

# SKAWITOWANE EMULSJE WĘGLOWODOROWODNE DO ZASILANIA SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

LECH J. SITNIK<sup>1</sup>, MACIEJ K. DWORACZYŃSKI<sup>2</sup>, PIOTR HALLER<sup>3</sup>

Politechnika Wroclawska

## Streszczenie

Rozwój silników spalinowych idzie w kierunku spełnienia coraz ostrzejszych wymagań dotyczących emisji toksycznych składników spalin, zmniejszenie zużycia paliwa a więc zmniejszenia emisji dwutlenku węgla i ochrony zasobów naturalnych Ziemi.

Badania zasilania silników spalinowych emulsjami węglowodorowo wodnymi ma już swoją tradycję. Dotychczasowe próby prowadzone były z zastosowaniem emulsji uzyskiwanych w drodze chemicznej. W niniejszej pracy przedstawiono podobne wyniki z tym, że emulsje paliwowo – wodne uzyskiwano z wykorzystaniem zjawiska kawitacji.

W Politechnice Wroclawskiej (Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych) opracowano specyficzny kawitator, który posłużył do wytworzenia emulsji węglowodorowowodnych mineralnego oraz syntetycznego oleju napędowego. Oba paliwa oraz ich emulsje, o zawartości wody równej dwadzieścia procent (objętościowo), posłużyły do testów. Wykonano charakterystyki zewnętrzne wybranego silnika, na ich podstawie opracowano warunki testu ESC (European Stationary Cycle) oraz przeprowadzono badania silnika na hamowni silnikowej w warunkach tego testu. Przeprowadzono pomiary emisji składników spalin i zużycia paliwa.

Stwierdzono, że stosowanie emulsji prowadzi do obniżenia zużycia oleju napędowego.

**Słowa kluczowe:** kawitacja, emulsje, silnik spalinowy, zużycie paliwa, emisje

## 1. Wstęp

Celem pracy była ocena zużycia paliwa oraz emisji składników spalin, silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego wodną emulsją paliw węglowodorowych.

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska, Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, ul. Braci Gierymskich 164, 51-640 Wrocław, Polska, e-mail: lech.sitnik@pwr.wroc.pl, tel. 71 347 79 18

<sup>2</sup> Politechnika Wroclawska, Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, ul. Braci Gierymskich 164, 51-640 Wrocław, Polska, e-mail: maciej.dworaczynski@pwr.wroc.pl, tel. 71 347 79 18

<sup>3</sup> Politechnika Wroclawska, Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, ul. Braci Gierymskich 164, 51-640 Wrocław, Polska, e-mail: piotr.haller@pwr.wroc.pl, tel. 71 347 79 18

Prace te są pracami wstępnymi, mającymi również na celu sprawdzenie czy ten kierunek prac jest przyszłościowy.

Emulsje oleju napędowego z wodą można otrzymywać chemicznie - dodając detergentów (substancji wspomagających) [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] lub fizycznie np. wykorzystując zjawisko kawitacji. W prezentowanej pracy emulsje węglowodorowo wodne uzyskiwano tą drugą metodą.

Użyto dwu rodzajów oleju napędowego - mineralnego (MON) oraz syntetycznego (SON). Ponadto użyto emulsji wodnych (20% v/v) tych paliw tzn. emulsję wodą mineralnego oleju napędowego (EMON) oraz syntetycznego (ESON).

Do wytwarzania emulsji użyto kawitatora specjalnej konstrukcji, który jest prototypem.



Rys. 1. Stanowisko do produkcji emulsji ON + woda

W stanowisku zastosowano dwa zbiorniki 20 l i 10 l z zaworami. Do zbiorników wlewane są ciecz niezbędne do produkcji emulsji takie jak: olej napędowy, woda. Pompa ma za zadanie pompować ciecz ze zbiorników stanowiska modelowego przez kolumnę grawitacyjną do mieszadła elektrycznego i stamtąd z powrotem do zbiorników stanowiska tworząc obieg zamknięty. Mieszadło tworzą dwa silniki elektryczne ustawione naprzeciw siebie w odpowiedniej odległości tworząc wraz z odpowiednio zaprojektowaną obudową dwie komory, komorę wstępną przyjmującą ciecz i drugą komorę w której następuje mieszanie cieczy. Wirniki silników elektrycznych wraz z tarczami obracają się w przeciwnych kierunkach. Dzięki takiemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu ciecz wprawiana jest w dwa ruchy wirowe w przeciwnych kierunkach, to powoduje dokładne wymieszanie cieczy. Dodatkowo w wyniku specjalnego kształtu trzpieni zachodzi za nimi zjawisko kawitacji, które jest

