to 5% of rape oil methyl esters (FAEE), on work parameters of engine powered with such fuel is goal of presented research.

## 2. Material and methods

Object on which research was conducted were blends of mineral diesel fuel and rape oil fatty acids ethyl esters (FAEE). Ethyl esters were mixed with diesel fuel, proportions were set by volume of each, and following blends were obtained:

- D1 –1% FAEE, 99% ON;
- D2 –2% FAEE, 98% ON;
- D3 –3% FAEE, 97% ON;
- D4 –4% FAEE, 96% ON;
- D5 –5% FAEE, 95% ON.

Blends, after undergoing physicochemical analysis confirming conformity with PN EN 590:2006 norm, were used on dynamometric stand as fuel for 2CA90 engine in order to determine its energetic parameters.

Blends were prepared on basis of, available in trade, diesel fuel Ekodiesel Ultra F and rape oil fatty acids ethyl esters (FAEE) obtained from experimental installation.

Ekodiesel Ultra F is diesel fuel which contains little sulphur and characterizers with high indicator of combustion quality and high cetane number, and is classified to group F winter fuel. It fulfills requirements stated in ZN/ITN-ORLEN/NF-229/2004 and PN-EN 590 norms (“Fuels for vehicles. Diesel fuels. Requirements and research methods”). Due to lack of standards concerning ethyl esters quality, only their most important parameters were determined and referred to PN-EN 590 norm. Requirements and results of diesel fuel samples analyses were presented in table 1.

Badania parametrów energetycznych zrealizowano na stanowisku badawczym w laboratorium Katedry Energetyki i Pojazdów AR w Lublinie. Stanowisko badawcze składało się z następujących urządzeń:

- silnika spalinowego o ZS typu 2CA90;
- hamulca elektrowrowowego AMX 210;
- układu kontrolno-pomiarowego AMX 201, AMX 211;
- zestawu pomiarowego zużycia paliwa;
- układu pomiarowego stanu silnika: temperatury spalin -  $t_{sp}$ , temperatury oleju silnikowego -  $t_{ol}$ , ciśnienia oleju -  $p_{ol}$ ;
- układu pomiarowego stanu otoczenia: temperatury otoczenia -  $t_{ot}$ , ciśnienia atmosferycznego -  $p_a$  i wilgotności powietrza -  $\varphi$ .

Schemat stanowiska badawczego zawierającego poszczególne urządzenia, przedstawiono na rys. 1.

Badania parametrów energetycznych polegały na wykonaniu zgodnie z PN dla każdego z badanych paliw pomiarów, które pozwalały na opracowanie danych niezbędnych do wykreślenia charakterystyk zewnętrznych w zakresie od prędkości obrotowej minimalnej silnika do prędkości nominalnej. W badaniach pomiarami objęto parametry kinematyczne i dynamiczne silnika: moment obrotowy -  $M_o$ , prędkość obrotowa -  $n$ , czas zużycia dawki pomiarowej paliwa -  $\tau$ . Dawka pomiarowa paliwa przy sporządzaniu charakterystyki wynosiła 50 g. Metodykę pomiarów i sposób redukcji parametrów mocy i momentu obrotowego dostosowano do norm: PN-78/S-02005, PN-88/S-02005, BN-79/1374-03 i BN-74/1340-12.

Analiza statystyczna wyników badań obejmowała ocenę zmienności parametrów energetycznych, analizę istotności różnic pomiędzy wartościami tych parametrów oraz wyznaczenie,

The marking of energetic parameters was performed in the test bench of the research laboratory in the Department of Power Engineering and Vehicles of the Agricultural University of Lublin. The test bench included following apparatuses:

- diesel engine 2CA90;
- electro whirl brake AMX 210;
- control and measurement system AMX 201, AMX 211;
- fuel consumption measurement system;
- engine's measurement system: fume's temperature  $t_{sp}$ , oil's temperature and oil's pressure  $p_{ol}$ ;
- surroundings measurement system: surroundings temperature  $t_{ot}$ , atmospheric pressure and air humidity  $\varphi$ .

Fig. 1. presents a diagram of the test bench containing the particular apparatuses.

