

Wincenty Lotko, Kamil Łodygowski

# Ocena wpływu dodatku biowęglowodorów w paliwie na wybrane parametry procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym

JEL: Q01 DOI: 10.24136/atest.2019.056  
Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

W artykule omówiony został wpływ dodatku biowęglowodorów na wybrane parametry spalania silnika o zapłonie samoczynnym. Badania wykazały, że syntetyczny olej napędowy może być wykorzystywany jako dodatek do mineralnego oleju napędowego. Proces spalania takich mieszanin zależy od ich składu. Użycie SYNON prowadzi do zwiększenia prędkości narastania ciśnienia w komorze spalania.

**Słowa kluczowe:** alternatywne paliwa, paliwa syntetyczne, silnik o ZS.

## Wstęp

Silnik spalinowy wciąż dominuje jako podstawowe źródło napędu w pojazdach samochodowych, mimo swoich wad. Z kolei największą konsumpcję z paliw ciekłych stanowi olej napędowy (rysunek 1). Jednakże najbardziej istotnym determinantem prac rozwojowych silników spalinowych jest aspekt ekologiczny, czyli osiągnięcie jak najmniejszych emisji substancji szkodliwych [1].

Ciągle prowadzone są intensywne badania nad zastosowaniem paliw alternatywnych do silników spalinowych np. [2] [3] [4] [5]. Badaniom poddano między innymi takie paliwa jak: gaz propanbutan (LPG), gaz ziemny (CNG i LNG), paliwa roślinne i ich estry, oraz paliwa alkoholowe (metanol, etanol, butanol) i etery.

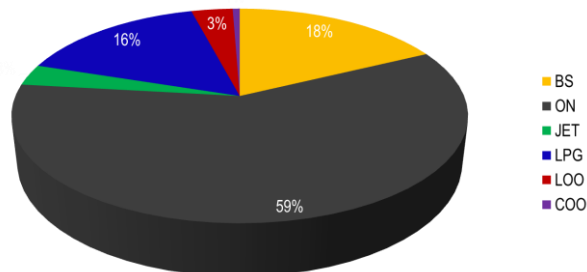
Trzeba zaznaczyć, że paliwa otrzymywane w procesie syntezy cechują się mniejszą degradacją środowiska w porównaniu z paliwami ropopochodnymi. Otrzymywanie długołańcuchowych węglowodorów alifatycznych, będącymi surowcem do wytworzenia paliwa silnikowego, było od dawna przedmiotem prac badawczych i rozwojowych. Prace badawcze w tym zakresie są stale prowadzone zarówno w krajowych ośrodkach naukowych jak i zagranicznych.

Zastosowanie mieszaniny biowęglowodorów z mineralnym olejem napędowym ma uzasadnienie szczególnie pod względem ekonomicznym. Produkcja paliw syntetycznych wiąże się z wyższymi kosztami a tym samym jest mniej opłacalna pod względem stoso-

wania na skalę masową.

Stosowanie w paliwach biowęglowodorów przyczynia się do zmniejszenia szkodliwego działania na środowisko naturalne. W porównaniu z mineralnym olejem napędowym paliwo syntetyczne zbudowane jest z cząsteczek znacznie mniejszych i o mniej skomplikowanej budowie. Taka struktura przyczynia się do ich dokładniejszego, czystszej spalania. Rozbijanie małych cząsteczek wytwarza mniej związków pośrednich, będących przyczyną niekorzystnych substancji w spalinach [8].

W artykule przedstawiono wyniki badań zasilania silnika o zapłonie samoczynnym AD 3.152 mieszaninami mineralnego oleju napędowego z syntetycznymi węglowodorami otrzymanymi w technologii ETG. Odniesione są one do przypadku zasilania tego samego silnika olejem napędowym pochodzącym z przeróbki ropy naftowej i dostępnego na stacjach paliw. Przedstawiona została analiza wpływu dodatku biowęglowodorów na wybrane parametry spalania w silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym.



