

## KRYTERIA OCENY NOŚNIKÓW ENERGII JAKO PALIW ZASTĘPCZYCH DO SILNIKÓW SPALINOWYCH

### Streszczenie

*W artykule są rozpatrywane kryteria oceny nośników energii jako paliw zastępczych do silników spalinowych. Przedstawiono klasyfikację paliw niekonwencjonalnych w stosunku do klasycznych silnikowych paliw ropopochodnych. Sformalizowano pojęcie paliw zastępczych. Wyróżniono kryteria związane z właściwościami fizyko-chemicznymi paliw, z procesami zachodzącymi w silnikach oraz z właściwościami użytkowymi silników. Jako przykład oceny paliw niekonwencjonalnych jako paliw zastępczych przedstawiono wyniki badań porównawczych silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego z dodatkiem letnim i z dodatkiem zimowym. Przedstawiono przykładowe wyniki badań i ich analizy, m.in. charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego i sprawności ogólnej. Badano także przebieg procesu spalania. Przedstawiono m.in. wyniki badań temperatury czynnika w czasie spalania oraz szybkości wydzielania się ciepła. Stwierdzono duże podobieństwo badanych charakterystyk dla oleju napędowego i letniej wersji biopaliwa. Natomiast w wypadku estrów oleju rzepakowego z dodatkiem zimowym różnice w badanych charakterystykach w stosunku do pozostałych paliw okazały się niekiedy wyraźne.*

### WSTĘP

Nośnikami energii są substancje, zjawiska, obiekty lub urządzenia, które mogą być wykorzystane do zaspokajania energetycznych potrzeb ludzi. Paliwa to nośniki energii, umożliwiające pozyskanie energii w wyniku ich spalania. Spalanie jest to reakcja utleniania egzotermiczna, w której wyniku szybkość wywiązania ciepła powoduje promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości w zakresie promieniowania widzialnego o natężeniu uznanym za umowną granicę świecenia. Paliwo jest zatem reduktorem w reakcji spalania z utleniaczem, którym jest przede wszystkim tlen zawarty w powietrzu (w niektórych silnikach cieplnych, np. raketowych, stosuje się jako utleniacze również inne substancje).

Ze względu na dotychczasowe rozpowszechnienie użytkowania paliwa silnikowe można sklasyfikować na:

- konwencjonalne,
- niekonwencjonalne.

Jako paliwa silnikowe konwencjonalne przyjmuje się te, do których standardowo są przystosowane silniki spalinowe przez ich wytwórców. Są to zatem paliwa węglowodorowe pochodzące z przeróbki ropy naftowej: benzyny silnikowe i oleje napędowe. Paliwami niekonwencjonalnymi są inne paliwa stosowane do zasilania silników spalinowych, zarówno węglowodorowe, jak i inne, pochodzące z przeróbki ropy naftowej i innych zasobów mineralnych, również pochodzące z przeróbki surowców biologicznych oraz tzw. paliwa syntetyczne.

Ważną kategorię stanowią paliwa silnikowe zastępcze [5, 6, 11]. Są to paliwa niekonwencjonalne, stanowiące paliwa zastępcze benzyny silnikowej do silników o zapłonie iskrowym lub oleju napędowego do silników o zapłonie samoczynnym. Paliwa zastępcze są zatem zamiennikami benzyny silnikowej lub oleju napędowego.

Istotą paliw zastępczych w stosunku do paliw ropopochodnych jest to, aby było możliwe użytkowanie silników zasilanych zamiennie tymi paliwami albo paliwami klasycznymi, bez dodatkowych konstrukcyjnych i regulacyjnych zmian silników [10, 19].

Rozpatrywane zmiany konstrukcyjne silników są związane nie tylko z konstrukcją, materiałami i technologią części i układów silni-

ków, ale także z układami zasilania silników, stanowiącymi część konstrukcyjną urządzeń napędzanych przez te silniki [10, 19].

Zmiany regulacyjne związane z autonomicznymi algorytmami sterowania procesów zachodzących w silnikach [11, 14]. Zmiany te dotyczą przede wszystkim dawkowania paliwa. W silnikach o zapłonie iskrowym zazwyczaj jest konieczna modyfikacja algorytmu sterowania kąta wyprzedzenia zapłonu, a w silnikach o zapłonie samoczynnym – kąta wyprzedzenia wtrysku oraz charakterystyki czasowej układu zasilania. W silnikach o zapłonie zarówno iskrowym, jak i samoczynnym, można rozpatrywać modyfikację algorytmów sterowania: współczynnika recyrkulacji spalin, ciśnienia doładowania, faz rozrządu i wzniosów zaworów oraz parametrów układu dolotowego, a także stanu cieplnego silnika.