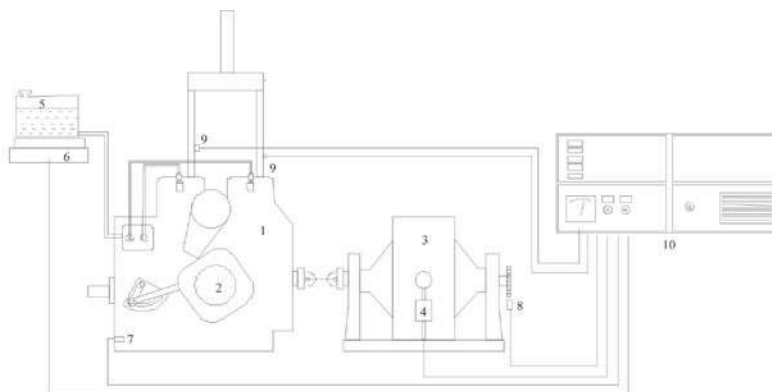
Investigation of energetic parameters was based on set of measurements conducted for each of investigated fuels with regard to PN norm, which enabled elaboration of data essential for determining external characteristics with engine's rotation speed ranging from minimal to nominal. In this research following kinematic and dynamic parameters of engine: torque -  $M_o$ , rotation speed -  $n$ , time in which set amount of fuel was used -  $\tau$ . Amount of fuel used in determination of this parameter was 50 g. Methodology of measurements and methods of torque and power reductions were conformed to following norms: PN-78/S-02005, PN-88/S-02005, BN-79/1374-03 and BN-74/1340-12.

Statistical analysis of research results embraced assessment of variation of energetic parameters, significance analysis of differences between value of these parameters and determination, based on curvilinear regression method, of function dependencies. Analysis of biocomponent addition influence on

Tab. 1. Właściwości oleju napędowego Ekodiesel ultra F i estrów etylowych w odniesieniu do normy PN EN 590:2006

Tab. 1. Properties of Ekodiesel Ultra F diesel fuel and ethyl esters and their reference to PN EN 590:2006 norm

Parametr Property	Jednostka miary Unit	Wymagania wg normy Requirements by norm PN-EN 590:2002	Wartość oznaczona dla ON Marked value to DF	Wartość oznaczona dla FAEE Marked value to FAEE
Liczba cetanowa / Cetane number	-	min. 51,0	53,1	-
Indeks cetanowy / Cetane index	-	min. 46,0	54,0	n.d.
Gęstość w temp. 15 °C / Density at 15 °C	kg · m <sup>-3</sup>	820-845	835	873
Lepkość w temp. 40 °C / Viscosity at 40 °C	mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	2,0-4,5	2,8	4,16
Skład frakcyjny: do 250 °C destyluje / Distillation recovered at 250 °C do 350 °C destyluje / Distillation recovered at 350 °C 95% obj. destyluje do temperatury / 95%(V/V) recovered at	% obj. % obj. °C	max 65 min. 85 max 360	33 95 350	n.b.
Temperatura zapłonu / Flash point	°C	min. 55	61	60
Zawartość siarki / Sulphur content	mg · kg <sup>-1</sup>	max 350	9,6	n.d.
Zawartość WW A / Polycyclic aromatic hydrocarbons	% masy	max 11	2,1	n.d.
Smarność (średnica śladu zużycia) / Lubricity, corrected wear scar diameter (wsd 1,4) at 60 °C	µm	max 460	351	n.d.
Odporność na utlenianie / Oxidation Stability	g · m <sup>-3</sup>	max 25	6,0	n.d.
Pozostałość po spopieleniu / Ash content	% masy	max 0,01	0,001	-
Badanie działania korodującego na płycie miedzi, w 50 °C, 3 h / Copper strip corrosion (3 hours at 50 °C)	stopień korozji	Nr I	1	-
Pozostałość po koksowaniu (z 10% pozostałości po destylacji) / Carbon residue (on 10% distillation residue)	% masy	max 0,30	0,01	n.d.
Zawartość wody / Water content	mg · kg <sup>-1</sup>	max 200	65	80
Zawartość zanieczyszczeń / Total contamination	mg · kg <sup>-1</sup>	max 24	11	8



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik 2CA90, 2 – serwomechanizm położenia organu sterowania silnikiem, 3 – hamulec elektrowirowy AMX 210, 4 – tensometr, 5 – zbiornik paliwa, 6 – waga do pomiaru zużycia paliwa, 7 – czujnik temperatury oleju silnikowego, 8 – czujnik prędkości obrotowej, 9 – czujnik temperatury spalin, 10 – pulpit kontrolno-pomiarowy

Fig. 1. Test bench diagram: 1 – 2CA90 engine, 2 – engine control, 3 – AMX 210 electro whirl brake, 4 – tensometer, 5 – fuel tank, 6 – scales for measuring fuel consumption, 7 – oil temperature sensor, 8 – engine speed sensor, 9 – exhaust emission temperature sensor, 10 – control measurement panel

w oparciu o metodę analizy regresji krzywoliniowej, zależności funkcyjnych. Analizę wpływu dodatku biokomponentu na parametry energetyczne przeprowadzono metodą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), a ocenę istotności różnic między badanymi paliwami a olejem napędowym, dokonano przy użyciu najmniejszych różnic Tukey'a (NIR) na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

### 3. Wyniki badań i dyskusja

Wpływ dodatku biokomponentu na parametry energetyczne oceniano na podstawie wykonanych charakterystyk zewnętrznych przy zasilaniu silnika przygotowanymi do badań mieszaninami. Zmiany odnoszono do charakterystyk wykonanych dla silnika zasilanego ON. Dla celów porównawczych wykonano pomiary dla silnika zasilanego czystymi estrami, jednak wyniki te nie są prezentowane na charakterystykach, a wykorzystano je tylko do oceny względnej zmiany parametrów energetycznych.