zjawiskiem dość złożonym wywołanym miejscowym spadkiem ciśnienia przepływającej cieczy które jest bliskie ciśnieniu parowania cieczy, i tworzeniu się tam pęcherzyków parowo – gazowych, a następnie ich implozyjnemu zanikaniu w strefie wyższego ciśnienia. Kawitacja towarzyszy spadkowi ciśnienia, a więc wyższym prędkościom cieczy.



**Rys. 2. Mieszadło elektryczne**

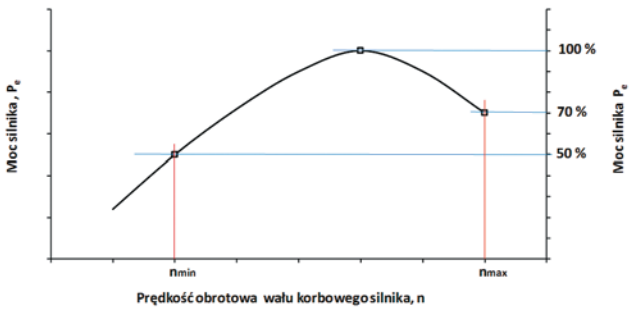
Uzyskiwane emulsje były jednorodne, jednak z czasem ulegały rozwarstwieniu i tak w przypadku mineralnego oleju napędowego rozwarstwienie następowało po około dziesięciu minutach, natomiast w przypadku syntetycznego oleju napędowego po około siedmiu minutach.

Nie badano właściwości fizyko-chemicznych tych emulsji ale należy przypuszczać, że nie spełniają one norm odpowiednich dla oleju napędowego.

Testem badawczym, według którego zamierzono przeprowadzić, badania był test ESC [1, 2]. Test ESC (znany również jako OICA/ACEA) został wprowadzony wraz z testem ETC (European Transient Cycle) i ELR (European Load Response). Jest to test wykorzystywany do oceny emisji składników spalin silników o zapłonie samoczynnym. W Europie stosowany począwszy od 2000 roku (Dyrektywa 1999/96/WE z 13 grudnia 1999 r.). ESC jest testem trzynastofazowym. Testu ESC zastąpił wcześniejszy trzynastofazowy test R-49.

Test realizowany jest przy wybranych prędkościach obrotowych wału korbowego oraz obciążeniach silnika. Występują cztery wartości prędkości obrotowej. Jedna odpowiada prędkości biegu jałowego, a trzy inne wybierane są w sposób specyficzny. Obciążenia silnika realizowane są przy trzech prędkościach obrotowych wybranych specyficznie. W istocie swojej badania wg testu realizowane są w warunkach biegu jałowego oraz trzech charakterystyk obciążeniowych.

Przed rozpoczęciem badań należy wyznaczyć charakterystyczne punkty testu z charakterystyki zewnętrznej silnika. Położenie tych punktów zobrazowano na rys. 3.



**Rys. 3. Punkty zewnętrznej charakterystyki silnika istotne przy wyznaczaniu parametrów testu ESC**

Wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika przy której prowadzone są pomiary emisji dla odpowiednich wartości procentowego obciążenia silnika, zdefiniowane są następująco:

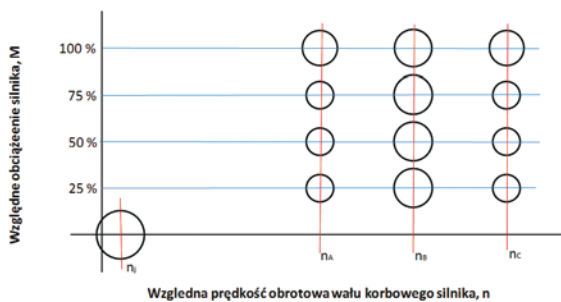
$$n_A = n_{\min} + 0,25 (n_{\max} - n_{\min})$$

$$n_B = n_{\min} + 0,50 (n_{\max} - n_{\min})$$

$$n_C = n_{\min} + 0,75 (n_{\max} - n_{\min})$$

(1)

Przy każdej prędkości obrotowej silnika realizowane są pomiary przy czterech obciążeniach odpowiadających odpowiednio 25%, 50%, 75% oraz 100% mocy rozwijanej przez silnik przy danej prędkości obrotowej, co odwzorowano na rys. 4 jako punkty przedstawiające poszczególne fazy testu ESC w układzie współrzędnych „procentowe obciążenie / procentowa prędkość wału korbowego silnika”.