Istnieje kilka podstawowych kryteriów oceny paliw niekonwencjonalnych ze względu na spełnianie warunków paliw zastępczych. Kryteria te można ogólnie sklasyfikować w następujący sposób [9]:

- kryteria oparte na ocenie właściwości fizyko-chemicznych ze względu na wykorzystanie paliw do zasilania silników,
- kryteria oparte na ocenie procesów zachodzących w silnikach spalinowych zasilanych ocenianymi paliwami,
- kryteria oparte na ocenie właściwości użytkowych silników spalinowych zasilanych rozpatrywanymi paliwami.

Pierwsze kryterium dotyczy przede wszystkim właściwości determinujących procesy zachodzące w silnikach. Spośród wielkości kryterialnych opartych na ocenie właściwości fizyko-chemicznych można wymienić przede wszystkim: skład elementarny oraz, związane z nim, wartość opalową i stałą stechiometryczną [5, 6, 19]. Ze względu na jakość rozpylania paliwa istotną rolę odgrywa lepkość, gęstość i napięcie powierzchniowe. Lepkość i inne wielkości, charakteryzujące właściwości trybologiczne paliwa, takie jak np.: skłonność do oddziaływania na materiały konstrukcyjne i eksploatacyjne silników, mają istotny wpływ na zużycie elementów silników i, w konsekwencji, na ich trwałość i niezawodność, a także na ich charakterystykę obsługiwaną [19]. Spośród właściwości fizyko-chemicznych paliwa istotne znaczenie ma – ze względów organizacyjnych – stabilność paliwa ze względu na jego właściwości [5, 6, 19].

Procesami zachodzącymi w silnikach spalinowych, głównie determinującymi ich właściwości użytkowe, są przede wszystkim pro-

cesy związane z zasilaniem silników oraz ze spalaniem paliwa w ich cylindrach [16]. Dotyczy to głównie operacyjnych właściwości silników. Również procesy trybologiczne, zachodzące w silnikach a zdeterminowane właściwościami fizyko-chemicznymi paliwa, zalicza się do procesów determinujących właściwości użytkowe silników.

Spośród kryteriów opartych na ocenie właściwości użytkowych silników spalinowych wymienia się przede wszystkim właściwości operacyjne, głównie ze względu na cechy energetyczne oraz ekonomiczne a także ekologiczne [9, 11].

Właściwości energetyczne są scharakteryzowane możliwością wykonania przez silnik pracy. Zatem wielkością najbardziej ogólnie charakteryzującą tę właściwość jest moc użyteczna silnika. Do wielkości charakteryzujących możliwość wykonania pracy można oczywiście również zaliczyć moment obrotowy, zakres użyteczny prędkości obrotowej, a także średnie ciśnienie użyteczne. W zastosowaniach motoryzacyjnych do tej grupy właściwości można zaliczyć maksymalną prędkość samochodu. Właściwości energetyczne są również scharakteryzowane właściwościami dynamicznymi silników oraz napędzanych przez nie urządzeń. W wypadku silników samochodowych wielkością taką jest np. czas przyspieszania pojazdu do określonej prędkości.

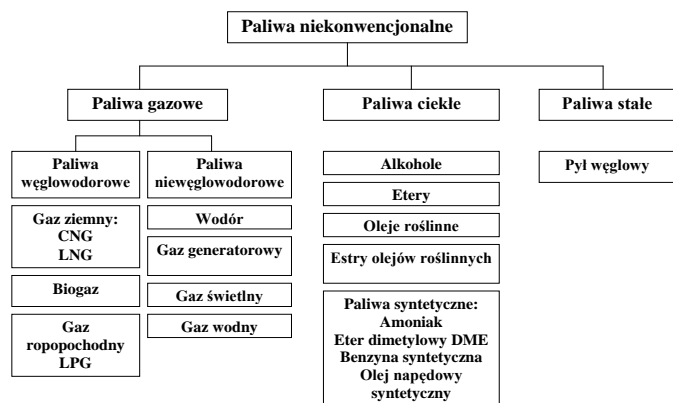
Ważne ze względów użytkowych są również kryteria ekologiczne, charakteryzujące m.in. emisję zanieczyszczeń i hałasu, czy skłonność paliwa do biodegradowalności [10, 11].

Również wielkościami opisującymi właściwości użytkowe silników spalinowych są cechy charakteryzujące trwałość i niezawodność silników oraz wymagania związane z ich obsługiwaniem [19].

Istnieje duża różnorodność dostępnych paliw do zasilania silników spalinowych. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowo klasyfikację paliw ze względu m.in. na stan skupienia [11].