Wpływ dodatku estrów etylowych do oleju napędowego na moment obrotowy, moc, jednostkowe i godzinowe zużycie paliwa został przedstawiony na rysunku 2.

Analizując przebiegi krzywych momentu obrotowego przedstawionych na rys. 2a można stwierdzić, że wprowadzenie biokomponentu do oleju napędowego powoduje zmniejszenie jego wartości przy zachowaniu zbliżonego charakteru przebiegu. Największe straty wartości momentu widać dla paliwa o największym udziale biokomponentu.

Wzrost zawartości biokomponentu w mieszaninie powoduje spadek mocy silnika, co widać na charakterystykach przedstawionych na rys. 2b. Straty mocy rosną wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Najmniejsze straty są widoczne przy małych prędkościach, zaś największe przy prędkościach maksymalnych.

Krzywe godzinowego zużycia paliwa dla mieszanek paliwowych mają podobny przebieg jak dla oleju napędowego (rys. 2c). Zauważono tylko przesunięcie krzywych w kierunku większych wartości. Zmiany są najbardziej widoczne od 2% dodatku biokomponentu. Dla paliwa D1 w zakresie prędkości obrotowej 1500-2700 obr  $\cdot$  min<sup>-1</sup> krzywa pokrywa się z krzywą oleju napędowego, natomiast powyżej tej prędkości zaobser-

energetic parameters was conducted by means of univariate variance analysis (ANOVA), and estimation of differences significance between investigated fuels and diesel fuel by means of Tukey's least significant difference (LSD) with significance level  $\alpha = 0.05$ .

### 3. Results and discussion

Effects of biocomponent addition on energetic parameters were assessed relying on external characteristics determined during operation of engine powered with investigated fuel blends. They were referred to characteristics elaborated during operation of engine powered with pure esters, however, these results are not presented in characteristics, but used only in relative evaluation of energetic parameters change.

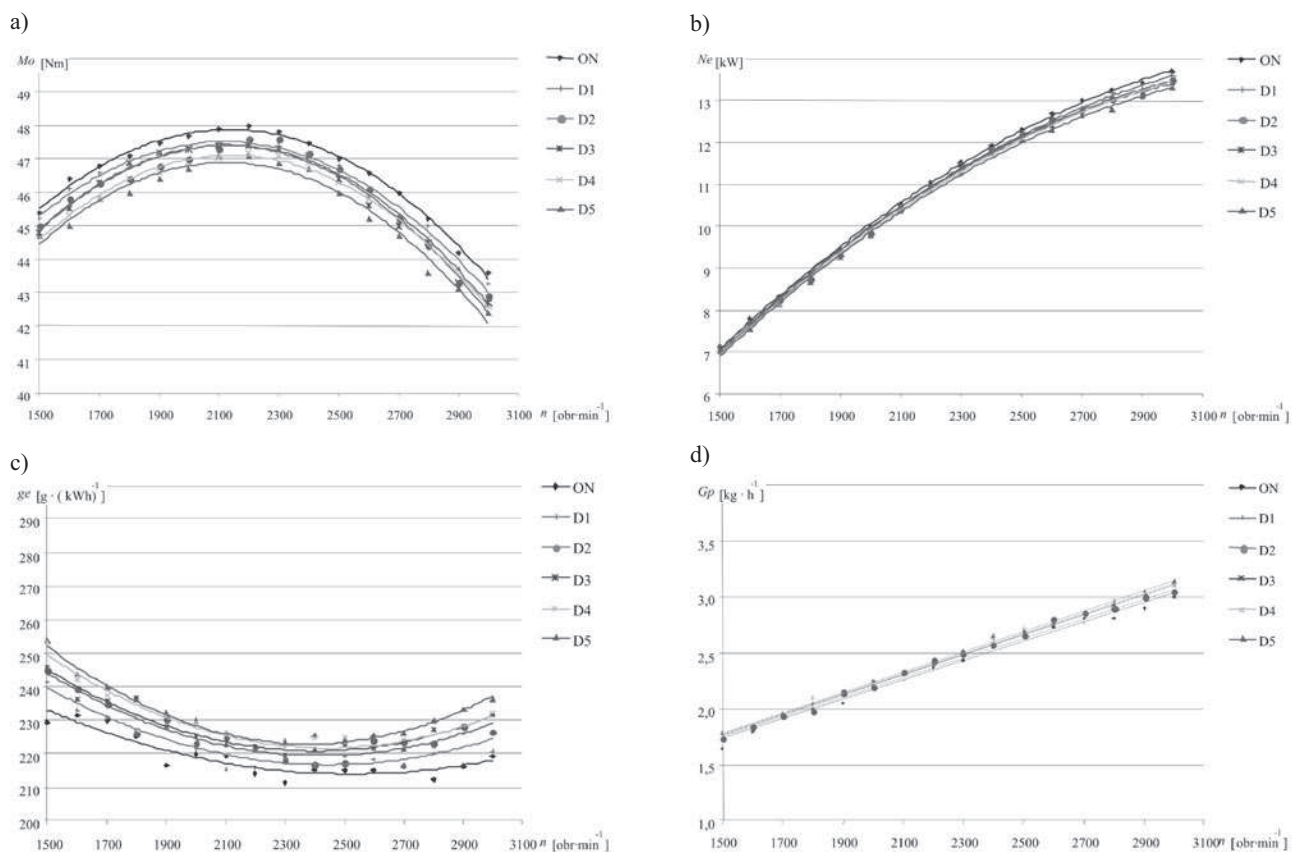
Influence of ethyl esters addition into diesel fuel on torque, power, fuel consumption, both unitary and in an hourly, were presented in figure 2.