**Rys. 1.** Struktura konsumpcji paliw ciekłych w I kwartale 2018. BS – benzyna silnikowa, ON – olej napędowy, JET – paliwo lotnicze, LPG – propanbutan, LOO – lekki olej opałowy, COO – ciężki olej opałowy. Źródło: MF i POPiHN

**Tab. 1.** Podstawowe właściwości fizykochemiczne paliw silnikowych wykorzystanych w badaniach

Paliwo	Wartość opalowa [MJ/kg]	Temperatura zapłonu [°C]	Pozostałość po koksowaniu % (m/m)	Gęstość [kg/m³]
OLEJ NAPĘDOWY	42,91	63	0,19	842
5SYNON	42,84	64	0,16	844
10SYNON	42,80	62	0,11	845
15SYNON	42,78	61	-	848
20SYNON	42,75	60	-	852

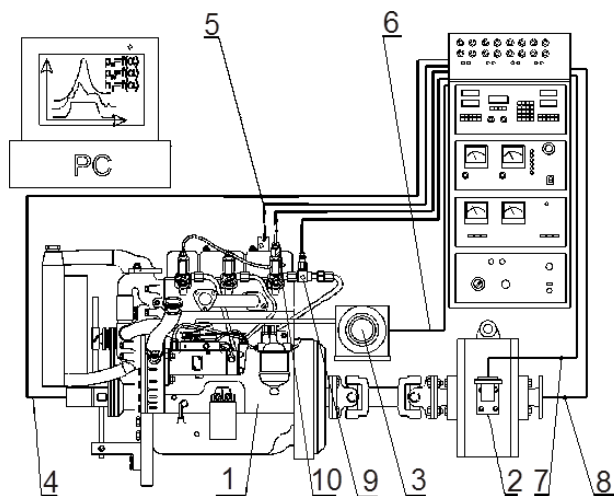
## 1. Wybrane właściwości fizykochemiczne paliw

Podczas badań silnik spalinowy AD 3.152 pracował w warunkach ustalonych wg charakterystyki zewnętrznej. Zasilano go pięcioma paliwami: olejem napędowym zgodnym z normą PN-EN 590:2011 oraz mieszaninami mineralnego oleju napędowego z biowęglowodorami syntetycznymi.

Paliwa do badań skomponowano z zastosowaniem następujących udziałów objętościowych komponentów zmieszanych w proporcji (%V/V) z mineralnym olejem napędowym:

- 95% ON + 5% SYNON – określane jako 5SYNON
- 90% ON + 10% SYNON – określane jako 10SYNON
- 85% ON + 15% SYNON – określane jako 15SYNON
- 80% ON + 20% SYNON – określane jako 20SYNON

Mieszaniny te były klarowne, bez osadów. Przechowywane przez kilka dni w temperaturze pokojowej nie wykazały żadnych cech rozwarstwienia.



**Rys.2** Schemat wykorzystywanego podczas badań stanowiska: 1- silnik ZS Perkins AD3.152, 2 - hamulec elektrowirowy Automex AMX200/100, 3 -układ sterujący ustawieniem listwy pompy wtryskowej, 4 - tor pomiarowy kąta obrotu wału korbowego, 5 - tor pomiarowy ciśnienia w komorze spalania, 6 - tor ustawienia listwy pompy wtryskowej, 7 - tor pomiarowy momentu obrotowego, 8 - tor pomiarowy prędkości obrotowej silnika, 9 - czujnik ciśnienia w przewodzie wtryskowym, 10 - czujnik wzniosu iglicy wtryskiwacza

Olej napędowy, został wyprodukowany przez Polski Koncern Naftowy Orlen S.A. Jest to paliwo węglowodorowe, przeznaczonym do zasilania szybkoobrotowych silników o zapłonie samoczynnym, w którym zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME stanowi do 7% objętości (%V/V). Charakteryzuje się on niską zawartością węglowodorów aromatycznych, małą zawartością zanieczyszczeń stałych, podwyższoną liczbą cetanową [8]. Drugim paliwem wykorzystanym w badaniach było paliwo syntetyczne. Syntetyczne węglowodory są pozostałością po wydzieleniu w temperaturze do 210°C frakcji benzynowej z ciepłego produktu procesu katalitycznej konwersji alkoholi do mieszaniny węglowodorów,