Podstawowymi gazowymi paliwami węglowodorowymi są [5, 6, 11]:

- mieszanina skroplonych gazów ropopochodnych (głównie propan i butan) – LPG (ang. *Liquefied Petroleum Gas*) – przechowywany w temperaturze otoczenia i pod ciśnieniem (0,3 ÷ 0,5) MPa,
- skroplony gaz ziemny (głównie metan) – LNG (ang. *Liquefied Natural Gas*) – przechowywany w temperaturze – 162°C i pod ciśnieniem atmosferycznym,
- sprężony gaz ziemny (głównie metan) – CNG (ang. *Compressed Natural Gas*) – przechowywany w temperaturze otoczenia i pod ciśnieniem (16 ÷ 25) MPa,
- paliwo biogazowe, tzw. biometan.



Rys. 1. Klasyfikacja paliw silnikowych

Jako niewęglowodorowe paliwa niekonwencjonalne rozpatruje się przede wszystkim:

- wodór – H<sub>2</sub>;
- alkohole:
  - metanol – CH<sub>3</sub>OH,
  - etanol – CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH,
  - wyższe alkohole, np. butanole – C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH: n-butanol, sec-butanol, izobutanom i tert-butanol.

Paliwom niekonwencjonalnym są stawiane wymagania związane z eksploatacją silników spalinowych. Do podstawowych wymagań należy zaliczyć [5, 6, 11]:

- bezpieczeństwo użytkowania;
- stabilność fizyko-chemiczną paliwa;
- spełnienie przez paliwa wymagań związanych z właściwościami fizyko-chemicznymi;
- spełnienie przez paliwa innych funkcji niezbędnych w eksploatacji silników przez zapewnienie odpowiednich właściwości fizyko-chemicznych, m.in. przeciwkorozyjnych, przeciwzuzyciowych, myjących, oddziałujących na przebieg procesów spalania itp.;
- ograniczenie emisji substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska, m.in. przez:
  - ograniczenie zawartości pierścieniowych związków organicznych,
  - ograniczenie zanieczyszczeń i dodatków, sprzyjających emisji substancji szkodliwych dla środowiska, m.in.: związków ołowiu (benzyny) i siarki (oleje napędowe i benzyny);

Ze względu na ochronę środowiska paliwom stawia się wymagania [10, 11]:

- zapewnienie silnikom jak największej sprawności ogólnej w celu ochrony zasobów naturalnych i ograniczenia globalnej emisji zanieczyszczeń spowodowanej spalaniem paliw; oznacza to stosowanie paliw o jak największej wartości opałowej;
- stosowanie paliw, umożliwiających zmniejszenie emisji substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska; oznacza to także minimalizację udziału w paliwach zanieczyszczeń i dodatków, sprzyjających emisji substancji szkodliwych dla środowiska; jest to również postulat odnawialności paliw, umożliwiającej cyrkulację węgla w niewielkiej skali czasu;
- wymagania bezpieczeństwa użytkowania środków transportu i silników; w tym zakresie postuluje się również biodegradowalność paliw;
- zapewnienie silnikom dostatecznej trwałości – ograniczenie powstawania produktów zużycia oraz produktów odpadów obsługi środków transportu;
- wytwarzanie i dystrybucja paliw zapewniające jak najmniejszą degradację środowiska.

Ważnym kryterium klasyfikacji paliw ze względu na emisję dwutlenku węgla kopalnego jest podział na [5, 6, 10, 11]:

- paliwa nieodnawialne (kopalne),
- paliwa odnawialne.

Podstawowymi surowcami do wytwarzania paliw odnawialnych są surowce biologiczne (głównie roślinne) [5, 6, 10, 11]. Bazą paliw odnawialnych są przede wszystkim [11]:

- alkohole (metanol, etanol, propanole, butanole i inne),
- wyższe kwasy karboksylowe (oleje roślinne) i ich pochodne (przede wszystkim estry) – estry metylowe olejów: rzepakowego (RME – ang. *Rapeseed Methyl Esters*, RÖME – niem. *Rapsölmethylester*), sojowego (SME – ang. *Soy Oil Methyl Esters*), słonecznikowego (SME – ang. *Sunflower Oil Methyl Esters*, niem. *Sonnenblumenmethylester*), palmowego (PME – ang. *Palm Oil Methyl Ester*, PÖME – niem. *Palmölmethylester*), kokosowego (CME – ang. *Coconut Methyl Esters*),

- biogaz – pochodzący z procesów beztlenowego rozkładu związków organicznych.
- Obecnie jako powszechne zastosowanie paliw niekonwencjonalnych przyjmuje się:
  - dodatek etanolu w ilości do 5% V/V<sup>1</sup> do benzyny,
  - dodatek estrów metylowych olejów roślinnych w ilości do 7% V/V do oleju napędowego,
  - paliwo B100 – estry metylowe olejów roślinnych,
  - paliwo B20 – o zawartości 20% V/V estrów metylowych olejów roślinnych w mieszaninie z olejem napędowym,
  - skroplony gaz ropopochodny,
  - gaz ziemny i paliwo biogazowe.