It can be stated, after analysis of torque curves presented on fig. 2a, that introduction of biocomponent into diesel fuel causes decrease of torque value, while shape of its curves remains similar. Greatest losses of torque are observed when sample with highest content of biocomponent is investigated.

Increase of biocomponent content in a blend causes decrease of engine power. Presented on fig. 2b curves of power show its decrease positively related to increase of rotation speed. Lowest losses were observed with engine operating with low rotation speeds, and the greatest when engine operated with its maximum speed.

Curves of hourly fuel consumption for fuel blends got similar shape as one for diesel fuel (Fig. 2c). However, their shift towards greater values was noted. This shift is especially noticeable for blends containing 2 or more % of biocomponent. For D1 fuel and rotation speeds from 1500 to 2700 RPM the fuel consumption curve is similar to the one for diesel fuel, while, after the rotation speed exceeded these values differences of about 1% occur.

Presented on figure 2d curves of unitary fuel consumption suggest that introduction of biocomponent into diesel fuel caus-



Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna silnika 2CA90 zasilanego olejem napędowym i mieszaninami estru etylowego i oleju napędowego: a) momentu obrotowego, b) mocy, c) jednostkowego zużycia paliwa, d) godzinowego zużycia paliwa

Fig. 2. External characteristics of 2CA90 engine powered with diesel fuel and blends of ethyl ester and diesel fuel: a) torque, b) power, c) unitary fuel consumption, d) hourly fuel consumption

wowano różnice ok. 1%.

Z przedstawionych na rys. 2d charakterystyk jednostkowego zużycia paliwa wynika, że wprowadzenie biokomponentu do oleju napędowego powoduje zmianę ich przebiegu. Jednostkowe zużycie paliwa dla estrów wzrasta gwałtowniej, niż w przypadku oleju napędowego, szczególnie powyżej 2300 obr·min<sup>-1</sup>. I tak dla oleju napędowego od ok. 2300 do 3000 obr·min<sup>-1</sup> wzrost jednostkowego zużycia paliwa jest niewielki i wynosi 8 g·kWh<sup>-1</sup>, natomiast dla mieszanek paliwowych dla tego samego zakresu prędkości obrotowej wzrost tego zużycia jest większy i dla mieszanki D5 wynosi 13 g·kWh<sup>-1</sup>.

Analiza statystyczna wyników wpływu dodatku biokomponentu na moment obrotowy silnika wykazała, że zmiany momentu obrotowego przebiegają z różną dynamiką w stosunku do ON, tzn. znalezione krzywe regresji nie były równoległe (stosując odpowiedni test odrzucono hipotezy o ich równoległości). Stwierdzono, że zmiany mocy i zmiany zużycia paliwa dla wszystkich badanych paliw, różnią się istotnie od ON na poziomie istotności 0,05. Zmiany godzinowego zużycia paliwa nie różnią się istotnie od ON dla paliwa D1, zaś dla paliw D2, D3, D4, D5 różnią się istotnie od ON na poziomie istotności 0,05. Modele regresji dla momentu obrotowego, mocy jednostkowego i godzinowego zużycia dla poszczególnych paliw, opisane zostały równaniami zamieszczonymi w tabeli 2, w tabeli tej uwzględniono również współczynniki determinacji  $R^2$ .

es change of their shape. Fuel consumption in case of esters increases more rapidly than in case of diesel fuel, especially when RPM exceed 2300. Increase of fuel consumption for diesel fuel, when RPM increases from 2300 to 3000, is small and reaches 8 g·kWh<sup>-1</sup>, while for fuel blends and the same RPM range is greater and for D5 blend reaches 13 g·kWh<sup>-1</sup>.