**Rys. 4. Odwzorowanie punktów przedstawiających poszczególne fazy testu ESC w układzie współrzędnych „procentowe obciążenie silnika / procentowa prędkość silnika”**

Punkty charakterystyk obciążeniowych w układzie współrzędnych względnego obciążenia w funkcji względnej prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Poza 12 punktami charakterystyk obciążeniowych, badania prowadzone są przy prędkości biegu jałowego  $n_j$  (przy obciążeniu praktycznie zerowym).

Ze względu na fakt, iż silnik nie jest eksploatowany w każdym punkcie charakterystyki uniwersalnej z jednakową intensywnością, wprowadzono współczynniki wagowe, co pozwoli uwzględnić ten fakt w wyznaczaniu wartości emisji. Parametry testu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry testu ESC

Lp. (Fazy)	Prędkość obrotowa silnika $n$ , $\text{min}^{-1}$	Względne obciążenie $M$ %	Współczynnik wagowy $u$	Czas, minuty
1	BJ	0	0,15	4
2	A	100	0,08	2
3	B	50	0,10	2
4	B	75	0,10	2
5	A	50	0,05	2
6	A	75	0,05	2
7	A	25	0,05	2
8	B	100	0,09	2
9	B	25	0,10	2
10	C	100	0,08	2
11	C	25	0,05	2
12	C	75	0,05	2
13	C	50	0,05	2

Sumaryczną wartość emisji wyznacza się z zależności

$$E_j = \sum_i E_{jii} u_i \quad (2)$$

gdzie

$E_j$  – emisja  $j$ -tego składnika spalin,

$E_{jii}$  – emisji  $j$ -tego składnika spalin w  $i$ -tym punkcie testu,

$u_i$  – współczynnik wagowy w  $i$ -tym punkcie testu.

Silnik pracuje w każdym punkcie charakterystyki uniwersalnej, odpowiadających warunkom testu przez wyznaczony czas. Prędkości obrotowe silnika badanego w teście ESC ustalono z dokładnością  $\pm 50 \text{ min}^{-1}$ , natomiast moment obrotowy z dokładnością  $\pm 2\%$  maksymalnego momentu obrotowego).

## 2. Wyniki badań hamownianych silnika zasilanego badanymi paliwami

Badano silnik o zapłonie samoczynnym MF PERKINS – AD3.152UR, z konwencjonalnym układem zasilania, przystosowany do zasilania go mineralnym olejem napędowym.

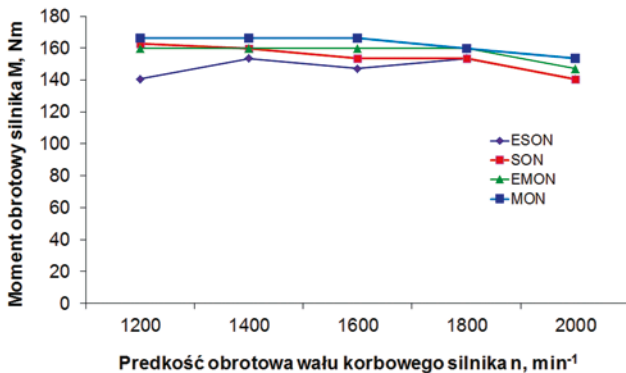
W trakcie badań zachowano standardowe nastawy silnika.

Badania, w warunkach testu ESC, prowadzono wykorzystując hamownię silnikową z hamulcem wodnym FROUDE DPX 4. Warunki te należało jednak najpierw ustalić.

Spodziewano się, iż zasilanie silnika badanymi paliwami i ich emulsjami skutkować będzie różnymi osiąganiami silnika, w tym przebiegiem charakterystyki zewnętrznej. W pierwszym etapie badań wyznaczono zatem te właśnie charakterystyki. Na tej podstawie wyznaczono charakterystykę zewnętrzną zastępczą. Założono, że jest ona dolną obwiednią wszystkich charakterystyk zewnętrznych, wyznaczonych przy zasilaniu silnika badanymi paliwami i ich emulsjami.