Ze względu na uwarunkowania normatywne benzyny z dodatkiem etanolu o zawartości mniejszej od 5% V/V oraz oleje napędowe o zawartości mniejszej od 7% V/V nie są zaliczane do kategorii biopaliw, są zatem kwalifikowane do paliw konwencjonalnych.

Wykorzystywanie paliw gazowych do zasilania silników spalinyowych wymaga modernizacji konstrukcyjnej silników oraz układów ich zasilania w pojazdach i maszynach. Szczególnie głęboka modernizacja konstrukcji silników jest niezbędna w wypadku paliw opartych na gazie ziemnym i biogazie. Zastosowanie paliw gazowych powoduje również konieczność modernizacji algorytmów sterowania silników.

Zastosowanie paliw skomponowanych na bazie etanolu wymaga gruntownych zmian konstrukcyjnych silników spalinyowych [10]. W wypadku silników o zapłonie iskrowym są to tzw. silniki flexi-fuel, czyli „elastyczne” ze względu na zastosowane paliwa [10]. Tymi paliwami mogą być: paliwo E85, zawierające (70 ÷ 85)% V/V etanolu w mieszaninie z benzyną, benzyna oraz mieszanina benzyny z paliwem E85. Silnikami o zapłonie samoczynnym, zasilanymi paliwami etanolowymi, są silniki firmy Scania na paliwo E95 (inne oznaczenie paliwa – ED95) [10].

Znaczna część firm wytwarzających silniki o zapłonie samoczynnym dopuszcza stosowanie paliw B100 i B20. W związku z tym paliwa skomponowane na bazie estrów olejów biologicznych są zazwyczaj uważane za paliwa zastępcze w stosunku do olejów napędowych służących do zasilania silników o zapłonie samoczynnym, choć wiele wyników badań wskazuje, że zastosowanie tych paliw może prowadzić do zmian użytkowych właściwości silników [7–9, 11, 15, 18, 19].

W niniejszej publikacji przedstawiono wybrane wyniki badań empirycznych silnika badawczego zasilanego olejem napędowym i paliwami opartymi na bazie estrów metylowych oleju rzepakowego. Celem tych badań była ocena, na ile jest zasadne uznanie tych biopaliw za paliwa zastępcze w stosunku do oleju napędowego.

## 1. WYNIKI BADAŃ EMPIRYCZNYCH

Badania empiryczne zostały wykonane w Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Badania przeprowadzili: dr inż. Tomasz Skrzek z Zakładu Pojazdów i Silników Samochodowych w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego oraz Sebastian Jagiełło i Sebastian Juwa – dypłomanci z wydziału samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Wyniki badań są wykorzystywane do realizacji prac dyplomowych: magisterskich inż. Dagny Zakrzewskiej i inż. Sebastiana Jagiełły oraz inżynierskiej – Sebastiana Juwy [8, 9].

Badania empiryczne zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym AVL Single Cylinder Test Bed [4] z jednocyndrowym silnikiem badawczym o zapłonie samoczynnym AVL 5402 [2] oraz

oprzyrządowaniem sterująco-kontrolnym i pomiarowym. Do rejestracji oraz analizy danych służy oprogramowanie AVL PUMA [3] i AVL CONCERTO [1]. W badaniach wykorzystywano do zasilania silnika:

- olej napędowy – ORLEN VERVA,
- estry metylowe oleju rzepakowego o nazwie handlowej B100 z dodatkiem letnim – oznaczenie w pracy: RME – S,
- paliwo B100 z dodatkiem zimowym – RME – W.

Program badań obejmował pracę silnika w stanach statycznych na zewnętrznej charakterystyce prędkościowej w zakresie prędkości obrotowej (1200 ÷ 3600) min<sup>-1</sup> co 400 min<sup>-1</sup>.

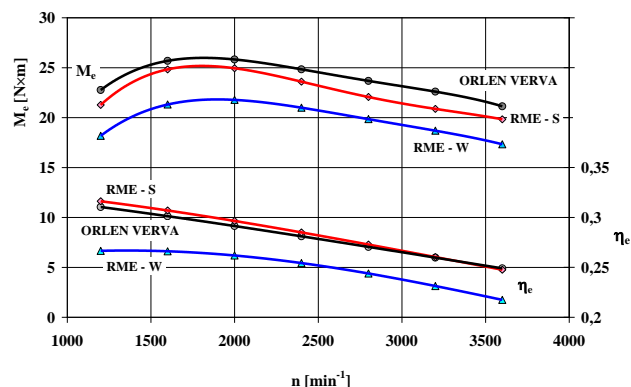
Zastosowana do badań aparatura spełnia wymagania następujących przepisów: Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r., Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. oraz Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 z dnia 18 lipca 2008 r.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań, dotyczących właściwości energetycznych ze względu na moment obrotowy, ekonomicznych ze względu na sprawność ogólną i ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń, oraz badań procesu spalania.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono mniejsze wartości momentu obrotowego w całym zakresie prędkości obrotowej: wartość różnicy względnej momentu obrotowego wynosi (rysunek 2):

- dla paliwa RME – S w stosunku do oleju napędowego średnio o około 6% (od 3% do 8%),
- dla paliwa RME – W w stosunku do oleju napędowego średnio o około 17% (od 12% do 20%).