Statistical analysis of results of biocomponent addition effect on engine's torque showed that dynamics of torque changes, when compared to diesel fuel, characterized with variety, i.e. obtained regression curves were not parallel (utilization of proper test led to discarding hypothesis that they are parallel). It was noted that changes of power and fuel consumption for all investigated fuels significantly differed from diesel fuel with significance level 0.05. Hourly fuel consumption changes were not significantly different when diesel fuel and D1 blend were taken into consideration, while in case of D2, D3, D4 and D5 blends differences were significant – with significance level 0.05. Regression models for torque, power and fuel consumption, both hourly and unitary, were described with equations presented in table 2, in which determination coefficients  $R^2$  were also included.

Maximal torque delivered by engine running on blends was decreasing with increase of biocomponent share, reaching following values: D1 – 47.6 Nm, D2 – 47.6 Nm, D3 – 47.4 Nm, D4 – 47.2 Nm, D5 – 47.1 Nm. These values were observed for same RPM as for diesel fuel.

Tab. 2. Równania regresji dla zmiennych obliczone na podstawie wyników badań  
 Tab. 2. Regression equations for variables calculated relying on research results

Zmienna zależna Dependent variable y	Paliwo Fuel	Równanie regresji Regression equations	Współczynnik determinacji Coefficient of determination R <sup>2</sup>
Mo [Nm]	ON	$y = -0,000006n^2 + 0,0253n + 20,848$	0,9931
	D1	$y = -0,000006n^2 + 0,0246n + 21,439$	0,9833
	D2	$y = -0,000006n^2 + 0,0272n + 18,450$	0,9728
	D3	$y = -0,000007n^2 + 0,0277n + 18,062$	0,9879
	D4	$y = -0,000006n^2 + 0,0264n + 18,886$	0,9901
	D5	$y = -0,000006n^2 + 0,0267n + 18,594$	0,9754
Ne [kW]	ON	$y = 5 \cdot 10^{-10}n^3 + 2 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,003638n - 1,036471$	0,964398
	D1	$y = 5 \cdot 10^{-10}n^3 + 2 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,003638n - 1,296151$	0,954915
	D2	$y = 5 \cdot 10^{-10}n^3 + 2 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,003638n - 1,227761$	0,999118
	D3	$y = 5 \cdot 10^{-10}n^3 + 2 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,003638n - 1,190391$	0,976491
	D4	$y = 5 \cdot 10^{-10}n^3 + 2 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,003638n - 1,173441$	0,998382
	D5	$y = 5 \cdot 10^{-10}n^3 + 2 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,003638n - 1,124681$	0,998014
ge [g · kWh <sup>-1</sup> ]	ON	$y = 7 \cdot 10^{-9}n^3 + 8,1 \cdot 10^{-5}n^2 - 0,257178n + 465,911$	0,728238
	D1	$y = 7 \cdot 10^{-9}n^3 + 8,1 \cdot 10^{-5}n^2 - 0,257178n + 469,854$	0,826484
	D2	$y = 7 \cdot 10^{-9}n^3 + 8,1 \cdot 10^{-5}n^2 - 0,257178n + 473,163$	0,917897
	D3	$y = 7 \cdot 10^{-9}n^3 + 8,1 \cdot 10^{-5}n^2 - 0,257178n + 474,579$	0,919912
	D4	$y = 7 \cdot 10^{-9}n^3 + 8,1 \cdot 10^{-5}n^2 - 0,257178n + 476,226$	0,862449
	D5	$y = 7 \cdot 10^{-9}n^3 + 8,1 \cdot 10^{-5}n^2 - 0,257178n + 478,273$	0,644621
Gp [kg · h <sup>-1</sup> ]	ON	$y = 0,0009n + 0,360898$	0,967544
	D1	$y = 0,0009n + 0,383957$	0,999614
	D2	$y = 0,0009n + 0,420931$	0,984426
	D3	$y = 0,0009n + 0,408693$	0,992986
	D4	$y = 0,0009n + 0,427295$	0,995485
	D5	$y = 0,0009n + 0,435303$	0,953390