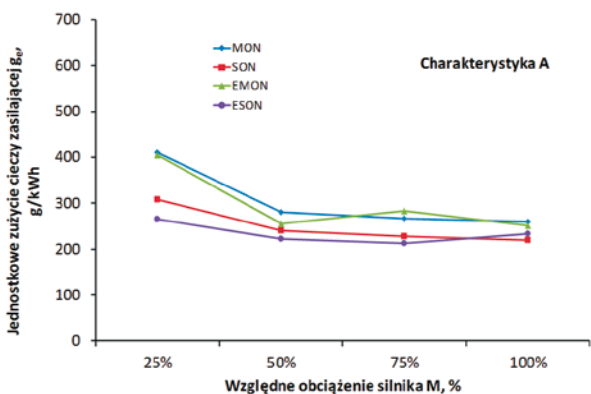
Założenie to wynika z konieczności zapewnienia by, w trakcie realizacji testu, silnik obciążony był w jednakowych punktach charakterystyki, niezależnie od tego jaka cieczą będzie zasilany. Określenie ciecz, a nie paliwo wynika z faktu, iż emulsje nie spełniają wszystkich wymogów norm paliwowych, w szczególności normy EN 590.

Uzyskane wyniki zilustrowano na rys. 5.

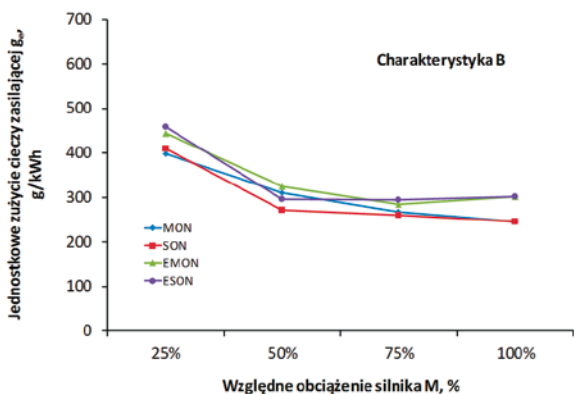


Rys. 5. Charakterystyki zewnętrzne silnika zasilanego różnymi cieczami

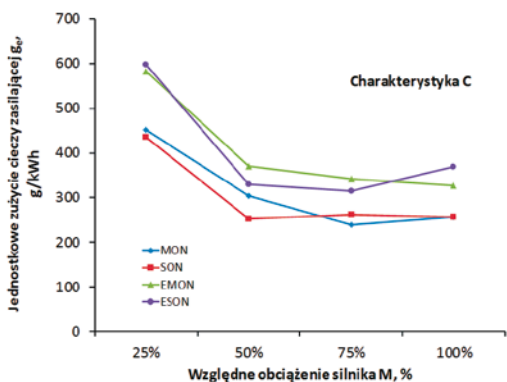
Z rysunku tego wynika, że zewnętrzną charakterystyką zastępczą jest charakterystyka wyznaczona przy zasilaniu silnika emulsją wodną syntetycznego oleju napędowego. Dysponując tą charakterystyką, wyznaczono parametry testu ESC i przeprowadzono dalsze badania.



Rys. 6. Jednostkowe zużycie cieczy zasilającej w funkcji względnego obciążenia silnika przy prędkości obrotowej wału korbowego silnika odpowiadającej charakterystyce obciążeniowej A



Rys. 7. Jednostkowe zużycie cieczy zasilającej w funkcji względnego obciążenia silnika przy prędkości obrotowej wału korbowego silnika odpowiadającej charakterystyce obciążeniowej B



Rys. 8. Jednostkowe zużycie cieczy zasilającej w funkcji względnego obciążenia silnika przy prędkości obrotowej wału korbowego silnika odpowiadającej charakterystyce obciążeniowej C.

Z przedstawionych danych wynika, że ogólnie zachowany jest charakter zmian jednostkowego zużycia cieczy (paliwa). Przy wyższych wartościach obciążenia silnika występują większe rozrzuty jednostkowego zużycia cieczy. Jednostkowe zużycie syntetycznego oleju napędowego jest, generalnie rzecz biorąc, niższe jak jednostkowe zużycie mineralnego oleju napędowego. Jednostkowe zużycie emulsji wodnej olejów napędowych jest wyższe jak jednostkowe zużycia olejów napędowych, ponieważ było mierzone zużycie całej cieczy, razem z wodą w niej zawartej.