realizowanego według technologii ETG opracowanej przez EKO-BENZ Sp. z o.o. w Lublinie (zgłoszenie patentowe P.408081). Proces konwersji etanolu prowadzono w temperaturze 270 - 350°C pod ciśnieniem 2 MPa z wykorzystaniem katalizatora typu glinokrzemianu. Otrzymana frakcja olejowa jest zbiorem węglowodorów, mieszającą się w dowolnym stosunku z węglowodorami ropopochodnymi, całkowicie pozbawioną benzenu, alkoholi, siarki, fosforu i metali.

W tabeli 1 umieszczono porównanie wybranych właściwości fizykochemicznych paliw będących przedmiotem badań. Określenie podstawowych właściwości fizykochemicznych paliw (wytworzonych wg założeń autorów) wykonano za pomocą badań laboratoryjnych, zgodnie z określonymi normami.

**Tab. 2.** Podstawowe właściwości fizykochemiczne paliw silnikowych wykorzystanych w badaniach

Parametr	Wartość
Liczba i układ cylindrów	3-rzędowy pionowy
Średnica cylindra [mm]	91,44
Skok tłoka [mm]	127
Pojemność skokowa [cm <sup>3</sup> ]	2502
Stopień sprężania	16,5
Moc znamionowa [kW]	34,6
Znamionowa prędkość obrotowa [obr/min]	2250
Znamionowy moment obrotowy [Nm]	146,8
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	165,4
Prędkość obrotowa przy maksymalnym momencie [obr/min]	1300-1400
System wtrysku paliwa	bezpośredni do cylindra
Rodzaj pompy wtryskowej paliwa	Lucas – CAV typu DPA
Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza paliwa [MPa]	17,5
Kąt dynamicznego początku tłoczenia paliwa [°OWK]	16 przed GMP

## 2. STANOWISKO BADAWCZE

Badania silnikowe przeprowadzono w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im K. Pułaskiego w Radomiu. Laboratorium Zakładu Technicznej Eksploatacji Pojazdów wyposażone jest w silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym AD 3.152. Silnik ten został odpowiednio przystosowany do potrzeb badań nad przebiegiem procesów wtrysku i spalania paliw oraz do testów z zakresu dynamiki procesu przyspieszania silnika.

AD 3.152 jest silnikiem z wtryskiem bezpośrednim, trzycylindrowym, z wtryskiwaczami wielootworowymi i pompą rozdzielaczą. Jest to jednostka napędowa stosowana głównie w ciągnikach rolniczych (Ursus), ale był również montowany silnikach agregatowych. Jego cechą charakterystyczną jest stosunkowo płaska charakterystyka momentu obrotowego, przy czym jego maksymalna wartość uzyskiwana jest już przy prędkości ok. 1300 obr/min.

W systemie wtrysku paliwa silnika AD 3.152 zastosowano roz-

**Tab.3** Warunki badań silnika AD3.152 zasilanego mineralnym olejem napędowym i jego mieszaninami z paliwem syntetycznym

Parametr	Wartość					
Prędkość obrotowa wału n [obr/min]	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Kąt dynamicznego początku tłoczenia paliwa $\alpha_{dpt}$ [°OWK]	16° przed GMP					
Obciążenie $M_0$ [Nm]	maksymalne					

pylacz wielootworowe współpracujące z rozdzielaczową pompą wtryskową Lucas – CAV typu DPA. Przed przystąpieniem do badań wyregulowano ciśnienie wszystkich wtryskiwaczy paliwowych do wartości zgodnej z danymi producenta – 17,5 MPa. Specyfikację techniczną badanego silnika przedstawiono w tab. 2.