Sprawność ogólna silnika zasilanego olejem napędowym i letnim biopaliwem jest porównywalna z dokładnością do około 1% różnicy względnej, natomiast dla biopaliwa zimowego różnica względna sprawności ogólnej w stosunku do oleju napędowego jest wyraźna – średnio 11% (od 10% do 14%) na niekorzyść paliwa RME – W.



**Rys. 2.** Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego –  $M_e$  i sprawności ogólnej –  $\eta_e$ ;  $n$  – prędkość obrotowa

Wartość maksymalna momentu obrotowego występuje dla prędkości obrotowej równej około 1600 min<sup>-1</sup>, a największej mocy użytecznej dla 3600 min<sup>-1</sup>.

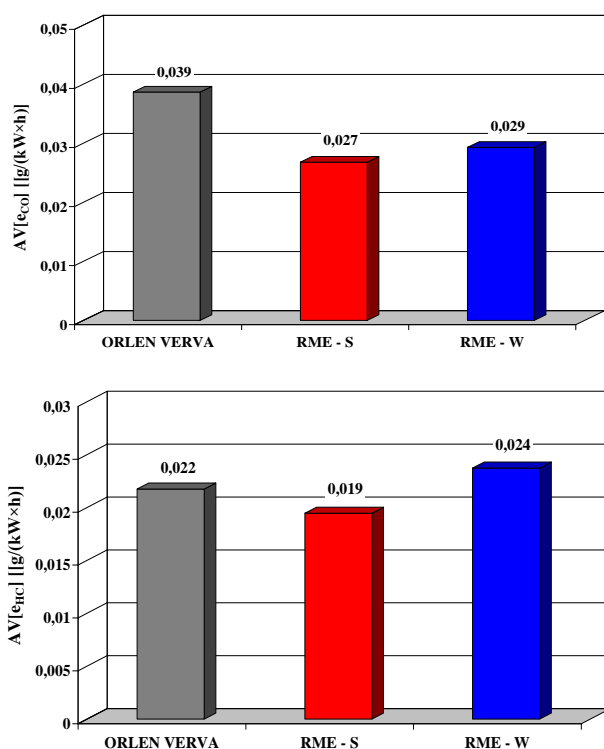
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wartość średnią w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej zanieczyszczeń dla poszczególnych paliw.

Największa różnica wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej zanieczyszczeń jest dla tlenku węgla i cząstek stałych. W wypadku tlenku węgla najmniejsza wartość średniej emisji jednostkowej jest dla paliwa RME – S, w wypadku cząstek stałych – dla paliwa RME – W. Jest również charaktery-

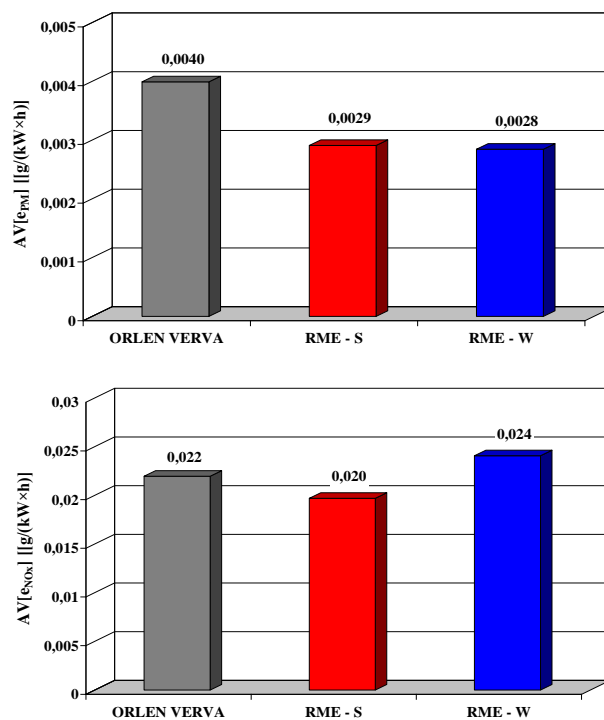
<sup>1</sup> V/V – udział objętościowy.

styczne, że w wypadku biopaliwa zimowego pogorszeniu uległy uśrednione właściwości ze względu na emisję węglowodorów i tlenków azotu.