Maksymalny moment osiągany przez silnik przy zasilaniu mieszaninami, zmniejszał się wraz ze wzrostem udziału biokomponentu, osiągając wartości odpowiednio dla D1 – 47,6 Nm, D2 – 47,6 Nm, D3 – 47,4 Nm, D4 – 47,2 Nm, D5 – 47,1 Nm. Wartości te były uzyskiwane przy takiej samej prędkości obrotowej, jak i w przypadku oleju napędowego. Względne zmiany maksymalnego momentu zaprezentowane zostały na rys. 3a. Pokazuje on, że spadek momentu dla paliw D1 i D2 jest niewielki i wynosi 0,8%. Niewiele więcej (1%) wyniósł dla D3, a nieco większe zmiany zaobserwowano dla mieszanek D4 i D5, które wyniosły odpowiednio 1,7% i 1,9%. Przy zasilaniu silnika czystymi estrami etylowymi spadek ten wyniósł ok. 5%.

Moc maksymalna dla poszczególnych rodzajów paliw wynosiła odpowiednio: D1 – 13,6 kW, D2 – 13,5 kW, D3 – 13,4 kW, D4 – 13,4 kW, D5 – 13,3 kW. Względne zmiany mocy przedstawione zostały na rys. 3b. Wynika z niego, że największa zmiana wyniosła 3,2% dla oleju napędowego zawierającego 5% biokomponentu, natomiast najmniejsza była dla mieszanki D1 – 1,2%. W przypadku zasilania silnika czystym estrem spadek ten wyniósł ok. 7,1%. Wzrost ilości biokomponentu powoduje również wzrost minimalnego jednostkowego zużycia dla paliwa, wynosząc odpowiednio: D1 – 215,4 g · kWh<sup>-1</sup>, D2 – 216,8 g · kWh<sup>-1</sup>, D3 – 219,4 g · kWh<sup>-1</sup>, D4 – 220,7 g · kWh<sup>-1</sup>, D5 – 221,2 g · kWh<sup>-1</sup>. Względne zmiany jednostkowego zużycia paliwa wynosiły od 1,9% dla mieszaniny D1 do 4,7% dla D5 (rys. 3c), natomiast dla czystych estrów wyniósł on 17%.

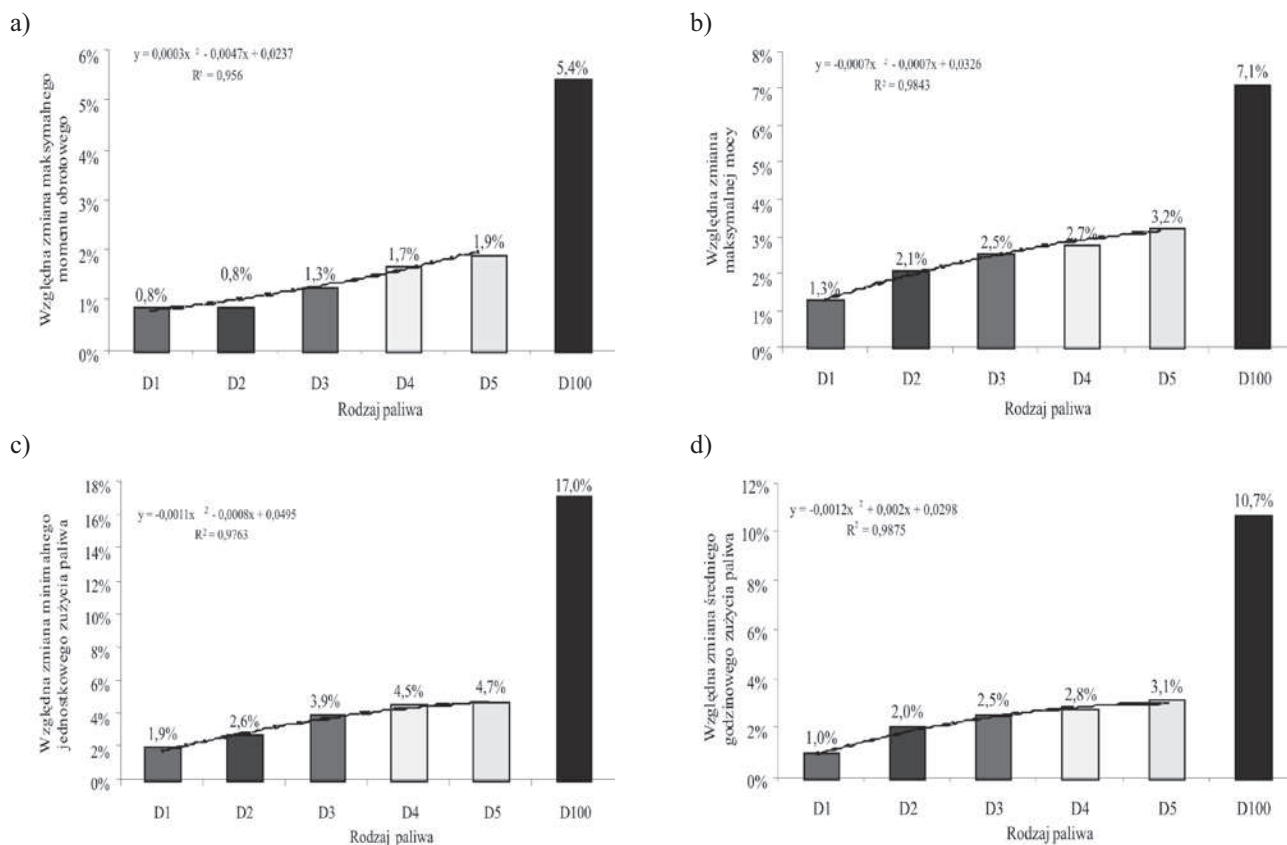
Relative changes of maximal torque were presented in fig. 3a. It shows, that decrease of torque for blends D1 and D2 is small – 0.8%. Slightly higher decrease (1%) was observed in case of D3, and for blends D4 and D5 observed decrease was 1.7 and 1.9% respectively. Decrease of 5% occurred when engine was powered with pure ethyl esters.