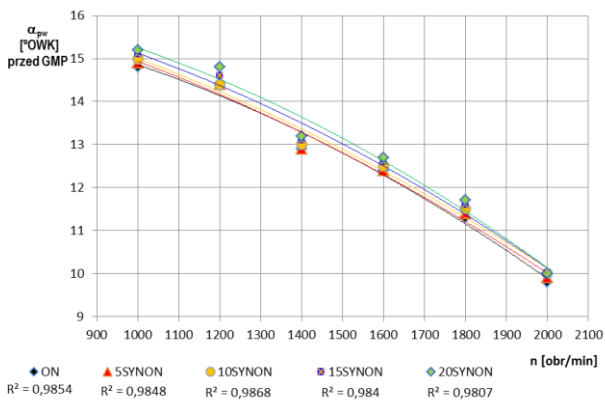
### 3. Metodyka badań

Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone dla prędkościowych charakterystyk zewnętrznych dla wybranych prędkości obrotowych wału korbowego. Silnik we wszystkich punktach pomiarowych pracował z maksymalnym obciążeniem (pełne dawkowanie paliwa).

Silnik posiadał nominalne nastawy wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwaczy i kąta dynamicznego początku tłoczenia paliwa  $\alpha_{dp}$ .

W tabeli nr 3 przedstawiono zestawienie wartości warunków przeprowadzonych pomiarów.

Przy badaniach procesu spalania, a w szczególności przy analizie porównawczej spalania różnych paliw korzysta się z wykresów przedstawiających pochodną ciśnienia w funkcji kąta położenia wału korbowego (lub czasu). Są to wykresy ilustrujące przebieg prędkości zmiany ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Na podstawie takiego wykresu można wyznaczyć maksymalną wartość prędkości zmiany narastania ciśnienia. Parametr ten odzwierciedla tzw. „twardość” pracy silnika.



**Rys. 3.** Kąt początku wtrysku w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD 3.152, pracującego w warunkach charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu olejem napędowym i jego mieszaninami z syntetycznym paliwem

Na podstawie analizy wykresu  $dp/da$  można wyznaczyć kolejne parametry procesu spalania paliwa w cylindrze, takie jak kąt początku spalania i pośrednio zwłokę samozapłonu paliwa. Kąt początku spalania

W silnikach o zapłonie samoczynnym bardzo istotnym parametrem wpływającym na przebieg ciśnienia spalania jest kąt opóźnienia (zwłoki) samozapłonu.

Do wyznaczenia tak zdefiniowanego kąta zwłoki samozapłonu posłużono się zarejestrowanymi przebiegami ciśnienia w przewodzie wtryskowym  $p_w$  oraz przebiegiem chwilowej szybkości narastania ciśnienia  $dp/da$ .

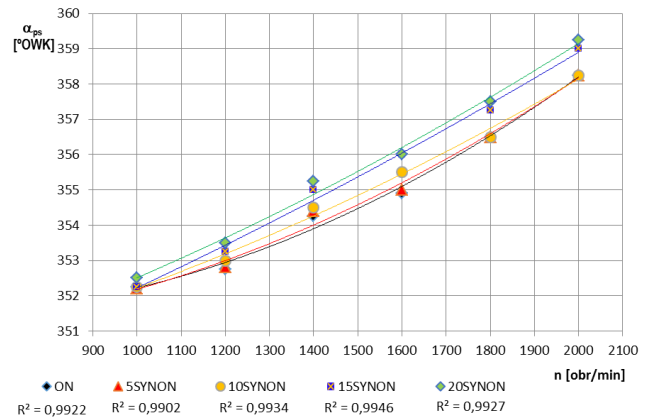
### 4. Wyniki badań i dyskusja

Jako źródło informacji o procesie spalania przyjęto wykres indykatorowy. W wyniku jego analizy przy różnych obciążeniach silnika zbadano i porównano przebiegi zmian wybranych wskaźników.

Podczas badań, które prowadzono w warunkach charakterystyki prędkościowej zaobserwowano wpływ zawartości biowęglowodorów w oleju napędowym na zmianę wartości kąta początku wtrysku (rys. 3). Odnotowano wzrost jego wartości wraz z zwiększonym udziałem SYNON.