Rejestracja wyników indykowania cylindra silnika polegała na zapisywaniu w dziedzinie obrotu wału korbowego 20 cykli ciśnienia indykowanego w każdym punkcie badań. Komplet 20 zarejestrowanych w każdym punkcie pomiarowym przebiegów ciśnienia indykowanego jest traktowany jako zbiór realizacji procesu stochastycznego ciśnienia indykowanego w tym punkcie. Rejestracji dokonywano z rozdzielczością 1 deg<sup>2</sup> obrotu wału korbowego, a w przedziale (-30 ÷ 90) deg dla górnego zwrotnego położenia tłoka, odpowiadającego spalaniu, z rozdzielczością 0,1 deg. W celu zmniejszenia udziału szumów o wysokiej częstotliwości w sygnałach, dokonano ich przetwarzania w postaci uśredniania synchronicznego [17].



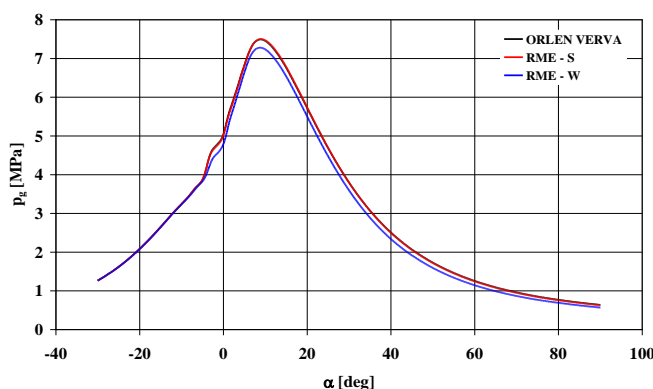
Rys. 3. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej tlenku węgla – AV[e<sub>co</sub>] i emisji jednostkowej węglowodorów – AV[e<sub>HC</sub>]; AV – operator wartości średniej



Rys. 4. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej emisji jednostkowej tlenków azotu – AV[e<sub>NOx</sub>] i emisji jednostkowej cząstek stałych – AV[e<sub>PM</sub>]

Analiza procesów zachodzących w cylindrze silnika są wykonywane dla przedziału obrotu wału korbowego zawierającego proces spalania.

Na rysunku 5 przedstawiono dla badanych paliw porównanie ciśnienia indykowanego w punkcie pracy odpowiadającym maksymalnemu momentowi obrotowemu.

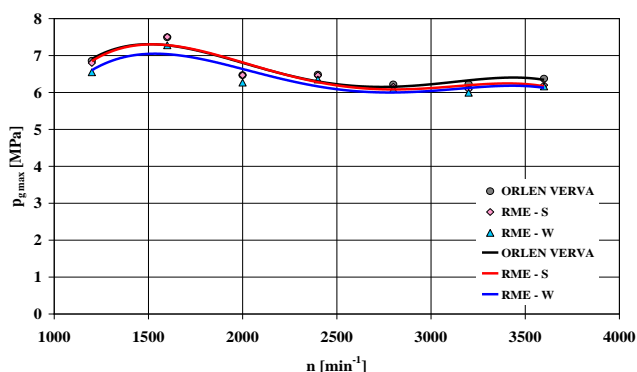


Rys. 5. Wykres indykatorowy – ciśnienie indykowane – p<sub>g</sub> w zależności od kąta obrotu wału korbowego – α dla maksymalnego momentu obrotowego

Wykresy indykatorowe dla paliw ORLEN VERVA i RME – S są zbliżone do siebie. Nieznacznie mniejsze jest ciśnienie indykowane w wypadku paliwa RME – W.

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę prędkościową maksymalnego ciśnienia indykowanego.

<sup>2</sup> Ponieważ w pracy wykorzystuje się różniczkowanie względem kąta, do oznaczenia stopnia stosuje się „deg” a nie „°”, aby uniknąć symbolu „°” w mianowniku oznaczenia jednostki miary pochodnej względem kąta.



**Rys. 6.** Charakterystyka prędkościowa maksymalnego ciśnienia indykowanego –  $p_{gmax}$

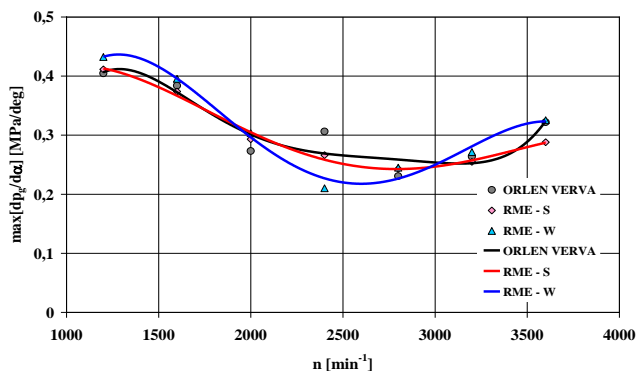
Również w wypadku wartości maksymalnej ciśnienia indykowanego charakterystyki prędkościowe dla oleju napędowego i letniego biopaliwa są do siebie zbliżone; mniejsze wartości są dla paliwa RME – W.