**Tabela 2. Przykładowe wyniki pomiarów emisji węglowodorów oraz obliczone jednostkowe zużycie emulsji wodnej silnika badanego wg testu ESC**

Nr fazy	Charakterystyka	Pręd. obrotowa min <sup>-1</sup>	Wzgl. obciążenie M %	Obciążenie silnika Mr Nm	Wsp. u	Czas pomiaru minuty	Jednost. zużycie paliwa g/kWh	$g_e \times u$ g/kWh	Emisja HC ppm	HC $\times u$ ppm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	BJ	600	0	31,96	0,15	4	499,95	74,99	37,33	5,60
2	A	1450	100	141,91	0,08	2	250,72	20,06	29,80	2,38
3	B	1600	50	67,76	0,1	2	324,98	32,50	21,00	2,10
4	B	1600	75	102,28	0,1	2	284,75	28,48	23,00	2,30
5	A	1450	50	70,96	0,05	2	255,28	12,76	23,60	1,18
6	A	1450	75	106,75	0,05	2	282,79	14,14	25,00	1,25
7	A	1450	25	35,16	0,05	2	404,80	20,24	31,00	1,55
8	B	1600	100	136,16	0,09	2	301,40	27,13	26,00	2,34
9	B	1600	25	33,88	0,1	2	444,14	44,41	31,00	3,10
10	C	1750	100	140,00	0,08	2	327,58	26,21	13,00	1,04
11	C	1750	25	34,52	0,05	2	583,24	29,16	10,50	0,53
12	C	1750	75	104,84	0,05	2	342,34	17,12	10,00	0,50
13	C	1750	50	69,68	0,05	2	370,21	18,51	9,20	0,46
							Suma w teście	<b>365,70</b>		<b>24,33</b>

W kolumnie 8 powyższej tabeli przedstawiono jednostkowe zużycie emulsji ( $g_e$ ), a w kolumnie 10 emisję sumy węglowodorów (HC) w poszczególnych punktach testu. W kolumnach 9 i 11 podano odpowiednie wartości pomnożone przez udział „u”. W ostatnim wierszu przedstawiono jednostkowe zużycie paliwa oraz emisję węglowodorów w teście wyznaczone zgodnie z zależnością (2).



Wyniki badań innych wartości, po ich opracowaniu zgodnie z wymogami testu, przedstawiono w tabeli 3.

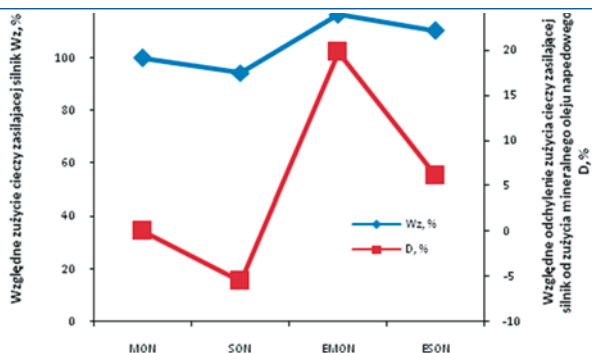
Tabela 3. Wyniki badań przeprowadzonych według testu ESC

Ciecz	Emisja CO % vol	Emisja CO <sub>2</sub> % vol	Emisja HC ppm	Jednostkowe zużycie cieczy g <sub>e</sub> g/kWh
MON	0,032	5,190	16,150	305,19
SON	0,034	6,772	9,996	288,44
EMON	0,042	7,076	24,329	<b>365,70</b>
ESON	0,078	6,424	32,086	323,85

Badano silnik zasilany zarówno olejami napędowymi (EN 590) jak i ich wodnymi emulsjami (20% v/v). Emulsje każdorazowo zawierały 80% v/v oleju napędowego. Należało zatem określić jaki było zużycie tego oleju przy zasilaniu silnika emulsjami. Wyniki odpowiednich przeliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie zużycia cieczy w teście ESC