Maximal power for particular fuel types was: D1 – 13.6 kW, D2 – 13.5 kW, D3 – 13.4 kW, D4 – 13.4 kW, D5 – 13.3 kW. Relative power changes were presented in fig. 3b, which shows decrease from 3.2% to 1.2% noted in case of diesel fuel containing 5% of biocomponent and D1 blend respectively. When engine was powered with pure ethyl esters the decrease reached 7.1%.

Increase of biocomponent share in fuel causes also increase of minimal unitary fuel consumption: D1 – 215.4 g · kWh<sup>-1</sup>, D2 – 216.8 g · kWh<sup>-1</sup>, D3 – 219.4 g · kWh<sup>-1</sup>, D4 – 220.7 g · kWh<sup>-1</sup>, D5 – 221.2 g · kWh<sup>-1</sup>. Relative changes of unitary fuel consumption ranged from 1.9% to 4.7% for D1 and D5 blends respectively (fig. 3c), while for pure esters it reached 17%.

Increase of biocomponent content in diesel fuel blends causes increase of average fuel consumption: D1 – 2.408 kg · h<sup>-1</sup>, D2 – 2.433 kg · h<sup>-1</sup>, D3 – 2.445 kg · h<sup>-1</sup>, D4 – 2.452 kg · h<sup>-1</sup>, D5 – 2.460 kg · h<sup>-1</sup>.

Relative changes of average hourly fuel consumption were presented in figure 3d. Increase of fuel consumption for D1 blend



Rys. 3. Względne zmiany: a) maksymalnego momentu obrotowego silnika, b) maksymalnej mocy silnika, c) minimalnego zużycia paliwa, d) średniego godzinowego zużycia 2CA 90 przy zasilaniu silnika mieszaninami paliwowymi i czystym estrem etylowym

Fig. 3. Relative changes of: a) maximal torque, b) maximal power, c) minimal fuel consumption, d) average hourly fuel consumption for 2CA90 engine powered with fuel blends and pure ethyl ester

Wzrost zawartości biokomponentu w oleju napędowym powoduje wzrost średniego zużycia paliwa odpowiednio: D1 – 2,408 kg · h<sup>-1</sup>, D2 – 2,433 kg · h<sup>-1</sup>, D3 – 2,445 kg · h<sup>-1</sup>, D4 – 2,452 kg · h<sup>-1</sup>, D5 – 2,460 kg · h<sup>-1</sup>.

Względne zmiany średniego godzinowego zużycia zaprezentowane są na rys. 3d. Wzrost zużycia dla mieszanki D1 jest niewielki i wynosi 1%, natomiast rośnie dla mieszanki D2 – 2%. W przypadku paliw D3 i D4 wyniósł on odpowiednio 2,5 i 2,8%, zaś dla D5 – 3,1%. Przy zasilaniu czystym estrem średnie zużycie godzinowe wzrosło aż do 10,7%.