Zbadano również pochodną ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego. Jest to miara tzw. twardości biegu silnika, jednego z najpoważniejszych problemów silników o zapłonie samoczynnym [16]. Zgrubny estymator różniczkowania numerycznego został poddany filtrowaniu dolnoprzepustowemu w celu zmniejszenia w sygnale udziału szumów o dużej częstotliwości [12, 13]. Do filtracji zastosowano pięciokrotnie filtr nierekurencyjny [12, 13]:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{11} \sum_{j=i-5}^{i+5} y_j$$

gdzie:  $y$  – estymator zgrubny,  
 $\bar{y}$  – estymator przefiltrowany.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystykę prędkościową wartości maksymalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego.



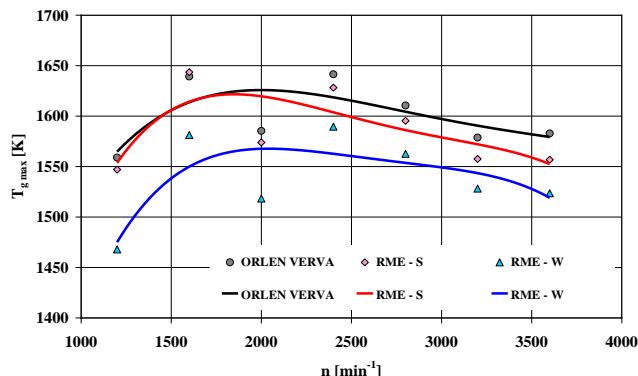
**Rys. 7.** Charakterystyka prędkościowa wartości maksymalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego –  $\max[dp_g/d\alpha]$ ;  $\max$  – operator wartości maksymalnej

Również w wypadku pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego podobieństwo dla paliw ORLEN VERVA i RME – S jest znaczne. Od tych zależności nieznacznie odbiega charakterystyka dla biopaliwa zimowego.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia indykowanego oraz informacji związanych z parametrami silnika i paliw wyznaczono, zgodnie z algorytmem AVL CONCERTO, przebiegi: ciepła jednostkowego odniesionego do objętości skokowej cylindra,

szybkości wydzielania się ciepła jednostkowego i temperatury czynnika.

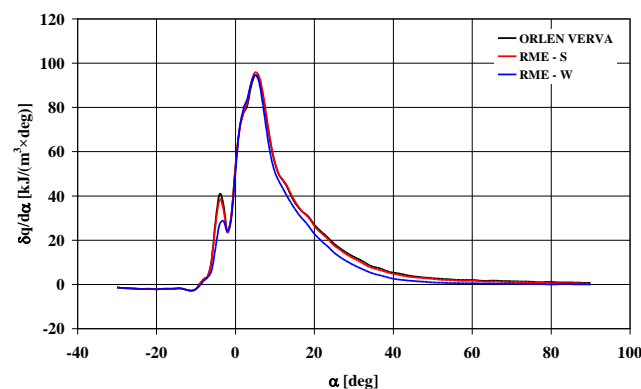
Na rysunku 8 przedstawiono charakterystykę prędkościową maksymalnej temperatury czynnika.



**Rys. 8.** Charakterystyka prędkościowa maksymalnej temperatury czynnika –  $T_{gmax}$

Charakterystyki maksymalnej temperatury czynnika dla oleju napędowego i biopaliwa letniego są do siebie zbliżone, dla biopaliwa zimowego maksymalna temperatura jest o około 50 K niższa.

Na rysunku 9 jest przedstawiony przebieg szybkości wydzielania się ciepła jednostkowego.



**Rys. 9.** Szybkość wydzielania się ciepła jednostkowego –  $\dot{q}/d$  dla maksymalnego momentu obrotowego;  $\square$  – forma Pfaffa

Przebieg szybkości wydzielania się ciepła jednostkowego jest dla oleju napędowego i paliwa RME – S podobny. Szybkość wydzielania się ciepła jednostkowego dla biopaliwa zimowego jest nieznacznie mniejsza.

Również inne wyniki przeprowadzonych badań, nie publikowane jeszcze dotychczas, wskazują na znaczne podobieństwo charakterystyk procesu spalania dla paliw ORLEN VERVA i RME – S.

## PODSUMOWANIE

Ogólne rozważania nad kryteriami oceny nośników energii jako paliw zastępczych do silników spalinowych zostały poparte wynikami badań empirycznych. Mimo że w artykule przedstawiono jedynie nieliczne wyniki badań empirycznych, a badania dotyczyły tylko wybranych kryteriów oceny, istnieją podstawy do sformułowania sądu, iż jest uzasadnione traktowanie paliwa skomponowanego na bazie estrów metylowych oleju roślinnego z letnim pakietem dodatków jako paliwa zastępczego w stosunku do oleju napędowego. Jest to tym bardziej znamienne, że niektóre właściwości fizyko-

chemiczne dla porównywanych paliw niekiedy różnią się istotnie, szczególnie wartości opałowej i lepkości [8]. Paliwo na bazie estrów metylowych oleju rzepakowego z dodatkiem zimowym z nieco większymi zastrzeżeniami można traktować jako paliwo zastępcze w stosunku do oleju napędowego.