Ciecz	Zawartość oleju napędowego % v/v	Zawartość wody % v/v	Jednostkowe zużycie cieczy odniesione do jednostkowego zużycia mineralnego oleju napędowego w teście ESC, g <sub>e</sub> , %	Różnica jednostkowego zużyciu paliwa w odniesieniu do jednostkowego zużycia mineralnego oleju napędowego w teście ESC g <sub>e</sub> , %
MON	100,00	0,00	100,00	0,00
SON	100,00	0,00	94,36	-5,49
EMON	80,00	20,00	119,83	19,83
ESON	80,00	20,00	110,31	6,11



Rys. 9. Względne zużycie cieczy zasilającej oraz względne odchylenia zużycia emulsji zasilającej silnik od zużycia mineralnego oleju napędowego

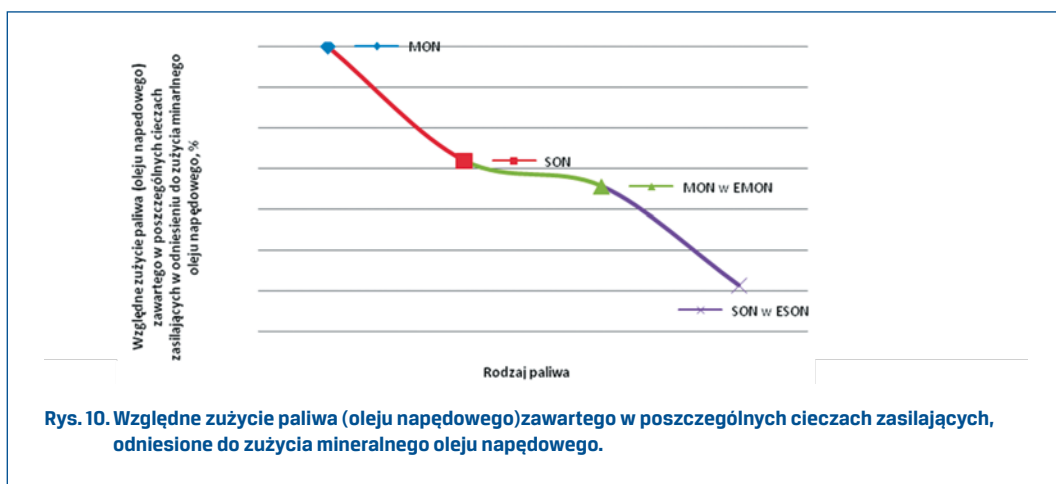
Wzrost/spadek objętościowego zużycia cieczy, którymi zasilano silnik, w odniesieniu do zużycia mineralnego oleju napędowego przedstawiono na rys. 9 .

W poniższej tabeli zestawiono procentowe różnice w zużyciu paliwa (oleju napędowego) zawartego w poszczególnych cieczach zasilających silnik w odniesieniu do zużycia mineralnego oleju napędowego.

**Tabela 5. Różnica w zużyciu paliwa (oleju napędowego) zawartego w poszczególnych cieczach zasilających silnik w odniesieniu do zużycia mineralnego oleju napędowego, %.**

Paliwo	Różnica w zużyciu paliwa (oleju napędowego) zawartego w poszczególnych cieczach zasilających silnik w odniesieniu do zużycia mineralnego oleju napędowego, %
MON	0,00
SON	-5,64
MON w EMON	-6,90
SON w ESON	-11,75

Z danych tej tabeli 4 wynika, że zasilanie silnika syntetycznym olejem napędowym, prowadzi do obniżenia jego objętościowego zużycia, odniesionego do objętościowego zużycia mineralnego oleju napędowego. Jest to o tyle ciekawe, że syntetyczny olej napędowy charakteryzuje się niższą gęstością i jednocześnie niższą wartością opalową. Wytłumaczeniem tego zjawiska jest fakt lepszego przygotowania mieszanki paliwowo – powietrznej i najwyraźniej pełniejsze spalanie syntetycznego oleju napędowego. Świadczą o tym również wyniki emisji CO<sub>2</sub> oraz HC przedstawione w tabeli 2.



Interesujące wydaje się również znaczne obniżenie zużycia oleju napędowego wówczas gdy podawany jest do silnika w emulsji z wodą. Potencjalne obniżenie zużycia o prawie 7%

w przypadku mineralnego i prawie 12% syntetycznego oleju napędowego wydaje się być zachęcające do prowadzenia dalszych prac w tym kierunku.