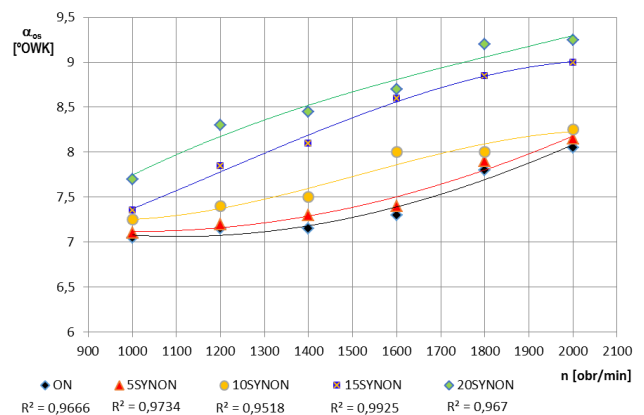
Analizując wykres na rys. 4 można zaobserwować wpływ rosnącej zawartości biowęglowodorów w mieszaninie z ON na zwiększenie wartości kąta początku spalania. Wynika to z mniejszej liczby cetanowej mieszanin – zdolności do samozapłonu paliwa.

Kąty początku spalania są najbardziej zbliżone do mineralnego oleju napędowego dla mieszaniny 5SYNON i 10SYNON. Maksymalna różnica bezwzględna wynosi 0,20 °OWK pomiędzy kątami dla 10SYNON i ON przy prędkości obrotowej wału korbowego 1600 obr/min.



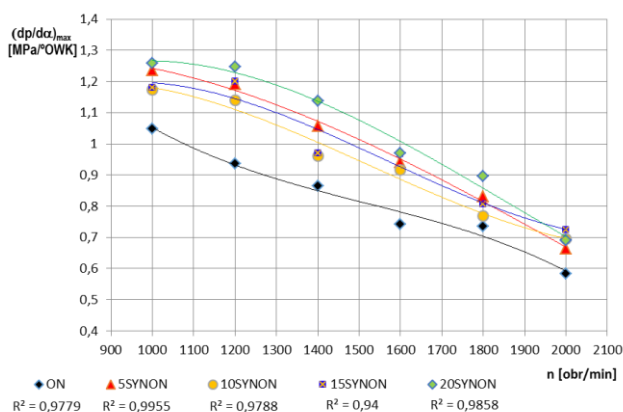
**Rys. 4.** Kąt początku spalania w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD 3.152 zasilanego ON i jego mieszaninami z SYNON

Zazwyczaj dąży się do tego, by początek spalania następował w pobliżu GMP, co sprzyja zachowaniu optymalnej efektywności pracy silnika. Zapłon w niewłaściwym miejscu nie tylko powoduje spadek efektywności pracy silnika, ale również wzrost emisji toksycznych składników spalin oraz tzw. twardość pracy silnika.



**Rys. 5.** Kąt opóźnienia samozapłonu w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD 3.152 zasilanego ON i jego mieszaninami z SYNON

Zjawiskiem towarzyszącym rosnącemu kątowi zwłoki samozapłonu jest nadmierne gromadzenie się paliwa w komorze spalania i jego mieszaniny z powietrzem, które tam się znajduje. Jeżeli kąt ten będzie zbyt duży, samozapłon nagromadzonego paliwa spowoduje spalanie przy większych prędkościach narastania ciśnienia – co obserwujemy przy spalaniu mieszanin ON z SYNON.



**Rys. 6.** Maksymalna prędkość narastania ciśnienia w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD 3.152 zasilanego ON i jego mieszaninami z SYNON

Poprzez numeryczne różniczkowanie wartości ciśnienia w komorze spalania względem  $\alpha$  uzyskano przebiegi chwilowych wartości maksymalnych prędkości narastania ciśnienia  $dp/d\alpha$ . Jednak dla dokładniejszego przeanalizowania zmian tego parametru sporządzono wykres (rys. 6) zależności wartości maksymalnej prędkości narastania ciśnienia od obciążenia silnika  $(dp/d\alpha)_{max}$  dla wszystkich badanych prędkości obrotowych silnika pracującego według charakterystyki prędkościowej.

Wartości  $(dp/d\alpha)_{max}$  rosną wraz ze zwiększonym udziałem biowęglowodorów w paliwie. Maksymalna różnica bezwzględna między prędkością narastania ciśnienia dla ON i SYNON wynosi 0,31 MPa/°OWK dla 20SYNON przy prędkości obrotowej wału korbowego 1200 obr/min.