#### 4. Wnioski

Zastosowanie mieszanek paliwowych, zawierających 1-5% estrów etylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAEE, do zasilania silników o ZS powoduje zmianę parametrów energetycznych pracy silnika. Analiza wyników przeprowadzonych badań na silniku 2CA90 pozwala stwierdzić, że:

- Wprowadzenie FAEE do ON istotnie wpłynęło na zmianę mocy efektywnej silnika. Zaobserwowano zmniejszenie mocy maksymalnej dla mieszanek ON i FAEE w zakresie 1,2-3,2%. Straty mocy rosły wraz ze wzrostem udziału biokomponentu w mieszaninie.
- Przy zasilaniu silnika mieszaninami następowała zmiana maksymalnego momentu obrotowego o 0,8-1,9%. Wraz ze wzrostem udziału biokomponentu w mieszaninie moment obrotowy wykazywał tendencję malejącą.

(1%) is small however for blend D2 reaches 2%, while in case of D3, D4 and D5 blends was 2.5%, 2.8% and 3.1% respectively. When engine was powered with pure ester average hourly fuel consumption increased 10.7%.

#### 4. Conclusions

Utilization of fuel blends containing 1-5% of rape oil fatty acids ethyl esters FAEE for powering diesel engine causes change of energetic parameters of engine work. Analysis of results of research conducted on 2CA90 engine justifies following statements:

- Introduction of FAEE into diesel fuel significantly influenced change of effective power delivered by engine. Decrease of maximal power for DF and FAEE blends ranging from 1.2 to 3.2% was noted. Losses were increasing with increase of biocomponent share in blends.
- Powering engine with blends caused change of maximal torque ranging from 0.8 to 1.9%. Torque was showing tendency to decrease with increase of biocomponent share in blends.

- c) Dodatek biokomponentu powoduje istotny wzrost godzinowego zużycia paliwa dla mieszanin zawierających 3, 4 i 5% estrów, natomiast dla mieszanin zawierających 1 i 2% nie stwierdzono istotnych zmian. Dla mieszanin średnie godzinowe zużycie paliwa wzrosło o 1,0-3,1%.
- d) Dodatek biokomponentu powoduje istotny wzrost jednostkowego zużycia paliwa. Dla mieszanek minimalne jednostkowe zużycie paliwa wzrosło o 1,9-4,7%.

Zastosowanie biokomponentu do 5% nie powoduje radykalnego obniżenia parametrów energetycznych silnika, tj. zmiany maksymalnej mocy, momentu obrotowego, jednostkowego i godzinowego zużycia paliwa. Zmiany tych parametrów są trudne do zaobserwowania przez użytkowników.

- c) Addition of biocomponent causes significant increase of hourly fuel consumption for blends containing 3, 4 and 5% of esters, while for blends containing 1 and 2% no significant changes were noted. Average hourly fuel consumption of blends increased from 1.0 to 3.1%.
- d) Addition of biocomponent causes significant increase of unitary fuel consumption, which, in case of blends, reached from 1.9 to 4.7%.

If biocomponent addition do not exceeds 5%, no radical decrease of engine energetic parameters, i.e. maximal power, torque, unitary and hourly fuel consumption, occurs. It must be also mentioned that changes of investigated parameters can hardly be noted by the users.

## 5. References

- [1] Baczewski K., Kałdoński T.: *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*. WKŁ, Warszawa 2004.
- [2] Górski W.: *Stan aktualny, potrzeby i perspektywy w zakresie normalizacji biopaliw*. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji, 101, 24-36, 2002.
- [3] Graboski M. S., McCormick R. L.: *Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines*. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24 pp. 125-164, 1998.
- [4] Ma F., Hanna M. A.: *Biodiesel production: a review*. Bioresource Technology 70. 1-15. 1999.
- [5] Merksiz J., Kozak M.: *Przegląd techniczno-eksploatacyjnych korzyści i zagrożeń związanych ze stosowaniem biopaliw w silnikach spalinowych*. II Międzynarodowa konferencja Naukowo-Techniczna „Biopaliwa 2003”, SGGW Warszawa 2003.
- [6] Piekarski W., Zając G.: *Analiza doboru mieszanek paliwowych biopaliwa i oleju napędowego w aspekcie emisji spalin*. Eksploatacja i Niezawodność 3, 6-11, 2003.
- [7] Szlachta Z.: *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*. WKŁ, Warszawa 2002.

---

### **Dr inż. Grzegorz ZAJĄC**

Katedra Energetyki i Pojazdów  
Wydział Inżynierii Produkcji  
Akademia Rolnicza w Lublinie  
ul. Głęboka 28, 20 –612 Lublin  
grzegorz.zajac@ar.lublin.pl

### **Dr inż. Adam WĘGRZYN**

Katedra Maszyn i Urządzeń Ogrodniczych  
Wydział Inżynierii Produkcji  
Akademia Rolnicza w Lublinie  
ul. Głęboka 28, 20 –612 Lublin  
adam.wegrzyn@ar.lublin.pl

---