Z tabeli 2 wynika jednocześnie, że zasilanie silnika emulsjami oleju napędowego prowadzi do wzrostu emisji toksycznych składników spalin, w tym przypadku tlenku węgla (CO) oraz węglowodorów (HC). Jeśli wzrost ten potraktowany będzie jako istotny, to można go stosunkowo łatwo ograniczyć poprzez zastosowanie reaktorów katalitycznych [1].

### 3. Wnioski

Po analizie wyników badań potwierdzono, że poprawę ekonomiczno-ekologicznych osiągnięć współczesnych silników o zapłonie samoczynnym, uzyskać można zasilając je syntetycznym olejem napędowym lub emulsjami wodnymi olejów napędowych.

Stwierdzono, że maksymalne osiągi silnika zasilanego mineralnym i syntetycznym olejem napędowym jak i emulsjami tych olejów napędowych różnią się między sobą.

Stwierdzono, że zasilanie silnika syntetycznym olejem napędowym prowadzi do obniżenia objętościowego zużycia paliwa, wyznaczonego w warunkach testu ESC, o ok. 5.6% w odniesieniu do zużycia mineralnego oleju napędowego. Zasilanie silnika emulsją wodną syntetycznego oleju napędowego prowadzi do dalszego obniżenia jego objętościowego zużycia do prawie 12% v/v. Są to rezultaty znaczące.

Zasilanie silnika emulsją wodną mineralnego oleju napędowego prowadzi do obniżenia jego objętościowego zużycia o ok. 7% - co również jest wynikiem znaczącym.

Zasilanie silników emulsjami wodnymi olejów napędowych prowadzi do zmian w emisji toksycznych składników spalin. Generalnie rzecz biorąc wzrasta emisja tlenku węgla (CO) oraz węglowodorów (HC).

Prezentowane badania zrealizowano wykorzystując niezaawansowany technologicznie silnik o zapłonie samoczynnym. W dalszych pracach celowe byłoby zatem przeprowadzenie takich badań ale przy wykorzystaniu silnika najnowszej generacji.

W badaniach wykazano możliwość krótkotrwałego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym wodnymi emulsjami olejów napędowych. W dalszych badaniach celowe byłoby wyjaśnienie jak stosowanie emulsji wpływa na trwałość i niezawodność silników.

Stosunkowo szybkie rozwarstwianie się badanych emulsji (uzyskiwanych na drodze fizycznej przy wykorzystaniu zjawiska kawitacji) sprawia, że paliwa tak przygotowane powinny być stosowane głównie do napędu silników stacjonarnych lub silników pojazdów o masie powyżej 3.5 T.

## Literatura

- [1] SITNIK, L.J.: *Ekopaliwa silnikowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [2] <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php> [dostęp 01.04.2013]
- [3] DIBOFORI-ORJI, A.N.: *Critical Processes Involved in Formulation of Water-in-Oil Fuel Emulsions*, Combustion Efficiency of the Emulsified Fuels and Their Possible Environmental Impacts. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 3(8): 701-706, 2011 ISSN: 2040-7467.
- [4] JANKOWSKI, A.: *Influence of chosen parameters of water fuel microemulsion on combustion processes, emission level of nitrogen oxides and fuel consumption of ci engine*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 4 2011
- [5] DLUSKA, E., HUBACZ, R., WRONSKI, S.: *Simple and Multiple Water Fuel Emulsions Preparation in Helical Flow*, Turkish J. Eng. Env. Sci. 30 pp. 175 – 182, 2006.
- [6] LIN, C.Y., WANG, K.H.: *The Fuel Properties of Three-Phase Emulsions as an Alternative Fuel for Diesel Engines*, Fuel, 82, pp. 1367-1375, 2003.
- [7] VU, P.H., NISHIDA, O., FUJITA, H., HARANO, W., TOYOSHIMA, N., ITEYA, M.: *Reduction of NOx and PM from Diesel Engines by WPD Emulsified Fuel*. SAE Paper 2001-01-0152, 2001.
- [8] TAJIMA, H., TAKASAKI, K., NAKASHIMA, M., KAWANO, K., OHISHI, M., YANAGI, J. and OSAFUNE, S.: *Visual Study on Combustion of Low-Grade Fuel Water Emulsion*. COMODIA 2001. July 1-4. Nagoya 2001
- [9] <http://www.altpetrol.com/PDF/APT%20Emulsion%20Fuels%20Presentation.pdf> [dostęp 01.04.2013]