Autorzy mają świadomość, że bardziej kompletne badania powinny dotyczyć jeszcze przede wszystkim badań regulacyjnych ze względu na parametry będące przedmiotem autonomicznych algorytmów sterowania. Oczywiście dla użytkowników silników spalinowych szczególnie ważne są wyniki badań eksploatacyjnych, przede wszystkim zużycia elementów silnika i jego trwałości. Ważne są również badania, umożliwiające sformułowanie wniosków na temat właściwości obsługowych silników zasilanych paliwami zastępczymi.

## PIŚMIENNICTWO

- AVL: CONCERTO™ – Data Post-Processing. <https://www.avl.com/-/avl-concerto-data-post-processing>. (2015.07.11).
- AVL: Product Description. Single cylinder research engine.
- AVL: PUMA Open Automation Platform. <https://www.avl.com/-/avl-puma-open-automation-platform>. (2015.07.11).
- AVL: Testing Solutions. Measure and Control. Single Cylinder Research Engines & Compact Test Bed.
- Baczewski K., Kałdoński T.: Paliwa do silników o zapłonie iskrowym. WKŁ 2005.
- Baczewski K., Kałdoński T.: Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. WKŁ 2008.
- Chłopek Z., Bardziński W., Jarczewski M., Sar H.: Influence of fatty acid methyl esters' additive to diesel engine on ecology, fuel consumption and vehicle's performance. Journal of KONES 2006. 1. 261–268.
- Chłopek Z., Jagiełło S., Juwa S., Skrzek T.: Badania porównawcze właściwości użytkowych silnika spalinowego zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. (Praca w druku).
- Chłopek Z., Jagiełło S., Juwa S., Zakrzewska D.: Badania procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. (Praca w druku).
- Chłopek Z.: Ecological aspects of using bioethanol fuel to power combustion engines. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability Nr 3 (35)/2007. 65–69.
- Chłopek Z.: Ekologiczne aspekty motoryzacji i bezpieczeństwo ruchu drogowego. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
- Chłopek Z.: On selected methods of numerical differentiation on the example of cylindrical pressure course differentiation. Journal of KONES 2001. 54–64.
- Chłopek Z.: The subject of task explicitness in numerical differentiation. Journal of KONES 2001. 65–76.
- Guzzella L., Onder Ch. H.: Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Springer. 2004.
- Mancaruso E., Vaglio B. M.: Premixed combustion of GTL and RME fuels in a single cylinder research engine. Applied Energy Volume 91, Issue 1, March 2012. 385–394.
- Pulkrabek W. W.: Engineering fundamentals of the internal combustion engine. Pearson Prince Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Ralston A., Wilf H. S.: Mathematical methods for digital computers. John Wiley. New York 1960.
- Ruan D. F., Cheng W. L., Lee C. F.: Comparison of performance and combustion characteristics of diesel fuel and vegetable oils in diesel engine. 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress. Shanghai, China. 2008.
- Szlachta Z.: Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. WKŁ. Warszawa 2002.

## THE CRITERIA FOR THE ASSESSMENT ENERGY CARRIERS AS REPLACEMENT FUELS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

### Abstract

*The article dealt with the assessment criteria of energy carriers as replacement fuels for internal combustion engines. It is presented the classification of non-conventional fuels compared to traditional petroleum motor fuels. It formalized the concept of replacement fuels. Distinguished criteria related to physical and chemical properties of fuels, with processes in engines and engines with functional properties. As an example, the assessment of non-conventional fuels as replacement fuels presents the results of comparative tests of a compression ignition engine powered with diesel fuel and rapeseed oil methyl esters with summer additive and winter additive. Are examples of the results of research and analysis, including speed characteristics of the engine torque and the effective efficiency. It was also investigated combustion process. Presents, among others, the results of the temperature of medium at the combustion time and the heat generation speed. It was found a strong resemblance examined the characteristics of diesel fuel and summer biofuel. However, in the case of winter biofuel differences in the examined characteristics as compared with other fuel proved sometimes pronounced.*

Autorzy:

Prof. dr hab. **Zdzisław Chłopek** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji. 01-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55; e-mail: Zdzislaw.Chlopek@pimot.eu; Zdzislaw.Chlopek@gmail.com; tel. +48 22 7777019; +48 603861709.

Inż. **Dagna Zakrzewska** – Przemysłowy Instytut Motoryzacji. 01-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55; e-mail: d.zakrzewska@pimot.eu, tel. +48 22 7777292.