Wynikiem zwiększenia  $(dp/d\alpha)_{max}$  jest późniejszy kąt opóźnienia samozapłonu dla mieszanin (rys. 5). Zauważyć należy, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego obniża się wartość maksymalnej szybkości narastania ciśnienia w wyniku przesunięcia się spalania za GMP i spowodowanie bardziej miękkiej pracy silnika. Przy maksymalnych prędkościach silnika wartości  $(dp/d\alpha)_{max}$  są dla wszystkich paliw bardzo zbliżone. Maksymalna różnica bezwzględna wynosi 0,108 pomiędzy wartościami zarejestrowanymi przy zasilaniu silnika ON i 15SYNON.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania zilustrowały, że istnieje możliwość zasilania silników o zapłonie samoczynnym mieszaninami ON z syntetycznymi paliwami. Przeprowadzona analiza wykazała, że początek spalania następuje później dla paliw z dodatkiem syntetycznym. Dalsza realizacja procesu spalania paliw z domieszką SYNON charakteryzowała się gwałtowniejszym przebiegiem wzrostu narastania ciśnienia w stosunku do mineralnego oleju napędowego. Świadczą o tym maksymalne prędkości narastania ciśnienia, które podczas spalania badanych mieszanin były większe w stosunku do spalania oleju napędowego. W przypadku pełnych obciążeń silnika zasilanego takim rodzajem paliwa może to budzić obawy ze względu na zwiększone ryzyko występowania tzw. twardej pracy

silnika. Na podstawie otrzymanych wyników badań wydaje się celowe kontynuowanie doświadczeń z syntetycznym olejem napędowym.

## Bibliografia:

1. Łodygowski K., Zastosowanie ogniw paliwowych typu PEMFC jako źródło napędu pojazdu samochodowego, Oficyna wydawnicza Black Horse, Poznań 2013.
2. Labeckas G., Slavinskas S., Performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine operating on KDV synthetic diesel fuel, Energy Conversion and Management; Volume 66, February 2013, Pages 173–188.
3. Lotko W., Zasilanie silników wysokoprężnych mieszaninami paliwa rzepakowego z olejem napędowym, Wydawnictwo Politechniki Radomska, Radom 2008.
4. Lotko W., Górski K., Longwic R., Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylotert butylovym, WKŁ, Warszawa 2010.
5. Lotko W., Górski K., Zasilanie silnika wysokoprężnego mieszaninami ON i EETB, WNT Warszawa 2011.
6. Lotko W., Niepowtarzalność opóźnienia samozapłonu paliwa, Archiwum Motoryzacji, pp. 195-209, 3-4 2008.
7. Lotko W., Studium zastosowań paliw alternatywnych do silników o zapłonie samoczynnym. Radom: Politechnika Radomska, 2003.
8. Łodygowski K., Paliwa syntetyczne do zasilania silników spalinowych z zapłonem samoczynnym, TTS Technika Transportu Szybowego, no. 10, 2013.
9. Górski K., Longwic R., Lotko W., Łodygowski K.: Ocena wybranych parametrów procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym mieszaninami oleju napędowego z syntetycznym paliwem; TTS Technika Transportu Szybowego; no. 12, 2015

## Estimation of combustion process parameters in a diesel engine supplied with a mixture of gas oil and synthetic fuels

The paper presents test results carried out with using of CI engine fuelled with diesel oil and synthetic fuels. Research results show that SYNON be used in diesel fuel. Combustion proces of such fuel blends depend on mixture composition. Using of SYNON in mixture with diesel oil follows to increase a value of maximum pressure rise in cumbustion chamber.

**Keywords:** alternative fuels, synthetic fuels, diesel engine.

## Autorzy:

**prof. dr hab. inż. Wincenty Lotko** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Zakład Technicznej Eksploatacji Pojazdów

**dr inż. Kamil Łodygowski** – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Koninie, Wydział Społeczno-Techniczny, Katedra Inżynierii i Technologii; kamil.lodygowski@tlen.pl